

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

СИНЮК ОЛЕГ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 678.023.5

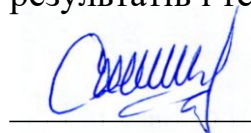
**ДИСЕРТАЦІЯ**

НАУКОВІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ  
ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ У ВИРОБИ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Спеціальність 05.05.10 – машини легкої промисловості

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



О.М. Синюк

Науковий консультант: Скиба Микола Єгорович,  
доктор технічних наук, професор

## АНОТАЦІЯ

Синюк О.М. Наукові основи проектування обладнання для переробки полімерних відходів у вироби легкої промисловості. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.10 – машини легкої промисловості. – Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної проблеми проектування ресурсозберігаючого обладнання для екологічно чистої переробки полімерних відходів у вироби легкої промисловості. Сьогодні полімерні відходи легкої промисловості та інших галузей виробництва переробляють хімічним рециклінгом та механічним подрібненням. При хімічній переробці полімерних матеріалів суттєвим недоліком є висока вартість процесу та значне зниження фізико-механічних характеристик переробленого матеріалу. Механічна переробка полімерних відходів є простішою, дешевшою і продуктивнішою за хімічну, але обладнання для механічної переробки полімерних відходів легкої промисловості сьогодні не так багато, в основному на ринку пропонується обладнання виключно для переробки поліетилентерефталата (ПЕТ), але в більшості випадків і це обладнання запозичено з інших галузей промисловості. Сучасні методи проектування обладнання для переробки полімерних відходів не враховують зміни у структурі полімеру, що виникають у процесі його переробки, в результаті чого основними недоліками процесу подрібнення полімерних відходів сучасним обладнанням є: значні витрати енергії та зниження експлуатаційних властивостей переробленого полімеру, що зумовлено руйнуванням надмолекулярних утворень полімерного матеріалу в процесі його переробки.

Наукові основи проектування обладнання для переробки полімерних відходів у вироби легкої промисловості, розроблені в дисертаційній роботі, дозволяють розв'язувати згадану проблему. Вони включають у себе моделі надмолекулярної структури полімерного матеріалу та розроблені на їх основі методи визначення пружних властивостей полімеру при впливі на нього механічного та теплового

полів, що дозволяють розраховувати мінімальні деформації та температури, які має створити перероблювальне обладнання для руйнування полімерних відходів. На основі згаданих методів визначено діапазони відносної деформації попереднього розтягу і температури нагріву полімерного матеріалу, в межах яких забезпечується найбільш суттєве зниження модуля пружності та зсуву в поперечному до попереднього розтягу напрямку. Коректність розроблених математичних моделей та розроблених на її основі методів визначення пружних властивостей полімеру за відомою деформацією та температурою підтверджено експериментальними дослідженнями впливу механічного і теплового полів на фізико-механічні характеристики полімерного матеріалу.

Зв'язок між деформаціями, які необхідно створити в полімерному матеріалі, щоб зруйнувати його, та конструктивними і технологічними параметрами обладнання для переробки полімерних відходів встановлюють отримані в дисертаційній роботі залежності, на основі яких розроблено методи проектування пристроїв із зубчастими валками та валками профілю Рело, які дозволяють визначати діаметр зубчастих валків і валків профілю Рело, висоту, кут профілю і крок зубців, частоту обертання валків, ексцентриситет дуги валків профілю Рело відносно вісі їх обертання, при яких забезпечується максимальна орієнтація структури переробленого матеріалу за мінімальних витрат енергії. Правильність розроблених методів проектування обладнання для переробки полімерних відходів підтверджено результатами випробування експериментального зразка цього обладнання, що був спроектований із використанням зазначених методів.

Перероблені на експериментальній установці полімерні відходи використовувалися для виготовлення полімерних виробів легкої промисловості з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Отримання таких виробів стало можливим завдяки розробці математичної моделі руху суміші полімерного матеріалу з частинками перероблених полімерних відходів в процесі заповнення порожнини прес-форми, яка, на відміну від існуючих моделей, дозволяє спостерігати за формуванням структури полімерних виробів із включенням частинок перероблених відходів. Коректність цієї математичної моделі

підтверджена експериментальними дослідженнями впливу конструктивних параметрів прес-форми на формування структури підошви із включенням частинок полімерних відходів.

Підвищення експлуатаційних характеристик підошов для взуття, отриманих литтям під тиском суміші полівінілхлориду з частинками переробленого поліпропілену, було підтверджено експериментальними випробуваннями цих підошов на розривну міцність та втомну витривалість. Результати цих випробувань можуть бути використані при проектуванні перероблювального обладнання для отримання частинок необхідної форми і розмірів та при проектуванні прес-форм для отримання необхідної концентрації і орієнтації частинок у полімерних виробх легкої промисловості.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше запропоновано концепцію проектування обладнання для переробки полімерних відходів, яка враховує зміну надмолекулярної структури полімерного матеріалу та анізотропію його властивостей при створенні у ньому складного напружено-деформованого стану, в результаті чого було розроблено математичну модель зміни структури полімерного матеріалу та анізотропії його експлуатаційних властивостей під впливом механічного і теплового полів, яку покладено в основу аналітичного методу розрахунку пружних властивостей полімерних матеріалів, що дозволяє визначати мінімальні деформації, які має створити перероблювальне обладнання в полімерному матеріалі для руйнування його структури.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що під час виконання дисертаційної роботи розроблений метод визначення конструктивних параметрів валкових пристроїв та голкофрези та технологічних режимів їх роботи, при яких забезпечується руйнування полімерного матеріалу на частинки з орієнтованою структурою при мінімальних енергетичних витратах. Проведені експериментальні дослідження процесу переробки полімерних матеріалів (поліетиленового і поліпропіленового листів та підошви з полівінілхлориду) на валкових пристроях та голкофрезі дозволили отримати аналітичні залежності, які пов'язують основні конструктивні параметри перероблювального обладнання та



технологічні режими його роботи з граничною деформацією полімерних відходів та витратами енергії, що дає можливість розраховувати та проектувати високоефективне ресурсозберігаюче обладнання для переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості.

Все це дозволило розробити рекомендації щодо визначення основних параметрів пристроїв для переробки полімерних відходів та проектування прес-форм для лиття під тиском полімерних листових виробів (корпусів валіз) та деталей низу взуття (підшов) із додаванням частинок перероблених полімерів, на основі яких виготовлені пристрої для пластичного послаблення (пристрій із зубчастими валками) та для остаточного руйнування (пристрій із валками профілю Рело і голкофреза) структури полімеру та прес-форма для лиття підшов, що враховує орієнтацію частинок перероблених полімерних відходів у готовому виробі.

Результати наукових досліджень у вигляді конструкторської документації на перероблювальні пристрої та методи їх проектування впровадженні на взуттєвому підприємстві ПП «Кредо» (м. Хмельницький) з економічним ефектом 136800 грн; на Хмельницькій взуттєвій фабриці ТОВ «Взутекс» з економічним ефектом 128887 грн; на Київському підприємстві ТОВ «Таланлегпром» з очікуваним економічним ефектом 203840 грн та передані для впровадження Українській технологічній академії. Експериментальна установка для переробки полімерних відходів та прес-форма для дослідження процесу її заповнення використовуються в навчальному процесі Хмельницького національного університету.

*Ключові слова:* обладнання легкої промисловості, полімерні відходи, проектування, валковий зубчастий пристрій, валки профілю Рело, структура полімеру, деформація, навантаження, руйнування, прес-форма для лиття підшов, армовані підшви.

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані у 35 наукових працях, перелік яких наведено нижче.

### ***Монографії:***

1. Бурмістенков О.П., Злотенко Б.М., Скиба М.Є., Синюк О.М. Числові методи математичного моделювання в створенні технологічної оснастки для лиття

- виробів з полімерних матеріалів: монографія. Хмельницький : ПП Ковальський В.В. 2002. 148 с.
2. Бурмістенков О.П., Злотенко Б.М., Коновал В.П., Панасюк І.В., Скиба М.Є., Синюк О.М. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості: монографія. Хмельницький : РВЦ ХНУ. 2007. 255 с.
  3. Synyuk O., Skyba M., Romanets T. Formation of the model of the polymer material structure during orientational drawig. *Actual problems of modern science* [collective monograph]. Bydgoszcz (Poland) : UTP University of Sciences and Technology. 2017. P. 395-413.

***У фахових виданнях:***

4. Синюк О.М., Скиба М.Є., Злотенко Б.М. Числове моделювання процесу заповнення порожнини прес-форми складної конфігурації. *Вісник Технологічного університету Поділля*. 2004. № 5. С. 49-52.
5. Кулік Т. І., Злотенко Б. М., Синюк О. М. Прогнозування конфігурації частин литих комбінованих виробів з полімерних матеріалів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2005. № 2. С. 43-48.
6. Синюк О.М., Скиба М.Є. Експериментальне дослідження процесу утворення спаїв та впливу орієнтації спаїв на експлуатаційні властивості полімерних виробів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2005. № 4. Ч.1. Т.2. С. 245-248.
7. Синюк О.М., Скиба М.Є. Зменшення витрат електроенергії для частотно-імпульсних приводів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2013. №6. С. 54-57.
8. Скиба М.Є., Синюк О.М. Структурно-механічна модель полімерних виробів, отриманих литтям під тиском. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2014. №6 (219). С. 27-33.
9. Синюк О.М. Математична модель анізотропних властивостей полімерних матеріалів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2015. №1 (221). С. 12-19.

10. Скиба М.Є., Синюк О.М., Михайловський А.Ю. Математичне моделювання впливу геометрії шнека та кінематичних параметрів його руху на переміщення гранульованого полімеру в процесі лиття під тиском. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2015. №5 (229). С. 38-45.
11. Синюк О.М., Скиба М.Є. Метод визначення ефективних властивостей багатошарових полімерних матеріалів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2015. №6 (231). С. 54-62.
12. Синюк О.М. Модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2016. №3 (237). С. 181-188.
13. Синюк О.М., Скиба М.Є. Моделювання зміни надмолекулярної структури полімерних матеріалів під час орієнтаційної витяжки. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2016. №6 (243). С. 45-51.
14. Синюк О.М. Визначення пружних властивостей аморфно-кристалічних полімерів сферолітної структури. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. №6. С. 77-86.
15. Синюк О.М. Моделювання пружного відновлення струменя, що виходить з формуючої головки. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2016. №4 (59). С. 203-212.
16. Синюк О.М. Метод розрахунку ефективних пружних властивостей полімерів з орієнтованою структурою. *Науковий журнал Чернігівського національного технологічного університету «Технічні науки та технології»*. 2016. №4. С.16-25.
17. Синюк О.М. Вплив тертя на об'ємну продуктивність переміщення відходів полімерного матеріалу в шнековому конвеєрі. *Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології»*. м. Хмельницький. 2016. №2 (80). С. 89-96.
18. Синюк О.М. Моделювання процесу заповнення розплавом полімеру порожнини прес-форми з армуючими елементами. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2017. №1 (245). С. 251-257.
19. Синюк О.М., Медведчук Н.К. Визначення пружних властивостей полімерного матеріалу під час впливу на нього напружень зсуву. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2017. №4 (251). С. 73-81.

20. Синюк О.М., А.Ю. Михайловський. Визначення ефективних пружних властивостей орієнтованих полімерів в поперечному напрямку. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2017. №6 (116). С. 139-148.
21. Синюк О.М. Експериментальні дослідження руйнування поліетиленових та поліпропіленових плівок. Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології». м. Хмельницький. 2017. № 4 (86). С. 51-59.
22. Скиба М.Є., Синюк О.М. Експериментальні дослідження процесу переробки полімерних відходів легкої промисловості. Вісник Хмельницького національного університету. 2017. №6 (255). С. 286-292.
23. Synyuk O., Kulik T., Zlotenko B. Modeling a process of filling the mold during injection molding of polymeric parts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5/1 (89). P. 70-77.
24. Synyuk Oleh. Determination of rational structural parameters of device for polymer recycling. *Scientific Journal of the TNTU*. 2017. №1. P. 53-61.

***Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав:***

25. Skyba M., Synyuk O. Improvement of press-forms for polymeric items moulding. *Archives of foundry. Polish Academy of Sciences branch Katowice foundry commission*. Katowice (Poland). 2004. V. 4. № 12. P. 235-248.
26. Сынчук О.Н., Кулик Т.И. Расчет основных параметров устройства для переработки полимерных отходов. *Вестник Витебского государственного технологического университета*. 2017. № 2 (33). С. 78-87.

***Патенти на корисну модель:***

27. Патент на корисну модель № 10263, Україна, МПК В29 С 45/73. Ливарна форма для пластмас / Синюк О. М., Кулік Т. І., Злотенко Б. М. № u200503001. Заяв. 01.04.2005. Опубл. 15.11.2005. Бюл. № 11. 2 с.
28. Патент на корисну модель № 63705, Україна, МПК Н02 Р 27/04. Спосіб зменшення витрат електроенергії для приводів / Синюк О.М., Михайловський Ю.Б. № u201004865. Заяв. 23.04.2010. Опубл. 25.10.2011. Бюл. № 20. 2 с.

***Матеріали та тези конференцій:***

29. Synyuk O., Skyba M. Improvement of Footwear Moulding Machines for the Production of the Advanced Reliability Items. *The eleventh world congress in Mechanism and Machine Science* (1-4 April 2004). Tianjin (China) : Editor Tian Huang School of Mechanical Engineering Tianjin University. 2004. V.5. P. 2212-2216.
30. Синюк О. Розробка прес-форм для лиття полімерних виробів. *Технічно-економічне сприяння розвитку підприємництва: Зб. праць II Міжнародної польсько-української наукової конференції* (13-14 жовтня 2005). Краків (Польща) : Краківська політехніка ім. Тадеуша Костюшки. 2005. С. 287-296.
31. Синюк О.М. Використання полімерних відходів при литті двошарових підошов. *Матеріали Міжнародної українсько-польської конференція «Techno and Design»* (19-21 червня 2012). Київ : Київський національний університет технологій та дизайну. 2012. С.263-268.
32. Синюк О.М. Кравчук А.Ю. Метод визначення ефективних властивостей багатошарових полімерних матеріалів. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «VI Українсько-польські наукові діалоги»* (21-24 жовтня 2015). Хмельницький-Яремче. 2015. С. 19-21.
33. Синюк О.М. Проблема еволюції лінії контакту трьох фаз в процесі руху полімеру в прес-формі. *Збірник наукових праць Міжнародної науково-технічної конференції молодих науковців «Сучасні технології в механіці»* (21-23 квітня 2016 року). Хмельницький: ХНУ. 2016. С. 172-174.
34. Синюк О.М. Михайловський А.Ю. Визначення ефективних пружних властивостей орієнтованих полімерів в поперечному до орієнтації напрямку. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «VII Українсько-польські наукові діалоги»* (18-21 жовтня 2017). Хмельницький-Меджибіж. 2017. С. 112-113.
35. Карван С. А., Горященко С. Л., Синюк О. М. Розробка захисного форменого одягу для військовослужбовців. *Тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки»* (11-12 жовтня 2017). Київ. 2017. С. 145-147.

## ANNOTATION

*Synyuk O.M.* Scientific basis of designing equipment for the recycling of polymeric waste into light industry products. – Qualifying scientific work on the right of manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.05.10 – machines of light industry. – Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 2018.

The dissertation is dedicated to the solution of the scientific and technical problem of designing resource-saving equipment for the ecologically friendly recycling of polymeric waste in light industrial products. Today, polymeric waste from light industry and other industries is recycled by chemical recycling and mechanical grinding. The essential drawback of the chemical recycling of polymeric materials is the high cost of the process and a significant reduction in physical and mechanical characteristics of the recycled material. Mechanical recycling of polymeric waste is easier, cheaper and more productive than the chemical, but today there is not enough equipment for the mechanical recycling of polymeric waste in light industry, mainly equipment is offered exclusively for processing PET, but mostly this equipment is borrowed from other industries. Modern methods of designing equipment for recycling of polymeric waste do not take into account changes and in the structures and polymer arising during recycling, resulting in the main drawbacks of the process of polymeric waste grinding with modern equipment are: significant energy consumption and reduction of operational properties of recycled polymer due to the destruction of the supramolecular formations of the polymer material during its recycling.

Scientific bases of designing equipment for recycling of polymeric waste into products of light industry, developed in the dissertation, allow solving of the problem. They include models of the supramolecular structure of the polymeric material and the methods of determining the elastic properties of the polymer on the basis of their influence on the mechanical and thermal fields, which allow calculating the minimum deformations and temperatures that should create recycling equipment for the destruction of polymer waste, are developed on their basis. On the basis of the above-mentioned methods, the ranges of relative strain of the previous tensile and the heating

temperature of the polymeric material are determined, within which the most significant reduction of the modulus of elasticity and shear in the transverse to the previous tension of the direction is provided. The correctness of the developed mathematical models and the methods developed for their determination on the elastic properties of the polymer under known deformation and temperature is confirmed by experimental studies of the influence of mechanical and thermal fields on the physical and mechanical characteristics of the polymeric material.

The connection between the deformations that must be created in a polymeric material to destroy it, and the structural and technological parameters of the equipment for the recycling of polymeric waste, determine the dependences obtained in the dissertation, dependencies on the basis of which the methods of designing devices with toothed rolls and rolls of the Relo profile are developed, which allow determining the diameter of the toothed rolls and rolls of the profile of the Relo, the height, the profile angle and step of the teeth, the rotational speed of the rolls, the eccentricity of the arc of rolls of the profile of the Relo relative to the axis of rotation, at which the required dispersion of the recycled material is provided at minimum energy consumption. The correctness of the developed methods of designing equipment for the recycling of polymeric waste is confirmed by the results of the test of an experimental design of this equipment, which was designed using these methods.

Recycled on an experimental installation, polymeric waste was used for the manufacture of polymeric products of light industry with increased operational characteristics. The acquisition of such products was made possible by the development of a mathematical model of the movement of a mixture of polymer material with particles of recycled polymer waste in the process of filling the cavity of the mold, which, unlike existing models, allows observing the formation of the structure of polymer products with the inclusion of particles of recycled waste. The correctness of this mathematical model is confirmed by experimental studies of the influence of the structural parameters of the mold on the formation of the structure of the sole with the inclusion of particles of polymeric waste.

Increased performance soles for shoes, received injection molding blends of PVC with recycled polyethylene particles was confirmed by experimental tests on the soles of tensile strength and fatigue endurance. The results of these tests can be used in the design of recycling equipment for obtaining the particles of the required shape and size and for designing molds to obtain the required concentration and orientation of the particles in the polymeric products of the light industry.

The scientific novelty of the work is that for the first time the concept of the design of equipment for the recycling of polymeric waste is proposed, which takes into account the change in the supramolecular structure of the polymeric material and the anisotropy of its properties when it is created in a complex stress-strain state, resulting in a mathematical model for changing the structure of the polymeric material and anisotropy of its operational properties under the influence of mechanical and thermal fields, which is the basis of the analytical method of calculating the elastic properties of polymeric materials, which allows determining the minimum deformation, which should create a recycling equipment in a polymeric material to destroy its structure.

The practical significance of the results obtained is that during the implementation of the dissertation, a method for determining the structural parameters of rollers and mills and technological modes of their work, at which the destruction of the polymeric material to the particles of the required dispersion at a minimum energy costs is provided. The experimental researches of the recycling of polymeric materials (polyethylene and polypropylene sheets and PVC soles) on roller devices and needle-cutter allow obtaining analytical dependencies that connect the main structural parameters of the recycling equipment and the technological modes of its work with the energy consumption and the degree of dispersion of the recycled material, which makes it possible to calculate and design high-efficiency resource-saving equipment for the recycling of polymeric waste into light industry products.

All of this has allowed to develop recommendations for determining the main parameters of devices for the recycling of polymeric waste and designing molds for pressure casting of sheet metal products (cases of suitcases) and parts of the bottom of the shoes (soles) with the addition of particles of recycled polymers, on the basis of



which devices for plastic weakening (toothed-roller device) and for final destruction (device with rolls of the Relo profile and the needle-cutter) of the polymer structure and the stem molding form have been made, taking into account the orientation of the particles of recycled polymer waste in the finished product.

Results of scientific researches in the form of design documentation for processing equipment and methods of their designing are implemented at Khmelnytsky shoe enterprise PE «Kredo» with the economic effect of 136800 UAH per year; at Khmelnytsky shoe factory LTD «Vzuteks» with the economic effect of 128887 UAH per year; at the LTD «Talanlegprom» (Kiev) with the expected economic effect of 203840 UAH and transferred for implementation to Ukrainian Technological Academy. A pilot plant for recycling plastic waste and mold to study the process of filling is used in teaching Khmelnytsky National University.

*Keywords:* equipment, design, roller gear, rolls of the Relo profile recycling, polymeric waste, structure, deformation, loading, destruction, compression molds for molding soles, reinforced a bottom of footwear.

The main results of the dissertation researches are published in 35 scientific works which are shown below.

### ***Monographs:***

1. Burmistenkov O.P., Zlotonko B.M., Skyba M.E., Synyuk O.M. Numerical methods of mathematical modeling in creation of technological equipment for molding of products from polymeric materials: monograph. Khmelnytskyi: PP Kovalsky V.V. 2002. 148 p.
2. Burmistenkov O.P., Zlotonko B.M., Konoval V.P., Panasyuk I.V., Skyba M.E., Synyuk O.M. Manufacture of cast parts and products from polymeric materials in the shoe and leather industry: monograph. Khmelnytskyi: RVC KhNU. 255 p.
3. Synyuk O., Skyba M., Romanets T. Formation of the model of the polymer material structure during orientational draw. *Actual problems of modern science* [collective monograph]. Bydgoszcz (Poland): UTP University of Sciences and Technology. 2017. P. 395-413.

***In professional publications:***

4. Synyuk O. M., Skyba M.E., Zlontonko B.M. Numerical simulation of the process of filling the cavity of the mold of a complex configuration. *Herald of Technological University of Podillya*. 2004. №5. P. 49-52.
5. Kulik T.I., Zlontonko B.M., Synyuk O.M. Forecasting of the configuration of parts of cast copper products made of polymeric materials. *Herald of Kiev National University of Technology and Design*. 2005. №2. P. 43-48.
6. Synyuk O. M., Skyba M.E. Experimental study of the process of formation of adhesions and the influence of orientation of adhesions on the performance properties of polymeric products. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2005. №4. Ch.1. T.2. P. 245-248.
7. Synyuk O.M., Skyba M.E. Reducing power consumption for frequency pulse drives. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2013. №6. P. 54-57.
8. Skyba M.E., Synyuk O.M. Structural mechanical model of polymer products obtained by injection molding. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2014. №6 (219). P. 27-33
9. Synyuk O.M. Mathematical model of anisotropic properties of polymer materials. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2015. №1 (221). P. 12-19.
10. Skyba M.E, Sinyuk O.M., Mikhailovsky A.Yu. Mathematical modeling of the effect of screw geometry and kinematic parameters of its motion on the movement of granular polymer during the injection molding process. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2015, №5 (229). P. 38-45.
11. Synyuk O.M., Skyba M.E. Method of determining the effective properties of multilayer polymer materials. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2015. №6 (231). P. 54-62.
12. Synyuk O.M. Model of structure of non-deformed polymers of spherulite structure. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2016. №3 (237). P. 181-188.
13. Synyuk O.M., Skyba M.E. Modeling of the change of the supramolecular structure of polymeric materials during orientational extraction. *Herald of Khmelnytskiy National University*. 2016. №6 (243). P. 45-51.

14. Synyuk O.M. Determination of elastic properties of amorphous-crystalline polymers of a spherulite structure. *Herald of Vinnytsia Polytechnic Institute*. 2016. №6. P. 77-86.
15. Synyuk O.M. Modeling of elastic recovery of a jet coming out of a forming head. *Herald of Kherson National Technical University*. 2016. №4 (59). P. 203-212.
16. Synyuk O.M. Method of calculation of effective elastic properties of oriented polymer polymers. *Scientific journal of Chernihiv National Technological University «Technical sciences and technologies»*. 2016. №4. P. 16-25.
17. Synyuk O.M. Influence of friction on volumetric productivity of moving of waste of polymeric material in a screw conveyor. *International scientific journal «Problems of tribology»*. Khmelnytskyi. 2016. №2 (80). P. 89-96.
18. Synyuk O.M. Modeling of the process of filling the polymer melt with molding cavity with reinforcing elements. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2017. №1 (245). P. 251-257.
19. Synyuk O.M., Medvedchuk N.K. Determination of the elastic properties of the polymeric material during impact on it displacement stress. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2017. №.4 (251). P. 73-81.
20. Synyuk O.M., Mikhailovsky A.Yu. Determination of effective elastic properties of oriented polymers in the transverse direction. *Herald of Kiev National University of Technology and Design*. 2017. №6 (116). P. 139-148.
21. Synyuk O.M. Experimental studies of the destruction of polyethylene and polypropylene films. *International scientific journal «Problems of tribology»*. Khmelnytskyi. 2017. №4 (86). P. 51-59.
22. Skyba M.E., Synyuk O.M. Experimental studies of the processing of polymeric waste from light industry. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2017. №6 (255). P. 286–292.
23. Synyuk O., Kulik T., Zlotenko B. Modeling a process of filling the mold during injection molding of polymeric parts. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №5/1 (89). P. 70-77.

24. Synyuk O. M. Determination of rational structural parameters of a device for polymer recycling. *Scientific Journal of the TNTU*. 2017. №1. P. 53-61.

**In foreign specialized editions:**

25. Skyba M., Synyuk O. Improvement of press-forms for polymeric items moulding. *Archives of foundry. Polish Academy of Sciences branch Katowice foundry commission*. Katowice (Poland). 2004. V. 4. № 12. P. 235-248.
26. Synyuk O.M., Kulik T.I. Calculation of the main parameters of the device for the recycling of polymeric waste. *Herald of Vitebsk State Technological University*. 2017. №2 (33). P. 78-87.

**Patents:**

27. Patent 10263, Ukraine, IPC B29 C 45/73. Molding mold for plastics / Synyuk O. M., Kulik T. I., Zlotenko B. M. № u200503001. Appl. 01.04.2005. Publ. 15.11.2005. Bull. №11. 2 p.
28. Patent 63705, Ukraine, IPC H02 P 27/04. A way to reduce electricity consumption for drives / Synyuk O. M., Mikhailovsky Yu.B. № u201004865. Appl. 23.04.2010. Publ. 25.10.2011. Bull. №20. 2 p.

**Materials and conference abstracts:**

29. Synyuk O., Skyba M. Improvement of Footwear Molding Machines for the Production of Advanced Reliability Items. *The XI World Congress in Mechanism and Machine Science* (1-4 April 2004). Tianjin (China): Editor Tian Huang School of Mechanical Engineering, Tianjin University. 2004. V.5. P. 2212-2216.
30. Synyuk O. M. Development of molds for molding of polymer products. Technical and economic assistance for the development of entrepreneurship: *Collection of Works of the 2nd International Polish-Ukrainian Scientific Conference* (October 13-14, 2005). Krakow (Poland): Krakow Polytechnic named after Tadeusha Kosciuszki. 2005. P. 287-296.
31. Synyuk O. M. The use of polymer waste when casting two-layer soles. *Materials of the International Ukrainian-Polish Conference "Techno and Design"* (June 19-

- 21, 2012). Kyiv: Kiev National University of Technology and Design. 2012. P. 263-268.
32. Synyuk O. M. Kravchuk A.Yu. Method of determining the effective properties of multilayer polymer materials. *Materials of the international scientific and technical conference «VI Ukrainian-Polish Scientific Dialogues»* (October 21-24, 2015). Khmelnytskyi-Yaremche 2015. P. 19-21.
33. Synyuk O. M. The problem of the evolution of the contact line of the three phases in the process of polymer motion in the mold. *Collection of scientific works of the international scientific and technical conference of young scientists «Modern technologies in mechanics»* (April 21-23, 2016). Khmelnytskyi: KhNU. 2016. P. 172-174.
34. Synyuk O. M. Mikhailovsky A.Yu. Determination of effective elastic properties of oriented polymers in transverse orientation direction. *Materials of the international scientific and technical conference «VII Ukrainian-Polish Scientific Dialogues»* (October 18-21, 2017). Khmelnytskyi-Medzhybizh. 2017. P. 112-113.
35. Karvan S. A., Goryaschenko S. L., Synyuk O. M. Development of protective uniform uniforms for servicemen. *Abstracts of the V International Scientific and Practical Conference «Problems of coordination of military-technical and defense-industrial policy in Ukraine. Prospects for the Development of Arms and Military Equipment»* (October 11-12, 2017). Kiev. 2017. P. 145-147.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВСТУП.....                                                                                                          | 22  |
| РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ЛЕГКОЇ<br>ПРОМИСЛОВОСТІ. ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ .....                 | 33  |
| 1.1. Класифікація відходів легкої промисловості .....                                                               | 33  |
| 1.2. Основні полімерні матеріали, що використовуються при<br>виробництві товарів легкої промисловості .....         | 37  |
| 1.3. Обладнання для механічної переробки полімерних відходів легкої<br>промисловості.....                           | 40  |
| 1.3.1. Роторний ножовий подрібнювач .....                                                                           | 43  |
| 1.3.2. Дискові валкові пристрої для переробки відходів .....                                                        | 46  |
| 1.3.3. Екструдерні пристрої для переробки відходів.....                                                             | 50  |
| 1.3.4. Голкові дезінтегратори та дисмембратори .....                                                                | 54  |
| 1.3.5. Валкові пристрої для переробки відходів.....                                                                 | 57  |
| 1.4. Виробництво полімерних виробів легкої промисловості з використанням<br>перероблених пластмас .....             | 68  |
| 1.4.1. Застосування перероблених полімерних відходів .....                                                          | 68  |
| 1.4.2. Способи армування полімерних виробів легкої промисловості.....                                               | 71  |
| 1.5. Сучасні структурні моделі полімерних матеріалів .....                                                          | 81  |
| Висновки до розділу 1 .....                                                                                         | 95  |
| РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЬ ЗМІНИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ<br>ПОЛІМЕРУ ПІД ВПЛИВОМ МЕХАНІЧНОГО ТА ТЕПЛОВОГО ПОЛІВ .....   | 98  |
| 2.1. Структурна модель недеформованих полімерів .....                                                               | 98  |
| 2.2. Метод розрахунку фізико-механічних властивостей недеформованих<br>полімерів.....                               | 108 |
| 2.3. Структурна модель орієнтованого полімеру .....                                                                 | 115 |
| 2.4. Метод розрахунку фізико-механічних властивостей полімерів<br>із орієнтованою структурою .....                  | 126 |
| 2.5. Визначення фізико-механічних властивостей орієнтованих полімерів в<br>поперечному до орієнтації напрямку ..... | 131 |
| 2.6. Визначення фізико-механічних властивостей полімеру<br>при впливі напружень зсуву.....                          | 145 |
| 2.6.1. Фізико-механічні властивості полімеру при поперечному зсуві.....                                             | 147 |
| 2.6.2. Фізико-механічні властивості полімеру при поздовжньому зсуві .....                                           | 154 |
| 2.7. Модель зміни фізико-механічних властивостей полімеру під впливом<br>підвищених температур .....                | 159 |

|                                                                                                                                                          |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.8. Експериментальні дослідження впливу деформації попереднього розтягу та температури на фізико-механічні характеристики полімеру .....                | 165        |
| 2.8.1. Експериментальні дослідження впливу деформації попереднього розтягу та температури на в'язкопружний модуль полімеру при поперечному розтягу ..... | 166        |
| 2.8.2. Експериментальні дослідження впливу деформації попереднього розтягу та температури на в'язкопружний модуль полімеру при поперечному зсуві .....   | 177        |
| Висновки до розділу 2 .....                                                                                                                              | 183        |
| <b>РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЬ ЗМІНИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОЛІМЕРУ ПІД ВПЛИВОМ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ОБЛАДНАННЯ.....</b>                                          | <b>185</b> |
| 3.1. Загальні положення.....                                                                                                                             | 185        |
| 3.2. Визначення в'язкопружної деформації полімерного матеріалу .....                                                                                     | 187        |
| 3.3. Модель пластичної деформації полімерного матеріалу.....                                                                                             | 202        |
| 3.4. Експериментальні дослідження впливу режимів роботи обладнання на руйнування полімеру.....                                                           | 217        |
| 3.4.1. Експериментальні дослідження впливу попередньої деформації полімеру на міцність в поперечному напрямку.....                                       | 217        |
| 3.4.2. Експериментальні дослідження впливу швидкості деформації на міцність при розтягу.....                                                             | 223        |
| 3.4.3. Експериментальні дослідження впливу граничної деформації попереднього розтягу на деформацію в поперечному напрямку.....                           | 226        |
| Висновки до розділу 3 .....                                                                                                                              | 231        |
| <b>РОЗДІЛ 4 ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ .....</b>                                                    | <b>233</b> |
| 4.1. Загальні положення.....                                                                                                                             | 233        |
| 4.2. Розрахунок та проектування зубчастого валкового пристрою .....                                                                                      | 236        |
| 4.3. Динамічний розрахунок зубчастого валкового пристрою .....                                                                                           | 251        |
| 4.4. Визначення параметрів перероблювального пристрою із валками профілю Рело .....                                                                      | 263        |
| 4.5. Динамічний розрахунок пристрою із валками профілю Рело.....                                                                                         | 272        |
| 4.6. Проектування обладнання для переробки полімерних відходів.....                                                                                      | 279        |
| 4.6.1. Розрахунок параметрів і проектування пристрою із зубчастими валками.....                                                                          | 280        |
| 4.6.2. Розрахунок параметрів і проектування пристрою із валками профілю Рело .....                                                                       | 283        |
| Висновки до розділу 4 .....                                                                                                                              | 287        |

|                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ<br>ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ.....                                 | 290 |
| 5.1. Загальні положення.....                                                                                                                     | 290 |
| 5.2. Експериментальні дослідження руйнування полімерних відходів<br>на пристрої із зубчастими валками .....                                      | 293 |
| 5.2.1. Опис експериментального пристрою .....                                                                                                    | 293 |
| 5.2.2. Планування експериментальних досліджень .....                                                                                             | 294 |
| 5.2.3. Експериментальні дослідження та обробка результатів експерименту .....                                                                    | 297 |
| 5.2.4. Аналіз результатів експериментальних досліджень .....                                                                                     | 302 |
| 5.3. Експериментальні дослідження руйнування полімерних відходів<br>на пристрої із валками профілю Рело.....                                     | 305 |
| 5.3.1. Опис експериментального пристрою та планування<br>експериментальних досліджень.....                                                       | 305 |
| 5.3.2. Експериментальні дослідження та обробка результатів експерименту .....                                                                    | 308 |
| 5.3.3. Аналіз результатів експериментальних досліджень .....                                                                                     | 313 |
| 5.4. Експериментальні дослідження руйнування полімерних відходів на<br>голкофрезовому пристрої.....                                              | 315 |
| 5.4.1. Загальні положення .....                                                                                                                  | 315 |
| 5.4.2. Опис експериментального пристрою та планування<br>експериментальних досліджень.....                                                       | 316 |
| Висновки до розділу 5 .....                                                                                                                      | 321 |
| РОЗДІЛ 6 ПРОЕКТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЛИТТЯ НИЗУ ВЗУТТЯ<br>ІЗ СУМІШІ ПОЛІМЕРУ І ЧАСТИНОК ПЕРЕРОБЛЕНИХ ВІДХОДІВ.....                               | 323 |
| 6.1. Загальні положення.....                                                                                                                     | 323 |
| 6.2. Математична модель руху розплаву полімеру в порожнині прес-форми.....                                                                       | 324 |
| 6.3. Моделювання заповнення порожнини прес-форми розплавом<br>полімеру із включеннями .....                                                      | 331 |
| 6.4. Розробка конструкції прес-форми та пристрою для подачі частинок<br>перероблених відходів .....                                              | 333 |
| 6.4.1. Розробка прес-форми для лиття підошів із суміші розплаву<br>полімеру та перероблених відходів.....                                        | 333 |
| 6.4.2. Визначення параметрів пристрою та режимів подачі<br>перероблених відходів у впускний канал прес-форми.....                                | 335 |
| 6.5. Експериментальні дослідження впливу концентрації, орієнтації та<br>довжини частинок наповнювача на експлуатаційні властивості підошів ..... | 344 |
| 6.5.1. Планування експериментальних досліджень .....                                                                                             | 344 |
| 6.5.2. Експериментальні випробування та обробка отриманих результатів .....                                                                      | 348 |



|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.5.3. Аналіз результатів експериментальних випробувань .....                                                                                                   | 353 |
| 6.5.4. Експериментальне дослідження впливу довжини частинок<br>перероблених відходів на експлуатаційні властивості підошов .....                                | 356 |
| Висновки до розділу 6 .....                                                                                                                                     | 359 |
| ВИСНОВКИ .....                                                                                                                                                  | 361 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                                                                                                                | 365 |
| ДОДАТОК А. Установа для вимірювання тривалої міцності .....                                                                                                     | 391 |
| ДОДАТОК Б. Статистичний аналіз результатів експериментальних<br>досліджень визначення в'язкопружного модуля полімеру .....                                      | 393 |
| ДОДАТОК В. Установа для вимірювання тривалої міцності .....                                                                                                     | 397 |
| ДОДАТОК Г. Статистичний аналіз результатів експериментальних досліджень<br>визначення в'язкопружного модуля полімеру при зсуві .....                            | 399 |
| ДОДАТОК Д. Установа для вимірювання міцності на розрив .....                                                                                                    | 403 |
| ДОДАТОК Е. Статистичний аналіз результатів експериментальних<br>досліджень визначення міцності зразків .....                                                    | 405 |
| ДОДАТОК Ж. Статистичний аналіз результатів експериментальних<br>досліджень залежності міцності зразків від швидкості деформації .....                           | 408 |
| ДОДАТОК И. Установа для вимірювання міцності на розтяг та зріз .....                                                                                            | 410 |
| ДОДАТОК К. Статистичний аналіз результатів експериментальних досліджень<br>граничної деформації зразків в поперечному<br>до структури напрямку .....            | 412 |
| ДОДАТОК Л. Експериментальна установка із зубчастими валками .....                                                                                               | 414 |
| ДОДАТОК М. Статистичний аналіз результатів експериментальних<br>досліджень переробки відходів на зубчастих валках .....                                         | 415 |
| ДОДАТОК Н. Експериментальна установка із валками профілю Рело .....                                                                                             | 417 |
| ДОДАТОК П. Статистичний аналіз результатів експериментальних<br>досліджень переробки відходів на валках профілю Рело .....                                      | 418 |
| ДОДАТОК Р. Голкофреза для остаточної дезінтеграції полімерних відходів .....                                                                                    | 420 |
| ДОДАТОК С. Статистичний аналіз результатів експериментальних досліджень<br>залежності міцності та витривалості від концентрації<br>та орієнтації включень ..... | 423 |
| ДОДАТОК Т. Результати випробування на розтяг підошви для черевиків .....                                                                                        | 425 |
| ДОДАТОК У. Акти впровадження та розрахунки ефективності .....                                                                                                   | 472 |
| ДОДАТОК Ф. Список опублікованих праць за темою дисертації .....                                                                                                 | 484 |

## ВСТУП

Сьогодні проблема переробки відходів полімерних матеріалів є актуальною не лише з огляду на охорону навколишнього середовища, але й у зв'язку з тим, що в умовах дефіциту полімерної сировини пластмасові відходи стають потужним сировинним і енергетичним ресурсом.

Також, вирішення питань, пов'язаних із охороною навколишнього середовища, вимагає значних капітальних вкладень. Вартість обробки та знищення відходів пластмас приблизно у 8 разів перевищує витрати на обробку більшості промислових і майже у 3 рази – побутових відходів. Це пов'язано зі специфічними особливостями пластмас, які значно ускладнюють або роблять непридатними відомі методи знищення твердих відходів.

Використання відходів полімерів дозволяє істотно економити первинну сировину (передусім нафту) та електроенергію.

Проблем, пов'язаних із утилізацією полімерних відходів, досить багато. Вони мають свою специфіку, але їх не можна вважати нерозв'язними. Ефективна утилізація неможлива без організації збору, сортування та первинної обробки амортизованих матеріалів і виробів; без розробки системи цін на вторинну сировину, що стимулюють підприємства до їх переробки; без створення ефективних способів переробки вторинної полімерної сировини, а також методів її модифікації, спрямованих на підвищення якості сировини; без створення спеціального обладнання для її переробки; без розробки номенклатури виробів, що випускаються із вторинної полімерної сировини.

Сьогодні полімерні відходи можна утилізувати або повторно використовувати при виготовленні нових виробів. Капітальні та експлуатаційні витрати за основними способами переробки полімерних відходів не перевищують, а в низці випадків навіть є нижчими від витрат на їх знищення. Позитивним наслідком переробки є також те, що додатково з'являються корисні продукти для різних галузей промислового виробництва та не забруднюється навколишнє середовище. З цих причин утилізація є не тільки економічно доцільним, а й екологічно найліпшим вирішенням проблеми використання полімерних відходів.

Сучасні технології повторної переробки полімерних відходів легкої промисловості являють собою хімічний рециклінг або механічне подрібнення полімерів.

Проблемам хімічної переробки полімерних відходів присвячено багато наукових праць. Зокрема, досліджено, як за допомогою піролізу полімерних відходів отримувати висококалорійне паливо, полуфабрикати, що використовуються в різних технологічних процесах, а також мономери, які використовуються для синтезу нових полімерів, змащувальних речовин, емульсій та інших матеріалів.

Сучасні розробки технологій хімічного рециклінгу полімерних відходів запропоновані в роботах [1, 2]. Так, науковець Савченко Б.М. досліджував фізико-хімічні перетворення в процесах рециклінгу вторинних конденсаційних полімерів та їх сумішей, на основі чого отримав закономірності, що пов'язують реологічні та фізико-механічні показники вторинних полімерів та їх сумішей з умовами протікання міжмолекулярних реакцій в розплаві. Науковець Мандзюк І.А. запропонував технологію впливу на полімерні відходи спеціальними речовинами, так званими агентами деструкції, з метою отримання сполук із заданими властивостями, які можуть бути використані як адгезиви, а саме – клеї-розплави для кріплення низу взуття до заготовки верху взуття.

Головна перевага хімічної переробки полімерних відходів полягає у тому, що сортування їх досить спрощене; фактично, іноді можна використовувати неочищені полімерні відходи, ступінь забруднення яких виключає можливість механічної переробки; при відновленні мономерів можна очистити їх за допомогою різних домішок.

Однак, наряду з наведеними перевагами, хімічний рециклінг має також недоліки: при хімічній переробці полімерних відходів макромолекулярна структура полімерів руйнується; комплекс операцій та реактивів, необхідних для відновлення придатного до повторної полімеризації мономера вимагає значних фінансових вкладень; мономери і корисні олігомери можуть бути отримані тільки з обмеженого набору полімерів.

Таким чином, прогресивним способом утилізації полімерних відходів є механічна переробка, яка простіша, дешевша і продуктивніша за інші способи переробки. Механічна переробка полімерних відходів не вимагає дорогого спеціального обладнання і може бути реалізована в будь-якому місці накопичення відходів. Головна особливість механічного рециклінгу – переробка без суттєвих змін структури полімеру.

У сучасному науковому обігу є невелика кількість робіт, присвячених механічній переробці полімерних відходів. Так, в роботі [3-5] розглянуто механічну переробку відходів пластмас, результатом якої є отримання гранул, при виготовленні яких вводять різного роду домішки: модифікатори, стабілізатори, пігменти та барвники. Подібна переробка вимагає додаткових витрат.

Перспективні технологічні процеси переробки полімерних відходів передбачають, в основному, переробку полімерів у полі механічних напружень. Екструзійне подрібнення полімерних матеріалів, ґрунтоване на створенні в полімері складно-напруженого стану, досліджував Місяць В.П. [6]. Науковець дослідив і описав процес подрібнення гумових відходів у екструдері та роторній дробарці, визначив параметри, при яких забезпечуються мінімальні енерговитрати.

Науковець Мікульонок І.О. в роботі [7, 8] досліджував обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини, на основі чого запропонував наукові засади для розробки ефективних процесів та обладнання перероблення термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини, що забезпечує заощадження енергетичних і матеріальних ресурсів та зменшує забруднення навколишнього середовища.

Проведений аналіз останніх результатів наукових досліджень в області механічної переробки полімерних відходів показав, що сьогодні майже не існує обладнання для механічної переробки полімерних відходів, в результаті якої перероблені відходи будуть мати орієнтовану структуру, що дозволить без відновлення використовувати їх як армуючі елементи при виробництві виробів легкої промисловості.

Це висуває необхідність розробки методу проектування обладнання для переробки полімерних відходів, що забезпечує руйнування полімерного матеріалу

по границях їх структурних утворень, дозволяючи тим самим максимально зберегти фізико-механічні характеристики первинного полімеру, отримати анізотропію експлуатаційних властивостей в переробленому матеріалі та зменшити витрати енергії на процес руйнування, що є актуальною науково-технічною проблемою сьогодення.

Для вирішення цієї проблеми в дисертації розроблено структурну модель полімеру та модель напружено-деформованого стану полімеру при впливі на нього робочих органів перероблювального обладнання, що пов'язують конструктивні параметри цих робочих органів та технологічні режими процесу руйнування з фізико-механічними характеристиками частинок перероблених відходів.

Дослідження процесу формування виробів методом лиття під тиском із суміші розплаву полімеру і частинок перероблених відходів дозволило пов'язати параметри перероблювального обладнання, конструкцію прес-форми і режими подачі перероблених відходів в порожнину прес-форми з одного боку та експлуатаційні властивості виробів легкої промисловості – з іншого.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконувалася згідно з пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки України «Наукові та науково-технічні розробки за державними цільовими програмами та державними замовленнями»: № ДЗ/52-2004 «Розроблення новітніх технологій та обладнання для розволокнення натуральної шкіри», № ДЗ/103-2006 «Розробка енергозберігаючих технологій та обладнання для утилізації полімерних та волокнистих матеріалів» та № ДЗ/517-2009 «Розроблення новітніх екологічно чистих технологій та обладнання для переробки відходів легкої промисловості з повторним використанням у виробництві».

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розробка наукових основ проектування обладнання для переробки полімерних відходів у вироби легкої промисловості.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язані та виносяться на захист такі завдання:

1. Розвинути наукові підходи до проектування технологічного обладнання для переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості.
2. Розвинути структурну модель полімерного матеріалу, яка дозволить описати формування фізико-механічних характеристик полімеру внаслідок дії на нього робочих органів технологічного обладнання.
3. Розробити модель напружено-деформованого стану полімерного матеріалу при впливі на нього механічного і теплового полів, що генеруються перероблювальним обладнанням.
4. Розробити метод проектування обладнання для перетворення полімерних відходів на частинки із орієнтованою структурою та анізотропними фізико-механічними властивостями.
5. Визначити раціональні конструктивні параметри робочих органів технологічного обладнання та ефективні режими переробки полімерних відходів, при яких створюється гранична деформація, що забезпечує високу орієнтацію структури полімерних відходів та їх руйнування.
6. Експериментально визначити вплив конструктивних параметрів перероблювального обладнання та технологічних режимів його роботи на питому потужність, що витрачається для утворення одиниці вільної поверхні перероблених полімерних відходів.
7. Розробити конструкцію прес-форми та спроектувати пристрій для подачі частинок полімерних відходів у впускний канал прес-форми з метою отримання підшви із суміші розплаву полімеру і частинок перероблених полімерних відходів методом лиття під тиском.
8. Визначити вплив концентрації та орієнтації частинок різної форми і розмірів на експлуатаційні властивості підшов відносно напрямку дії навантажень.

**Об'єкт дослідження** – процес руйнування полімерних відходів робочими органами перероблювального обладнання та процес заповнення прес-форми сумішшю розплаву полімеру і частинок перероблених відходів.

**Предмет дослідження** – технологічне обладнання системи «Переробка-Виготовлення» для перетворення полімерних відходів у вироби легкої промисловості.

**Методи дослідження.** Визначені в дисертаційній роботі проблеми та завдання розв'язувалися із використанням результатів новітніх досліджень: у галузі проектування обладнання для переробки полімерних відходів та виробництва полімерних деталей низу взуття; у галузі фізико-механіки полімерних та композиційних матеріалів; у теорії в'язкопружності; у теорії сіткових числових методів; у математичній статистиці та у кореляційно-регресійному аналізі. Експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик перероблених полімерних відходів проводилися з використанням сучасних електронних та вимірювальних пристроїв. Експериментальні дослідження впливу параметрів розробленого обладнання для переробки полімерних відходів та режимів його роботи на енергоефективність і якість переробки проводилися з використанням сучасних методів аналізу та автоматизованої обробки результатів за допомогою комп'ютерної техніки, математичного пакету Mathcad і середовища розробки Java та Visual C++.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у розробці концепції проектування технологічного обладнання для системи «Переробка-Виготовлення», в основу якої покладено механізм створення граничних деформацій для керованого руйнування полімерних відходів та закономірності, що пов'язують конструктивні параметри обладнання і технологічні режими його роботи з граничними деформаціями; а також закономірності, що пов'язують конструкцію прес-форми і режими її наповнення переробленими відходами з експлуатаційними властивостями виробів легкої промисловості, що отримуються литтям під тиском. Отже, у роботі:

1. Вперше запропоновано технологічне обладнання системи «Переробка-Виготовлення» для руйнування полімерних відходів, яке послідовно створює в них певний напружено-деформований стан, у результаті чого утворюються полімерні частинки з орієнтованою структурою, використання яких при виробництві виробів легкої промисловості дозволяє покращити їх експлуатаційні властивості.

2. Розвинуто структурну модель полімерного матеріалу, яка описує закономірності формування в ньому анізотропії фізико-механічних характеристик під впливом механічного та теплового полів, що створюються перероблювальним обладнанням.

3. Вперше розроблено модель напружено-деформованого стану полімеру при впливі на нього механічного і теплового полів, що генеруються перероблювальним обладнанням, на основі чого запропоновано метод визначення граничних деформацій та напружень, які необхідно створити обладнанням для орієнтації структури та руйнування полімерних відходів.

4. Вперше запропоновано наукові основи проектування обладнання для переробки полімерних відходів, що дозволяють пов'язати конструктивні параметри робочих органів перероблювального обладнання та технологічні режими його роботи з граничними для полімерних відходів деформаціями.

5. Вперше розроблено й експериментально обґрунтовано метод розрахунку енергетичних параметрів перероблювального обладнання, який пов'язує конструктивні параметри робочих органів обладнання та технологічні режими його роботи з потужністю, яка витрачається на переробку полімерних відходів.

6. Вперше експериментально визначено зв'язок між розмірами перероблених полімерних відходів та експлуатаційними властивостями підошов для взуття, що встановлює закономірності між параметрами перероблювального обладнання і прес-форми для лиття під тиском з одного боку та фізико-механічними характеристиками полімерних виробів легкої промисловості з іншого.



**Практичне значення одержаних результатів** полягає у тому, що:

1. Розроблено рекомендації щодо вибору конструкцій перероблювальних пристроїв і режимів їх роботи для перетворення полімерних відходів на частинки з орієнтованою структурою.

2. Розроблено метод проектування обладнання для переробки полімерних відходів, який передбачає визначення раціональних конструктивних параметрів та ефективних технологічних режимів роботи перероблювального обладнання, при яких забезпечується необхідний кінцевий результат переробки та мінімальні енергетичні витрати. Метод проектування технологічного обладнання був переданий для впровадження на Київському взуттєвому підприємстві ТОВ «Таланлегіпром» (акт впровадження від 12 грудня 2017 року). Очікуваний річний економічний ефект становить 203840 грн.

3. Розроблено метод визначення енергетичних параметрів технологічного обладнання для переробки полімерних відходів, за допомогою якого визначено ефективні технологічні режими роботи перероблювальних пристроїв для створення необхідної деформації з метою руйнування полімерних відходів із мінімальними витратами енергії, в результаті чого запропоновано спосіб зменшення витрат електроенергії, який захищений патентом України на корисну модель.

4. Визначено раціональні конструктивні параметри робочих органів перероблювального обладнання для перетворення полімерних відходів на частинки з орієнтованою структурою та необхідною формою і розмірами із мінімальними витратами енергії. Модернізовані пристрої для переробки полімерних відходів були впроваджені у виробництво на підприємстві ПП «Кредо» (м. Хмельницький), що дозволило отримати значний річний економічний ефект у розмірі 136800 грн. (акт впровадження від 23 листопада 2017 року).

5. Визначено раціональну конструкцію прес-форми для лиття підошов напівчеревиків та технологічні режими її заповнення полімерним матеріалом із додаванням частинок перероблених полімерних відходів, що забезпечує

орієнтацію цих частинок вздовж підошви в тих місцях, які найбільш навантажені в процесі її експлуатації, а саме: в пучковій та каблучній зонах. Впровадження модернізованих прес-форм для виготовлення полімерного низу чоловічих та жіночих напівчеревику у виробництво на Хмельницькому підприємстві ТОВ «Взутекс» дозволило зменшити витрати полімерного матеріалу та збільшити стійкість підошов до стирання і розтріскування (акт впровадження від 25 жовтня 2017 року). Очікуваний річний економічний ефект становить 128887 грн. Розроблена конструкція прес-форм захищена патентом України на корисну модель.

6. Виготовлено експериментальну установку для вимірювання енергетичних параметрів перероблювального обладнання та прес-форму для дослідження процесу її заповнення і формування структури підошви, які впроваджені у навчальний процес Хмельницького національного університету і застосовуються під час підготовки студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» у навчальних курсах, пов'язаних з проектуванням обладнання, яке використовується у легкій промисловості: «Основи розрахунку та конструювання типових машин», «Інженерне проектування обладнання галузі».

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота містить лише ті наукові результати, які отримані здобувачем особисто. Здобувач обґрунтував тему і актуальність проведеного дослідження. Автор брав безпосередню участь у експериментальних дослідженнях, у розробці конструкторської документації та упровадженні результатів наукового дослідження. Здобувачеві належать основні ідеї наукового дослідження та узагальнення отриманих результатів.

Формулювання науково-технічної проблеми та розробка змісту дисертаційної роботи виконувалися разом із науковим консультантом.

Наукові праці [9, 12, 14-18, 20-21, 24, 30-31, 33] опубліковані без співавторів. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, використовуються лише результати, отримані особисто здобувачем, а саме: в роботах [1-2, 4] здобувачу належить розробка математичної моделі динаміки неізотермічної течії в'язкої рідини в порожнині прес-форми. В роботах [5-6, 23, 25, 29] здобувачеві

належить розробка методу моделювання заповнення полімерним матеріалом порожнини прес-форми складної конфігурації та розробка методу проектування прес-форм для лиття полімерних виробів легкої промисловості. В роботі [10] – розробка математичної моделі переміщення полімеру в матеріальному циліндрі литтєвого обладнання. В роботі [27] здобувачеві належить розробка моделі формування структури полімерного виробу під час його охолодження в прес-формі. В роботі [7, 28] здобувачем запропонований спосіб зменшення витрат електроенергії для приводу перероблювального обладнання. В роботах [3, 8] здобувачеві належить розробка структурної моделі полімерних виробів в неорієнтованому та орієнтованому стані. В роботах [11, 13, 19, 32, 34] – розробка методу визначення фізико-механічних властивостей полімеру в результаті його деформації, що створюється перероблювальним обладнанням. В роботі [22] здобувачеві належить постановка основних експериментальних завдань, методи та прийоми досліджень. В роботі [26] – розробка методу визначення раціональних конструктивних параметрів перероблювального обладнання та ефективних режимів його роботи, при яких руйнується полімерні відходи. В роботі [35] здобувачеві належить розробка концепції створення захисного полімерного покриття тканин.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 8 наукових конгресах, конференціях та семінарах, у тому числі – 7 міжнародних: на XI Всесвітньому конгресі з механізмів та машинознавства (Тяньцзінь (Китай), 1-4 квітня 2004 року); на II Міжнародній польсько-українській науковій конференції «Технічно-економічне сприяння розвитку підприємництва» (Краків (Польща), Краківська політехніка ім. Тадеуша Костюшки, 13-14 жовтня 2005 року); на Міжнародній українсько-польській конференції “Techno and Design” (Київ, Київський національний університет технологій та дизайну, 19-21 червня 2012 року); на Міжнародній науково-технічній конференції «VI Українсько-польські наукові діалоги» (Яремче, 21-24 жовтня 2015 року); на Міжнародній конференції молодих науковців «Сучасні технології в механіці» (Хмельницький, 21-23 квітня 2016

року); на Міжнародній науково-технічній конференції «VII Українсько-польські наукові діалоги» (Меджибіж, 18-21 жовтня 2017 року); на V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки» (Київ, 11-12 жовтня 2017 року). Окремі наукові результати доповідалися у 2004-2017 рр. на щорічних наукових семінарах кафедри машин та апаратів (з вересня 2017 року – кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем) Хмельницького національного університету; 21.12.2017 року робота доповідалася повністю на міжкафедральному семінарі, що проводився на розширеному засіданні кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету (протокол № 4 від 21 грудня 2017 року).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 35 наукових праць, серед яких 2 колективні монографії; 1 розділ у закордонній колективній монографії; 23 статті у наукових фахових журналах України, з яких 9 статей опубліковано одноосібно; в тому числі 12 у виданнях, що реферуються наукометричними базами даних Scopus, IndexCopernicus тощо, та 2 статті в закордонних наукових виданнях; 2 патенти на корисні моделі; 7 тез доповідей у збірниках міжнародних конференцій.

Робота виконувалася на кафедрі машин та апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків та має 325 сторінок основного тексту, крім цього 18 окремих сторінок з рисунками. Дисертація містить 126 рисунків та 17 таблиць по тексту, список використаних джерел з 270 найменувань та 18 додатків. Загальний обсяг дисертації – 485 сторінок.

## РОЗДІЛ 1

### ПРОБЛЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ. ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1.Класифікація відходів легкої промисловості

У легкій промисловості наряду із проблемами модернізації обладнання для виробництва конкурентоспроможної продукції є проблеми утилізації відходів [9]. Класифікація відходів легкої промисловості представлена на рис. 1.1.

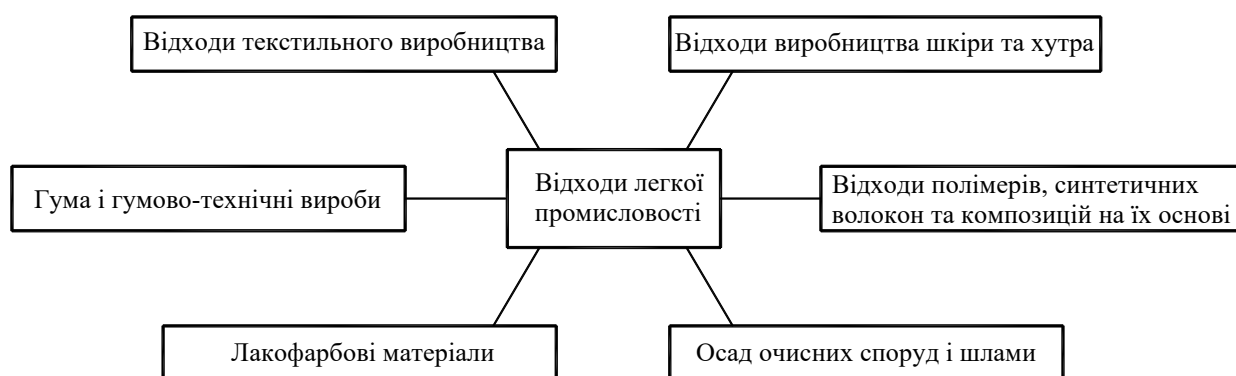


**Рис. 1.1. Класифікація відходів легкої промисловості**

Відходи легкої промисловості становлять досить значну долю всіх твердих відходів. Частка текстилю у твердих побутових відходах складає 4,6-5,4 %. Ще більшу частку складають відходи самої текстильної промисловості та інших промислових виробництв. Вона досягає 25 % всіх відходів, що переробляються у світі. Це величезні резерви, які можна використати для виробництва різних виробів.

У промисловому виробництві текстильних виробів (тканини, трикотаж, килими, неткані полотна, нитки, мотузки, канати тощо) утворюються відходи у вигляді міжлекальних обрізків, клаптів, сплутаних волокон, кінців пряжі тощо. В інших промислових виробництвах текстильні відходи утворюються в результаті використання готових текстильних матеріалів (спецодяг, фільтрувальні,

протиральні і пакувальні тканини тощо). Крім того, існують текстильні відходи побутового споживання, тобто зношені і приведені у непридатність виробу особистого вжитку (одяг, взуття) і домашнього вжитку (килими, драпірування).

На сьогодні текстильна промисловість значною мірою базується на синтетичних матеріалах. Технології утилізації відходів цих матеріалів описані нижче.

Ще одна група відходів при виробництві текстильних виробів, при переробці шкіри та хутра – стічні води, які з'являються при обробці вовни, що містять вовняний жир, залишки вовни, механічні домішки рослинного, органічного і мінерального походження, розчинні органічні і неорганічні сполуки. Велика частина домішок – найсильніші оксиди, стимулятори, що завдають шкоди корисній флорі, знищують її.

У процесі підготовки і переробки шкіри та хутра з'являються відходи, які входять до таких груп [10-14]: відходи до дублення (крайові ділянки шкур, міздря голини та інші обрізки); відходи після дублення (стружка, обрізки, шматки шкур); пиловидні шкіряні відходи; відходи з очисних споруд після дублення (дубильні розчини рослинного, органічного і мінерального походження).

На всіх підприємствах легкої промисловості використовують обладнання, що включає гумотехнічні вироби, які слід утилізувати після закінчення терміну їх експлуатації.

Залежно від кількості введеної при вулканізації сірки гуми можна розділити на м'які (2-8 % S), напівм'які (8-12 %), напівтверді (12-20 %) і тверді (25-30 %).

Відходи гумотехнічних виробів, як і пластмас, утворюються в чотирьох основних сферах: первинне виробництво полімерів; виробництво гумотехнічних виробів; промислове споживання; побутове використання.

Основну масу гумотехнічних виробів використовують в технологічному обладнанні та в автомобільному транспорті підприємств легкої промисловості, інших галузей промислового виробництва. Найважливіші види гумотехнічних виробів – автомобільні покривки, конвеєрні стрічки, приводні ремені, різні

деталі тертя, підлогові та покрівельні покриття, прогумовані тканини, футерувальні і гідроізоляційні матеріали.

Відходи гумотехнічних виробів поділяють на невулканізовані і вулканізовані. Перші можуть бути повернуті в первинне виробництво, другі піддають механічній або хімічній переробці. Вторинна механічна переробка дозволяє отримати ряд цінних виробів і матеріалів: плити, шифер, антивібраційні, гідро- і електроізоляційні прокладки, блоки для окантовки дамб, причалів, хвилерізів, протизсувних огорож. Крім того, з відходів вулканізованих гум можуть бути отримані наповнювачі для нових полімерних виробів легкої промисловості, наприклад, для підшов.

Виробництво пластику в світі подвоюється кожні 5 років, у той час, як період подвоєння виробництва інших матеріалів становить 10, 15 і навіть 20 років. Звідси катастрофічне зростання обсягу твердих відходів у розвинених країнах, який, незважаючи на всі зусилля, не знижується за межі 1% від обсягу виробництва і становить: у США – 6 млн. т., в Японії – 4 млн. т., в Німеччині – 1,5 млн. т., в Англії – 1 млн. т. та в інших країнах – 0,5 млн. т.

У цілому відходи пластмас чітко поділяються на чотири види: відходи виробництва; відходи переробки; відходи промислового споживання; відходи побутового споживання.

Частка кожного виду в загальному обсязі зростає з кожним роком. Основна проблема полягає в тому, що чим глибший ступінь переробки, тим складніші процеси утилізації. Тут правомірно говорити про якість відходів з точки зору їх здатності до утилізації та слід визнати, що відходи пластмас з цієї точки зору найскладніші.

Тому у наш час розвиваються два технологічних напрямки, покликаних вирішити проблему відходів полімерних матеріалів: удосконалення технології виробництва і переробки пластмас, що забезпечує мінімізацію відходів; удосконалення технології переробки відходів полімерних матеріалів.

У технології утилізації відходів полімерних матеріалів є один складний аспект, пов'язаний з операцією, яка передує будь-якому наступному процесу їх

переробки. Йдеться про подрібнення відходів, і складність тут у тому, що полімерні матеріали в більшості своїй є в'язкими, в'язко-пружними та пластичними, м'якими, піноподібними, волокнистими або плівковими матеріалами.

За можливістю переробки полімерних матеріалів їх розташовують у такий ряд: полістирол (ПС); поліетилен (ПЕ); поліетилентерефталат (ПЕТФ); поліпропілен (ПП); поліамід (ПА); полівінілхлорид (ПВХ); поліуретан (ПУ) [9].

В окремих випадках переробку вдається виключити; наприклад, індивідуальні (однорідні) відходи термопластичних полімерів переробляють на типовому обладнанні у виробі менш відповідального призначення. Колективні відходи піддають гідроекструзії (видавлювання через вузькі отвори), при якій спостерігається саморегулювання характеристик в'язкості окремих типів полімерів.

Використовують також двоканальну гідроекструзію, при якій внутрішні шари полімеру є відходами, а тонкий зовнішній шар формується з первинного високоякісного полімерного матеріалу.

Значну частину відходів полімерних пластмас переробляють на піновироби, використовуючи для спінювання суміші карбонатів з лимонною кислотою.

В цілому необхідно враховувати, що механічні характеристики вторинних виробів, як правило, гірші, ніж первинні, але все ж економічний ефект вторинної переробки залишається досить високим через поліпшення екологічних показників середовища, дешевизну сировини, простоту технології та економію енергії. Крім того, завдяки дешевизні вторинних матеріалів, з них можна виготовляти будівельні матеріали, герметичні ємкості та контейнери для захоронення отруйних речовин.

У межах нашої дисертації досліджуємо особливості переробки полімерних відходів, що виникли в процесі виготовлення товарів легкої промисловості, результатом чого є нові вироби взуттєвого, текстильного та швейного виробництва. Розглянемо основні полімерні матеріали, які використовують при виробництві товарів легкої промисловості.



## **1.2. Основні полімерні матеріали, що використовуються при виробництві товарів легкої промисловості**

Вироби легкої промисловості є товарами широкого вжитку. Залежно від призначення до виробів легкої промисловості пред'являють різні вимоги. Наприклад, для жіночої сумки основною вимогою є естетична відповідність смакам споживача, його зовнішньому вигляду, соціальному статусу. До господарських сумок основні вимоги – простота форми, надійність кріплення ручок, гладкість матеріалу і т.п. Спортивні сумки мають, у першу чергу, відповідати вимогам ергономіки, забезпечувати зручність у користуванні, зовнішній вигляд виробу має відповідати спортивному стилю [15].

Споживчі властивості виробу проявляються в процесі його споживання і впливають на вибір конкретної моделі споживачем. Наприклад, споживчі властивості валіз визначаються конструкцією і матеріалами (властивостями і технологією їх переробки). Споживчі властивості всіх виробів легкої промисловості включають у себе такі властивості, як ергономічність, естетичність та витривалість.

Велика частина виробів, що виготовляються на підприємствах легкої промисловості, використовують полімерні матеріали як основний матеріал та як фурнітуру, швейні нитки і різноманітні оздоблювальні елементи.

Полімерний матеріал, що найбільш широко використовується для виготовлення різноманітних видів товарів легкої промисловості (одягу, взуття, сумок, валіз, рукавичок тощо) – це штучні шкіри різноманітних кольорів і фактур поверхонь, а також синтетичні матеріали. Штучні шкіри у виробництві виробів легкої промисловості мають певні переваги в порівнянні з натуральними: дозволяють забезпечити більш низьку масу виробу; здешевити процес його виробництва; урізноманітнити зовнішній вигляд виробів за рахунок фактур, що імітують натуральну шкіру, забезпечити підвищені функціональні характеристики.

Такі фізико-механічні властивості штучних шкір, як міцність, подовження, багато в чому залежать від матеріалу основи. Волокнистою основою для

штучних шкір служать тканини, трикотаж, папір, а також різні неткані матеріали, що застосовуються залежно від призначення виробу. Як текстильні матеріали для основи штучних шкір застосовують поліамід, поліефіри, поліакрилонітрил, скло та інші.

Покриття штучної шкіри формується шляхом просочення волокнистої основи (наскрізне покриття) або шляхом нанесення полімеру на поверхню основи (поверхнєве покриття). Може використовуватися і поєднання цих методів. Основним компонентом штучної шкіри є плівкоутворююча полімерна композиція. У сучасному виробництві як плівкоутворювач застосовують в основному синтетичні високомолекулярні сполуки: полівінілхлорид, поліуретани, синтетичні латекси, гумові суміші на основі різних каучуків тощо [16].

Штучні шкіри з пористим полівінілхлоридним (ПВХ) покриттям являють собою трикотажну, ткану або неткану основу з нанесеним на неї шаром пористого полівінілхлориду товщиною 0,5-0,7 мм або непористого – товщиною 0,10-0,15 мм. Непористе полівінілхлоридне покриття має підвищену липкість і неприємний блиск, що пов'язано з виходом на поверхню плівки найтоншого шару пластифікатора. Для усунення цього недоліку штучну шкіру покривають тонким шаром оздоблювального лаку на основі сумішей полівінілхлоридної і акрилових смол, розчинених в органічних розчинниках, що робить полімерне покриття нелипким, а на дотик – подібним до натуральної шкіри. На сьогодні у виробництві штучних шкір актуальним плівкоутворювачем є поліуретан.

Для виробництва м'яких валіз на колесах зазвичай як основний матеріал використовують поліестер або нейлон. Також використовують пінополіуретан (надійний і пружний матеріал) при виготовленні корпусів валіз в термоформах для отримання ціЛЬНОформованих задньої і бічних стінок.

У виробництві валіз жорстких конструкцій широке застосування має ряд інших полімерних матеріалів, які дозволяють забезпечити захист від деформацій та легкість. Жорсткі пластикові валізи роблять із полікарбонату, поліпропілену і АБС-пластику.

Функціональність виробів легкої промисловості та їх придатність багато в чому визначаються якістю застосовуваної фурнітури [17]. Для виготовлення фурнітури використовують фенопласти, поліетилен, поліаміди, амінопласти, поліефіри, полістирол, поліпропілен та інші пластмаси.

Сьогодні матеріали, використовувані для взуття, – це натуральні шкіри та полімерні матеріали: натуральна, штучна і синтетична шкіри – для деталей верху взуття; гуми, поліуретани (ПУ), полівінілхлориди (ПВХ), термоеластоласти (ТЕП), етиленвінілацетат (ЕВА) – для формованих деталей низу взуття; картони, термопластичні матеріали – для каркасних деталей [18].

Найбільш поширеним методом виготовлення підошов з полімерних матеріалів є лиття під тиском. Для виготовлення поліуретанових підошов використовують метод рідкого формування, для гумових – метод вулканізації.

Взуттєва гума являє собою складне поєднання полімерної основи (каучуку, в основному, синтетичного: бутадієнстирольного СКС-10, СКС-30, СКС-50, СКС-85, бутадієнового СКБ, дівінілового СКД та ізопренового СКІ-3) і різних домішок.

Ливарні ПВХ-пластикати є композиціями полівінілхлоридної смоли ПВХ С-63-М, ПВХ С-64-М, ПВХ С-65, ПВХ С-70-М з пластифікаторами, стабілізаторами та пігментами. Підошви з ПВХ виробляють методом лиття під тиском. За структурою матеріалу вони можуть бути монолітними і пористо-монолітними (мікропористими) і застосовуються головним чином для прогулянкового взуття та взуття спортивного стилю.

Особливе місце серед підошовних матеріалів займають термоеластоласти (ТЕП), які поєднують у собі еластичні властивості каучуку та пластичні властивості термопластів і мають широке застосування у взуттєвій промисловості. Таке поєднання властивостей визначається структурою полімерів. ТЕП є блок-сополімерами, що мають структуру: А-Б-А, де А – термопластичний блок (переважно кристалічна область полімеру), Б – еластичний блок (переважно аморфна область полімеру). Як блок А використовують полістирол, поліпропілен, поліметилметакрилат, полівінілхлорид тощо. Як блок Б – поліізопрен, полібутадієн, поліізобутилен.

Також досить широке застосування при виробництві підошов для домашнього, пляжного та спортивного взуття [17, 19] отримав полімерний матеріал етиленвінілацетат (ЕВА) [19], що є сополімером етилену і вінілацетату.

Для отримання зносостійких підошов, набойок, синтетичної шкіри для верху і підкладки взуття використовують поліуретани. Поліуретани – це ланцюги макромолекул поліуретанових смол, які зв'язані між собою уретановою групою.

У наш час є широкий асортимент полімерних матеріалів для виготовлення виробів легкої промисловості. Призначення виробу визначає полімерний матеріал, з якого він зроблений.

У взуттєвому виробництві найбільш перспективним матеріалом є поліуретан - з огляду на високі показники його фізико-механічних властивостей, що забезпечують відповідність як експлуатаційним, так і технологічним вимогам, що пред'являються до виробів легкої промисловості, а саме до підошов [15, 18]. Незважаючи на безперечні переваги, на вітчизняному ринку широко використовують ТЕП, показники властивостей яких незначно поступаються ПУ, а деякі показники навіть і перевершують.

Таким чином, використання полімерних матеріалів дозволяє забезпечити необхідний комплекс експлуатаційних і технологічних властивостей сучасних виробів легкої промисловості.

### **1.3. Обладнання для механічної переробки полімерних відходів легкої промисловості**

В результаті аналізу факторів, які впливають на якість виробів легкої промисловості, отримуваних із використанням перероблених полімерних відходів, встановлено, що на експлуатаційні характеристики цих виробів суттєво впливають фізико-механічні властивості перероблених полімерних відходів, які залежать від конструктивних параметрів перероблювального обладнання та режимів його роботи. Вивченню процесів переробки відходів легкої промисловості присвячена обмежена кількість досліджень, які в основному

виконано вітчизняними науковцями. Так, вчені Кутьїн В.А., Михайлов А.Н., Піскорський Г.А., Гуменюк О.Б., Скиба М.Є, Михайловський Ю.Б. вирішували проблему розробки процесів та проектування пристроїв для переробки шкіряних та текстильних відходів [20-24].

Основні закономірності процесів переробки шкіри та полімерного матеріалу суттєво відрізняються, тому що реакція полімеру та шкіри на механічне і теплове поле, що створюється перероблювальним обладнанням, є зовсім різною. Однак, деякі підходи щодо проектування обладнання є подібними і можуть бути використані при розробці наукових основ проектування обладнання для переробки полімерних відходів.

В роботах [3-5] вченими Зайнуллінім Х. Н., Арашкевичем Д. А., Белобородовою Т.Г. розглянуто механічну переробку відходів пластмас, результатом якої є отримання гранул, при виготовленні яких вводять різного роду домішки: модифікатори, стабілізатори, пігменти та барвники. Подібна переробка вимагає додаткових витрат.

Перспективні технологічні процеси переробки полімерних відходів передбачають, в основному, переробку полімерів у полі механічних напружень. Екструзійне подрібнення полімерних матеріалів, ґрунтоване на створенні в полімері складно-напруженого стану, досліджував Місяць В.П. [6]. Науковець дослідив і описав процес подрібнення гумових відходів у екструдерах, визначив параметри, при яких забезпечуються мінімальні енерговитрати. Однак, екструдерні перероблювальні пристрої мають низький коефіцієнт корисної дії, тому їх використання, навіть з раціональними конструктивними параметрами і ефективними режимами їхньої роботи, не дозволить суттєво заощадити енергію. Також вченим була отримана модель процесу подрібнення в роторних дробарках, яка дозволяє визначати їх продуктивність і енергетичні показники процесу в залежності від конструктивних та технологічних параметрів цих пристроїв.

В роботах [7, 8] вчений Мікульонком І.О. вирішував важливу на сьогодні науково-технічну проблему розробки та вдосконалення процесів та обладнання комплексного перероблення термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини. Ним було розроблено технологічні лінії для безперервної

переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини та їх основного обладнання: роторних змішувачів, екструдерів та пристроїв для термообробки.

На відміну від розглянутих вище робіт нами пропонується перероблювати вторинні полімерні матеріали з можливістю використовувати їх як армувальні елементи, тобто не розплавляючи їх, що дозволить зберегти в них експлуатаційні властивості первинної сировини.

Тому за основні напрямки дослідження вибрані такі:

1. Розробка методу проектування перероблювального обладнання для переробки полімерних відходів на частинки з орієнтованою структурою, які можна використовувати як армувальні елементи при виробництві виробів легкої промисловості, а саме: деталей низу взуття, валіз та різноманітної фурнітури.

2. Визначення раціональних конструктивних параметрів обладнання та ефективних технологічних режимів руйнування полімерних відходів для отримання частинок з орієнтованою структурою при мінімальних витратах енергії.

3. Розробка конструкції прес-форми та пристрою подачі частинок перероблених відходів для отримання деталей низу взуття із суміші розплаву полімеру і цих частинок.

З метою реалізації зазначених вище напрямків дослідження проведено аналіз конструкцій пристроїв, які використовуються для переробки відходів на підприємствах легкої промисловості та в інших галузях промисловості.

Сьогодні спеціального обладнання для переробки полімерних відходів є не так багато, і не завжди це обладнання відповідає сучасним вимогам. Зазвичай таке обладнання не серійне, а являє собою експериментальні пристрої, створені в конструкторських бюро великих взуттєвих, текстильних та швейних підприємств та в науково-дослідних інститутах. Обладнання, що використовується для механічної переробки полімерних матеріалів, найчастіше запозичене з інших галузей промисловості.

Технологічне обладнання, яке можна використати для переробки відходів, що утворюються в результаті виробничої діяльності на підприємствах легкої

промисловості, поділяється за типом руйнуючого робочого органу на пристрої без руйнуючого тіла та пристрої із незакріпленим і закріпленим руйнуючим тілом. Це пов'язано з тим, що саме робочий орган є головним елементом конструкції перероблювальних пристроїв, від якого залежить вид матеріалу, який можна перероблювати, енергоефективність, продуктивність процесу переробки та кінцевий результат – форма, розміри та фізико-механічні властивості переробленого матеріалу.

Обладнання із закріпленими робочими органами є найбільш ефективним для переробки полімерних відходів. Це пояснюється тим, що передача енергії йде безпосередньо на робочий орган, який в свою чергу, взаємодіючи з матеріалом, руйнує його. Ефективність роботи такого обладнання характеризується потужністю приводу, формою та розмірами робочих органів, тому при проектуванні обладнання із закріпленими робочими органами слід враховувати фізико-механічні властивості полімерного матеріалу, геометрію робочих органів та динаміку їх взаємодії з матеріалом. До такого обладнання можна віднести: дробарки, роли, конічні і дискові млини, шнекові та валкові пристрої.

### **1.3.1. Роторний ножовий подрібнювач**

Переваги різання розширили область застосування ріжучих пристроїв. В залежності від умов навантаження розділяють різання з контрноюжем (зосереджене) та без контрноюжа (незосереджене).

Незосереджене різання застосовують для розділу на частини великогабаритних матеріалів. Пристрій може бути виконаний у вигляді обертового багатолезового ножа [25-27] або ніж закріплений нерухомо, а обертається матеріал, що подрібнюється.

Зосереджене різання застосовується в роторних ножових подрібнювачах (рис. 1.2) [28, 29], в яких ножі розташовані як в роторі, так в статорі.

Такий пристрій складається з ротору 1, ножа ротора – 2, корпусу – 3, решітки – 4, ножів статора – 5. Процес подрібнення матеріалу починається з його

завантаження в бункер, звідки він потрапляє на ротор 1 і на його ножі 2. Матеріал подрібнюється при взаємодії з ножами ротора 2 і нерухомо закріпленими ножами 5 статора. Після цього матеріал просіюється через решітку 4 і потрапляє до бункеру готового продукту (не показано).

Ножовий роторний подрібнювач використовується для подрібнення еластичних матеріалів, пластично-в'язких матеріалів [30], полівінілхлоридних матеріалів, волокнистих матеріалів, заморожених матеріалів [31].

Даний тип подрібнювача може знайти своє застосування в хімічній промисловості, целюлозно-паперовій, харчовій, будівній і легкій промисловості.

Після переробки волокнистих матеріалів отримані відходи можна використовувати для створення нових видів короткочасного й одноразового користування, різноманітних гідро-, звуко- і теплоізоляційних матеріалів, геотекстильних матеріалів для житлового і дорожнього будівництва, прокладок, технічної вати і т. ін.

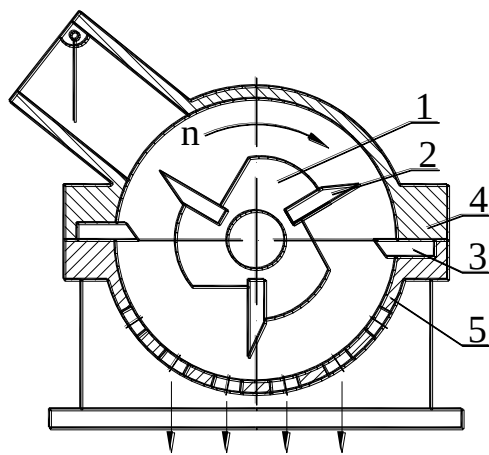


**Рис. 1.2. Роторний ножовий подрібнювач: 1 – ротор; 2 – ніж ротора; 3 – корпус; 4 – решітка; 5 – ножі статора**

Як вже було вище згадано, одним з найбільш розповсюджених методів подрібнення є різання. При механічному подрібненні відходів більша частина енергії витрачається на пружне деформування [32]. Таким чином, з точки зору економії енергії, подрібнення слід проводити в умовах, при яких відбуватиметься мінімальне деформування матеріалу.

Так при руйнуванні відходів легкої промисловості різанням частина матеріалу, що знаходиться в складно-напруженому стані, порівняно невелика та зосереджена поблизу ріжучої кромки ножа [33]. Внаслідок чого робота руйнування при різанні значно менша [32]



Процес подрібнення в подрібнювачах даного типу в більшості випадків досить простий. Це пов'язано з тим, що в процесі роботи обладнання не потребує ніякої додаткової наладки і регулювання. Наладка і регулювання відбувається тільки при зміні типу подрібнюваного матеріалу. В деяких варіантах подрібнювачів наявні валки для попереднього стискання матеріалу з метою поліпшення якості подрібнення. Сітка, яка встановлена в нижній частині бункера, контролює проходження частинок заданої дисперсності. Не подрібнені частинки знову захоплюються ножами і подрібнюються додатково. Необхідності розділення різних матеріалів на групи нема. Ступінь дисперсності, якої можливо досягнути при даному способі подрібнення від 0,5 мм до 10 мм.

Обладнання є досить простим в обслуговуванні. При роботі обладнання відбувається знос ножів і контрножів, їх заміна не складає проблем.

Доцільно при проектуванні конструкцій даних подрібнювачів встановлювати ножі під кутом до осі обертання ротора, що призводить до покращення процесу різання (кінематичний кут). Кут нахилу ножів веде до виникнення в процесі роботи кінематичного кута різання, що, в свою чергу, дозволяє зменшити силу різання.

Процес подрібнення в таких пристроях, перш за все, заснований на зосередженому руйнуванні матеріалу. При такому подрібненні енерговитрати мінімальні, так як зона деформацій мінімальна і, відповідно, втрати енергії на деформацію непотрібних нам шарів матеріалу відсутні.

Такі подрібнювачі мають прості та надійні конструкції. Вони також легкі в обслуговуванні, що є досить вагомим фактором при купівлі обладнання. В них передбачена можливість регулювання дисперсності подрібненого матеріалу шляхом заміни просіювальної сітки з різними діаметрами отворів, а також можливість збільшення швидкості обертання ротора.

Крім переваг даний вид обладнання має свої недоліки: в процесі роботи відбувається зношування робочих органів під дією сил тертя і удару. Недовговічність роботи ножів пов'язана також з тим, що кожен ніж має одну ріжучу кромку і вимагає індивідуальної установки в корпусі; недоліком також є

те, що конструкція даного типу подрібнювачів не дозволяє активно впливати на ступінь подрібнення матеріалу; при подрібненні пластично-в'язких матеріалів в результаті підвищених температур в робочій зоні відбувається процес налипання матеріалу на робочі органи, а також його грудкування, що різко знижує ефективність процесу подрібнення; роторний ножовий подрібнювач (роторна дробарка) не дозволяє перероблювати полімерні відходи на частинки з орієнтованою структурою, тому їх не можна буде використовувати як наповнювач при виробництві полімерних виробів легкої промисловості.

Загалом даний тип обладнання є досить розповсюдженим. Завдяки невеликим витратам енергії, що пов'язано з самим процесом подрібнення, обладнання є економічно вигідним. Таке обладнання вже використовується у вищезгаданих галузях промисловості. Результати опробування досить непогані. Подрібнювачі даного типу добре зарекомендували себе при переробці відходів легкої промисловості.

### **1.3.2. Дискові валкові пристрої для переробки відходів**

Для попереднього подрібнення широке застосування отримали валкові машини з набором дисків, які мають ріжучі кромки різних конфігурацій (рис. 1.3) [34, 35].

Також додатково на поверхні дисків можуть бути встановлені ріжучі елементи, які дозволяють підвищити ефективність подрібнення матеріалу за рахунок додатково розміщених ріжучих елементів, що дозволяють отримувати більш рівномірну дисперсність матеріалу, виключаючи процес повторного подрібнення.

Оскільки глибина западин дискового ножа 2 дорівнює половині його загальної висоти, куски матеріалу отримуються однакового розміру [36].

Конструкція дискового подрібнювача включає в себе стійки 1, диски 2, кришку із бункером для завантаження 3, зубчасту передачу 4 і станину 5. Диски встановлені на валах, які, в свою чергу, закріплені в підшипникових опорах. Кут

заточки ріжучих кромek ріжучих елементів одних дисків протилежний куту заточки ріжучих кромek ріжучих елементів інших дисків.

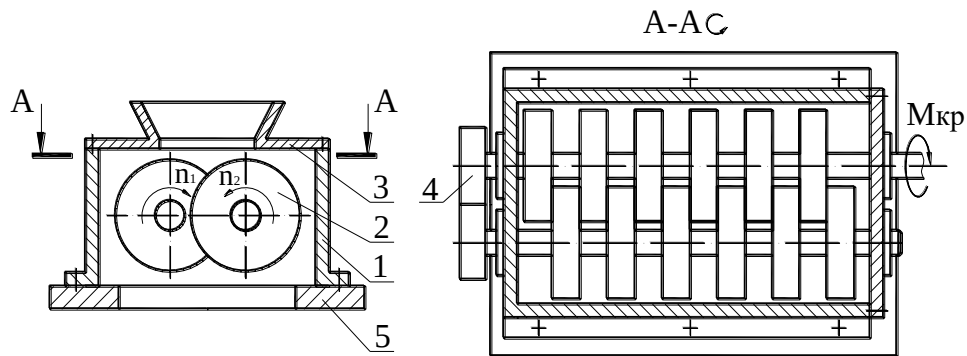


**Рис. 1.3. Дисківий подрібнювач: 1 – стійки; 2 – диски; 3 – кришка з бункером для завантаження; 4 – зубчаста передача; 5 – станина**

Подрібнення матеріалу здійснюється ріжучими елементами, які захоплюють матеріал і руйнують його зустрічними рухами. Матеріал потрапляє в зону подрібнення через завантажувальний бункер після приведення пристрою в робочий режим, тобто валки повинні обертатися.

Ножовий дисківий подрібнювач використовується для подрібнення полімерів, деревини тощо. Дисперсність, яку можна досягнути при даному виді подрібнення, становить від 2 мм до 30 мм. Вона залежить від розмірів і конфігурації ріжучих елементів.

Дисківі ножові подрібнювачі, як і більшість обладнання даного типу, є досить простими в обслуговуванні. Єдина складність полягає в тому, що перед початком роботи необхідно провести установку ріжучих елементів на дисках таким чином, щоб утворююча ріжучих елементів відповідала подрібнюваному матеріалу. Це робиться з метою отримання кращої якості подрібнення і збільшення продуктивності.

Переваги даної групи подрібнювачів полягають в наступному: обладнання досить просте у використанні і обслуговуванні; використання обладнання дозволяє переробляти широкий діапазон промислових відходів; на обладнанні такого типу реалізується процес зосередженого різання, який є найбільш економічним з точки зору енерговитрат; використання додатково розміщених на

поверхні дисків ріжучих елементів дозволяє отримувати вихідний матеріал рівномірної дисперсності.

Поряд із перевагами дискові подрібнювачі мають такі недоліки: в процесі використання обладнання має місце велика ступінь зношування ріжучих органів, через що знижується якість, продуктивність і зростають витрати енергії; при переробці пластично-в'язких матеріалів в результаті підвищення температури полімер починає текти і налипати на робочий орган, що суттєво знижує ефективність процесу переробки; пристрої цієї групи де дають можливості керовано руйнувати полімерні відходи, що унеможлиблює отримання орієнтованої структури в переробленому матеріалі.

Широке застосування отримали валкові машини з набором дисків, які мають ріжучі кромки різноманітних конструкцій [37-46].

Дискові валкові пристрої використовують для подрібнення полімерних матеріалів, гумо-тканевих відходів, поліетиленових плівок та текстильних відходів. Вони знайшли застосування в хімічній, гумотехнічній, шинній та в текстильній промисловості.

Подрібнені відходи використовуються як наповнювачі у різних полімерних композиціях, для одержання гумових виробів, у виробництві термопластів. Відходи текстильної промисловості використовують для створення нових видів виробів, наприклад, технічної вати, різних прокладок.

Дискові валкові пристрої для переробки відходів за способом їх переробки можна розділити на дві групи: дискові ріжучі та дискові розривні пристрої. Зазначимо, що останні пристрої, з огляду на будову полімеру для переробки полімерних відходів, використовувати недоцільно, оскільки подрібнені шматки будуть різного розміру і форми, що не є прийнятним, а витрати енергії будуть значними.

Дискові ріжучі пристрої для переробки відходів можна використовувати для подрібнення полімерних матеріалів, гумо-тканевих відходів, поліетиленових плівок, паперу і побутових відходів [37, 43-46].

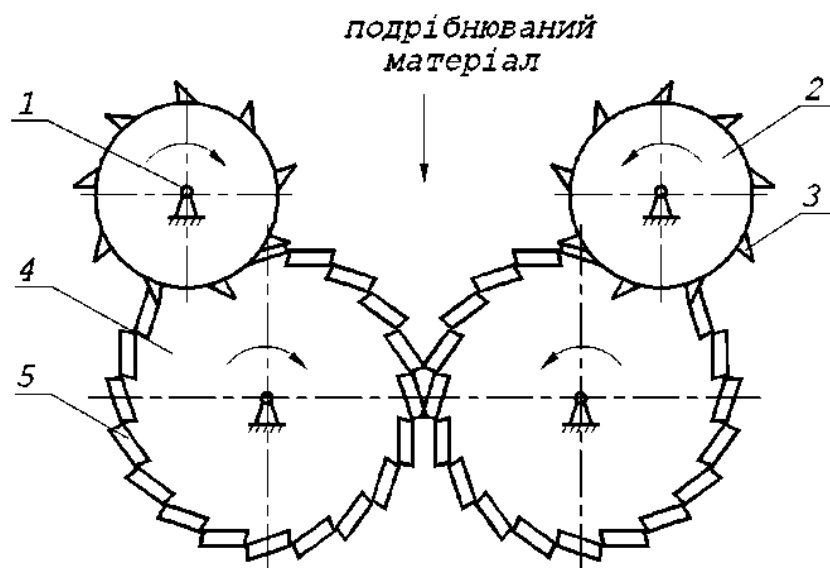


Рис. 1.4. Дискові ріжучі валки: 1 – вали; 2 – дискові ножі;  
3 – ріжучі елементи; 4 – зубчасті диски; 5 – зубці

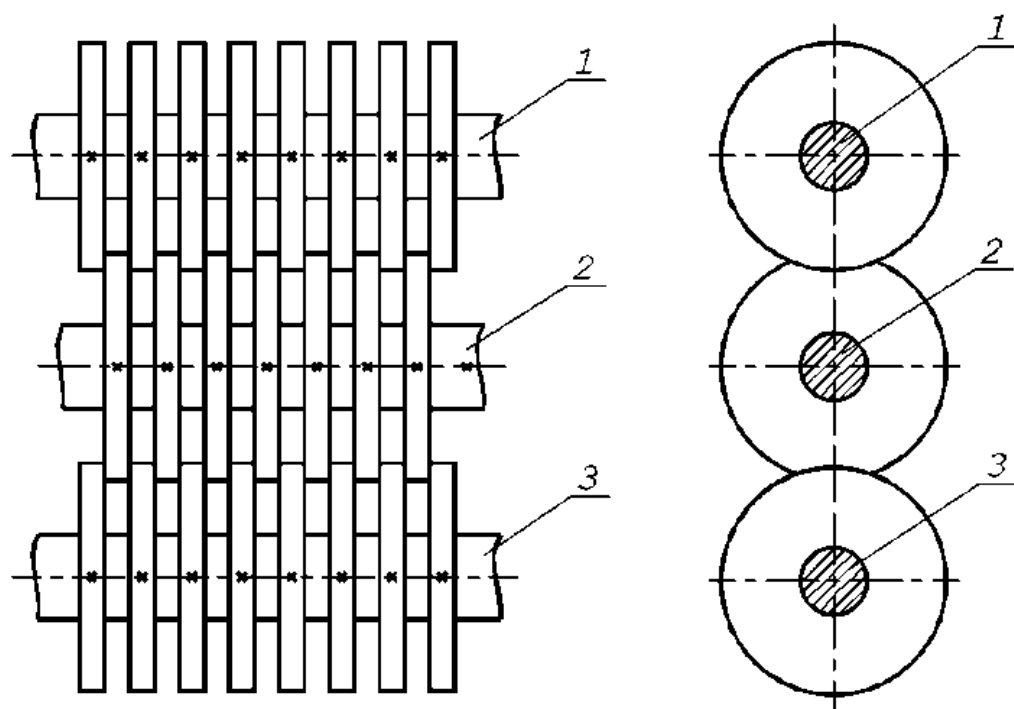


Рис. 1.5. Валки з дисками: 1, 2, 3 – ножові приводні валки

Переробні пристрої з ріжучими дисками знайшли застосування в хімічній і гумотехнічній промисловості. Подрібнені відходи використовують як домішки до сумішей для одержання гумових виробів, як наповнювачі у різних полімерних композиціях. Конструкцію цього пристрою представлено на рис. 1.4. У процесі роботи диски відрізають невеликі шматки, поступово подрібнюючи таким чином весь матеріал (наприклад, автопокришку) [37].

В пристроях, які складаються з набору різних ріжучих дисків, перед процесом подрібнення потрібно провести попереднє розділення різних матеріалів на групи (наприклад, відділити гуму від металу).

У пристрої для подрібнення резинових відходів великих габаритів, а також для різки відходів шинного виробництва використовують пристрій [39], який складається з багатоножової валкової машини для різки, виконаної трьома встановленими в корпусі ножовими приводними валками так, що валки 1 і 2 ріжуть матеріал на смужки, а валки 2 і 3 – ріжуть на куски (рис. 1.5).

Ступінь дисперсності, який досягається при такому способі подрібнення, залежить від розміру дисків і відстані між ними.

Дискові ріжучі пристрої є складними за конструкцією, з низькою якістю подрібнення. Ще одним недоліком цього типу перероблювального обладнання є те, що на ньому можна отримати подрібнені матеріали лише крупної фракції. Тому такий тип перероблювального обладнання можна використовувати для попереднього подрібнення відходів.

Через те, що дискові валкові пристрої для переробки відходів у процесі подрібнення полімерів зрізають невеликі шматки матеріалу, руйнуючи тим самим кристалічну область полімеру, що потребує значних витрат енергії, використання цих пристроїв для переробки полімерних відходів є неефективним.

### **1.3.3. Екструдерні пристрої для переробки відходів**

При переробці відходів останнім часом широке застосування отримали екструдерні подрібнювачі [47-57]. Ці пристрої використовують здебільшого для

подрібнення полімерних матеріалів, зокрема для подрібнення гуми у високопластичному стані, але їх також можна використовувати для подрібнення текстильних відходів. Екструдерні пристрої за конструкцією установки та видом подрібнюваного матеріалу можна розділити на такі групи: екструдерні подрібнювачі перетирання, шнек з зубцями, шнек з ріжучими елементами [55-57].

Ступінь дисперсності, який досягається при екструдерному способі переробки, становить приблизно від 2 до 10 мм.

Цей процес переробки ще не досить досліджено. Хоча вже є експериментальні розрахунки, аналогічні моделі, що належать до згаданого типу перероблювальних пристроїв. Варто звернути увагу на технологічний процес переробки відходів у екструдерних установках. По-перше, перед переробкою відходів у цих пристроях спочатку потрібно провести попереднє відділення різних матеріалів один від одного, тобто, полімерів від текстилю, гуми від металу. По-друге, відходи потрібно попередньо подрібнити.

У порівнянні з валковими подрібнювачами, екструдерні пристрої є набагато складнішими як в обслуговуванні, так і в будові конструкції самих установок.

Основними недоліками екструдерних пристроїв є: інтенсивне налипання подрібненого матеріалу на робочі органи пристроїв, що значно ускладнює процес подальшої роботи установок; неможливість переробки твердих полімерів; значні енергетичні витрати на процес переробки.

#### *Екструдерні пристрої перетирання*

Екструдерні пристрої перетирання використовують для переробки і розділення за розміром матеріалів малої твердості, наприклад резини; для виробництва регенерату. Такі пристрої знайшли застосування в шинній і регенератній промисловості [46-51]. Подрібнений матеріал використовують як наповнювач у різних композитах для виготовлення виробів з гуми.

Екструдерний подрібнювач складається з корпусу 1, в якому розміщений шнек 2 з шнековою головою 3 (рис. 1.6). Подрібнювані матеріали подаються через завантажувальний бункер 4 у пристрій. Робочий орган шнек 2 слугує для транспортування подрібнюваного матеріалу, а точніше – для переміщення

відходів вздовж корпусу 1. Між корпусом 1 і шнековою головкою 3 за рахунок сил стиснення відбувається перетирання і руйнування частинок матеріалу.

Ці пристрої використовують здебільшого для подрібнення гуми у високопластичному стані, який можна охарактеризувати як пружно-деформаційний. Суть цього способу переробки відходів полягає у використанні поля механічних сил, при якому матеріал підлягає стисненню зі зсувом. При взаємодії шнекової головки з корпусом пристрою відбувається перетирання, деструкція матеріалу і його перегрів за рахунок сил тертя.

Перевагою екструдерного пристрою перетирання є те, що пристрій використовують лише для подрібнення гумових відходів у високопластичному стані, хоча з іншої сторони це також можна віднести і до недоліків. Крім того, недоліком пристроїв перетирання є велика металоємність та енергоємність обладнання; невизначений температурний режим, нагрів матеріалу, налипання подрібненого матеріалу на робочий орган, що уповільнює процес переробки.

#### *Шнек із зубцями*

Наступна група екструдерних пристроїв - пристрої, в яких робочим органом є шнек із зубцями. Ці пристрої використовують для масляних та пружних матеріалів, наприклад для гуми.

Екструдерні пристрої, в яких шнек виконано із зубцями, знайшли застосування в масложировій, виноробній, консервній галузях харчової промисловості, в хімічній, будівельній і гідролізно-целюлозній промисловості, а також у сільському господарстві [52-53].

Подрібнені відходи використовують як наповнювач у полімерних композиціях, для одержання гумових виробів, плівки, а також для одержання олії, соку та інших продуктів харчування.

Екструдерні пристрої зі шнеком, на якому нарізані зубці, складаються з корпусу 1, в якому вмонтовано шнек 2 із зубцями 3 різної форми і розмірів (рис. 1.7). Подрібнюваний матеріал завантажується у завантажувальний бункер і подрібнюється за рахунок сил тертя і стиснення, що виникають між корпусом 1 та шнеком 2.



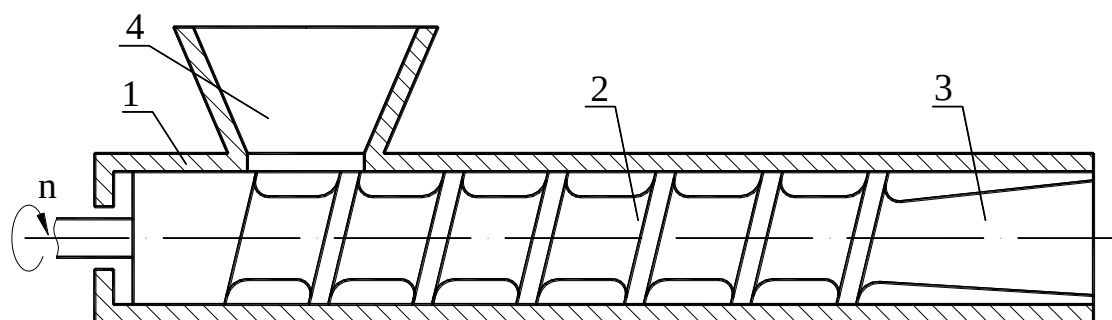


**Рис. 1.6. Екструдерний пристрій для переробки відходів: 1 – корпус; 2 – шнек; 3 – шнекова головка; 4 – бункер**

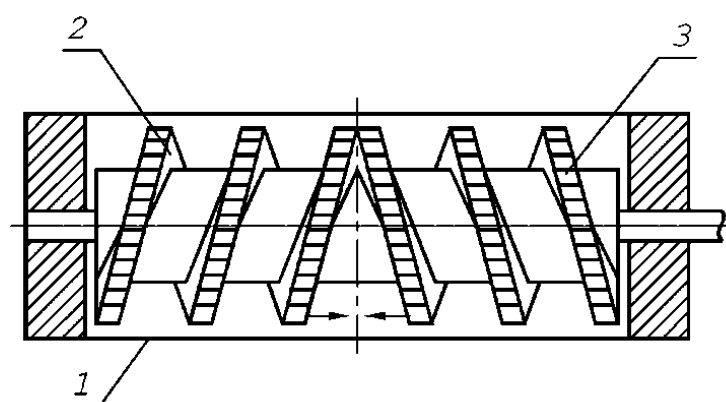


**Рис. 1.7. Екструдерний пристрій зі шнеком, на якому нарізані зубці**

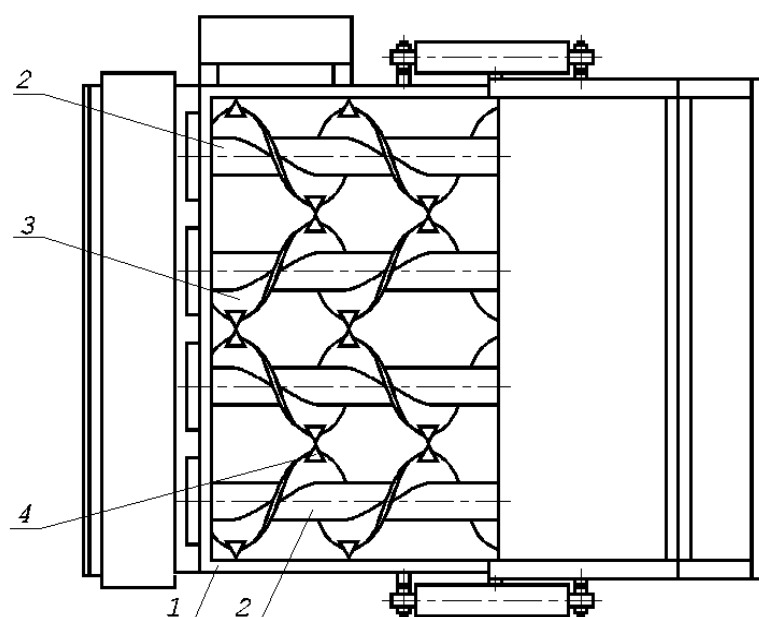


**Рис. 1.8. Перероблювальний шнековий пристрій із ріжучими елементами: 1 – корпус; 2 – шнек; 3 – гвинтові навивки; 4 – зубці**

У пристроях цього типу подрібнена маса налипає на поверхню шнека між западинами зубців і потім повільно обертається разом зі шнеком, що знижує якість подрібненого матеріалу, продуктивність процесу переробки та збільшує енергоємність пристрою.

#### *Шнек із ріжучими елементами*

Пристрої, у яких робочим органом є шнек із ріжучими елементами, використовують для переробки як твердих, так і текстильних матеріалів.

Екструдерні пристрої типу шнек з ріжучими елементами застосовують у будівельній, текстильній та гірничорудній промисловості [58].

Подрібнені матеріали використовуються у різних полімерних композиціях як домішки при виготовленні полімерних виробів. Подрібнені текстильні відходи йдуть на створення технічної вати, різних прокладок та інших виробів одноразового й короткочасного користування.

Розглянемо конструкцію будови цього перероблювального пристрою. Пристрій складається з корпусу 1, шнеків, які обертаються назустріч один одному [58]. На гвинтових навивках шнека закріплені подрібнювальні елементи типу зубців (рис. 1.8).

Шнекові перероблювальні пристрої цього типу використовують для подрібнення і роздирання текстильних відходів за умови, що не тільки на шнекові будуть розташовані зубці, а й поверхня зони переробки також буде виконана зубчастою.

Такий пристрій можна використовувати для попереднього подрібнення полімерних або інших кусків великого розміру.

### **1.3.4. Голкові дезінтегратори та дисмембратори**

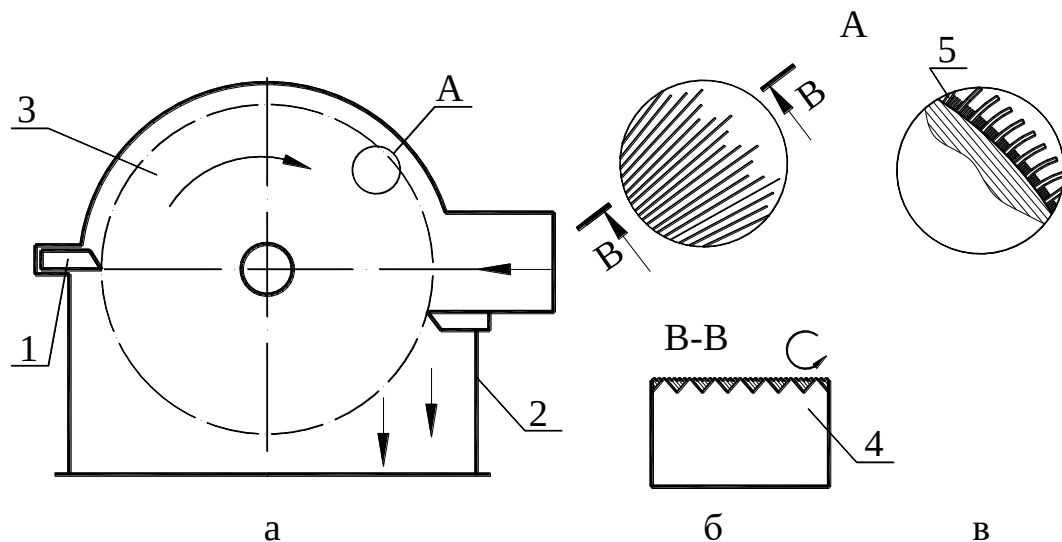
Переробка відходів легкої промисловості в дезінтеграторах здійснюється за рахунок удару. До обладнання цього типу можна віднести пристрій, який має в собі ротор 3 і статор (рис. 1.9). Статор виконаний у вигляді корпусу, в якому розташовані контрножі і зроблено завантажувально-розвантажувальні отвори. В

свою чергу ротор виконаний у вигляді циліндричної металевої щітки – голкофрези [59] або у вигляді набору пластин, паралельних до вісі, які мають різну величину (рис. 1.9 в) [60, 61].

Такі перероблювальні пристрої можуть бути використані для подрібнення зношених автомобільних покришок, еластичних матеріалів, у тому числі брикетів синтетичного каучуку, штучної та натуральної шкіри.

Цей тип подрібнювача можна використовувати в хімічній, паперовій промисловості для отримання порошків, у виробництві пластмас, наприклад, полістіролу, де від ступеня подрібнення каучуку залежить час розчинення його в стіролі, у виробництві полімерних будівельних матеріалів, де при створенні композицій потрібно подрібнювати каучук.

При подрібненні композиційних матеріалів голкофрезою з'являється можливість розділяти різноманітні матеріали, як-от відокремлювати монолітний матеріал від волокнистого. Водночас моноліт подрібнюється на порошок, а з волокнистого матеріалу отримують волокна; таким чином зберігаються основні властивості самих матеріалів, що є досить значною перевагою.



1 – ножі статора; 2 – корпус; 3 – ротор; 4 – пластини дисмембратора;  
5 – голки голкофрези

**Рис. 1.9. Голкофрезний пристрій для переробки відходів:**  
а) дезінтегратор; б) пластинчатий ротор; в) голчатий ротор.

Отриманий після переробки матеріал можна використовувати як наповнювач для гумових сумішей і при виробництві полімерних виробів легкої промисловості. Використання цього наповнювача дозволить зменшити стирання виробів без зниження їхньої еластичності. Також цей перероблений матеріал можна застосовувати як наповнювач при переробці фенолформальдегідних смол.

У суміші з латексом чи з ПВХ цей подрібнений матеріал можна пресувати у тонкі плівки, на які можна наносити малюнок тисненням.

При переробці ворсистих матеріалів отриманий матеріал використовують для виготовлення доріжок, шнурків, та як наповнювач для будівельних виробів.

Переробка відходів може здійснюватися у голкофрезовому пристрої в різних режимах. Змінюючи кількість обертів і величину подачі матеріалу, можна регулювати дисперсність продукту, який перероблюється, в досить широких межах.

Також для зменшення витрат енергії на руйнування матеріалу перед подрібненням його пружно деформують, при цьому в матеріалі виникають значні внутрішні напруження, що дозволяє підвищити продуктивність руйнування за рахунок того, що попередньо напружені тіла вимагають значно меншої енергії для їх руйнування.

Найбільш подібним до процесу переробки в дезінтеграторах та дисмембраторах є процеси чухання [62-64] і чесання [65-68], які використовуються на чухрально-чесальному обладнанні для попередньої обробки волокнистої маси в легкій промисловості.

Так, у роботі [68] описано методику визначення продуктивності тріпальної машини в залежності від швидкості валків і лінійної густини полотна. В роботі [65] використовується методика для визначення величини насиченості гарнітурного барабана при кордочесанні, в основу якої покладено основний закон динаміки. В роботі [69] зроблено спробу визначити сумарну силу тиску матеріалу на кромку тріпального біла. На сьогодні лишається маловивченим процес подрібнення моноліту.

Ступінь дисперсності, якого можна досягти при переробці відходів на такому обладнанні, складає 0,1-2 мм для монолітних матеріалів, від 1 до 45 мм для волокнистих матеріалів.

Незважаючи на маловивченість і маловикористовуваність згаданого вище обладнання, воно має свої переваги: можливість переробки в різних режимах, а також можливість регулювання дисперсності вихідного продукту за рахунок зміни кількості обертів і величини подачі продукту; зберігаються основні властивості матеріалів; після подрібнення моноліту отримуємо порошок, після подрібнення волокнистих матеріалів – волокна.

Однак є й такі недоліки: робота таких подрібнювачів розрахована на подрібнення лише на мілкі фракції; продуктивність процесу подрібнення невисока.

Проведений аналіз показує, що переробка відходів легкої промисловості в голкофрезових пристроях є досить ефективною з точки зору вимог до продукту подрібнення. На такому обладнанні можна здійснювати процес переробки матеріалів широкого діапазону з різними властивостями і структурою, зберігаючи при цьому основні властивості кожного з них.

### **1.3.5. Валкові пристрої для переробки відходів**

Валкові пристрої призначені для змішування, дроблення, пластифікації в процесі переробки полімерів і композицій на їхній основі [70].

Матеріал подається на валки у вигляді гранул, порошкоподібних або волокнистих мас, окремих шматків. При обертанні валків, які рухаються у протилежних напрямках, а точніше назустріч один одному, внаслідок тертя матеріал, який завантажується, затягується в зазор між валками і перероблюється. Спочатку матеріал піддається силам стиснення, в результаті чого відбувається пластична деформація матеріалу або його руйнування.

Валкові пристрої за конструкцією можуть мати від одного до декількох валків, які обертаються як в одному, так і в протилежних напрямках. В залежності від міцності матеріалу і ступеня його подрібнення, поверхні валків

можуть бути гладкими, рифленими, зубчастими, дисковими, конусними тощо. Також з метою покращення процесу переробки валки можуть мати різноманітну форму. Вони можуть бути виконані у вигляді розташованих один відносно одного усічених конусів, а також у вигляді частин тора [71].

Перероблювальні пристрої валкового типу можуть бути виконані в двох варіантах: з постійним (рис. 1.10 а) і змінним (рис. 1.10 б) міжосьовим зазором. Можливість зміни міжвісьового зазору забезпечується за рахунок виконання одного з валків підпружиненням.

За технічними ознаками валки для переробки полімерних відходів можна умовно поділити на змішувальні, пластифікувальні, фарботерні та подрібнювальні [70].

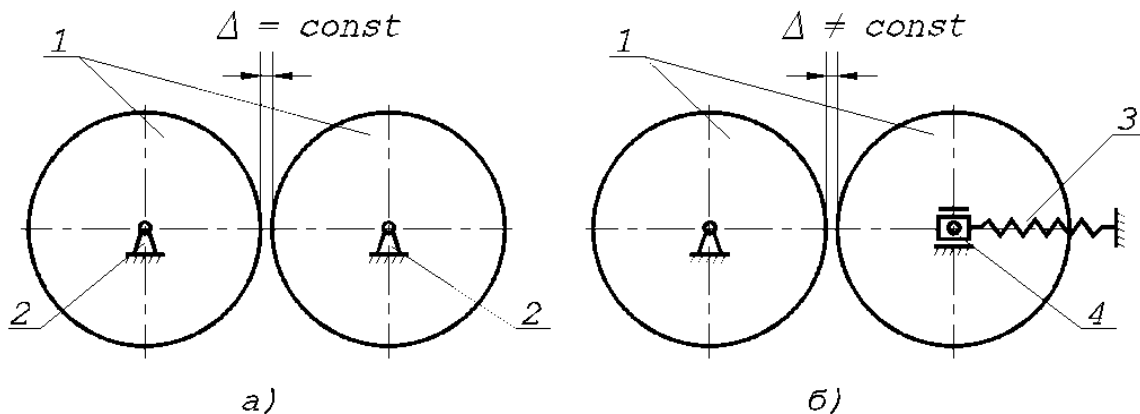


**Рис. 1.10. Валкові пристрої для переробки відходів з постійним (а) та змінним (б) міжвісьовим зазором: 1 – валки; 2 – нерухома опора; 3 – пружний елемент; 4 – повзун**

Вихідним матеріалом при такому способі переробки в основному є порошок, а у випадку монолітних полімерних матеріалів – невеликі шматки.

В обслуговуванні пристрої валкового типу є досить простими. Хоча вони також мають свої переваги та недоліки. До переваг цієї групи подрібнювачів відносять простоту та надійність роботи конструкції, можливість регулювання зазору між валками, що дозволяє регулювати величину дисперсності подрібнювального матеріалу.

Недоліком валкових подрібнювачів є відносно швидке зношення робочих поверхонь органів, великі енерговитрати на одиницю об'єму подрібнюваного матеріалу.

Продуктивність валкових подрібнювачів коливається в межах від 10 до 400 м<sup>3</sup>/г залежно від конструкції валків обладнання та матеріалу, що подрібнюється.

#### *Гладкі валки*

Валкові пристрої з гладкими валками використовуються для переробки сипучих, крихких, твердих та абразивних матеріалів (зерна, вугілля, полімерних матеріалів, різних рудних і нерудних матеріалів, фарб, шпаклівки) [72-83]. Тобто ці подрібнювачі використовують практично для всіх видів відходів, крім текстильних.

Таке обладнання знайшло застосування в комбікормовій, пивоварній, будівельній, гірничорудній, хімічній, та в легкій і харчовій промисловості.

Подрібнені відходи використовують як наповнювач у полімерних композиціях, як наповнювач для виготовлення спеціальних видів клею, як наповнювач у виготовленні лінолеуму, як наповнювач гумових сумішей.

Валкові пристрої з гладкими поверхнями валків у своїй конструкції мають: корпус 1, в якому розташовані гладкі валки 2, завантажувальний бункер 3 і розвантажувальний бункер 4 (рис. 1.11).

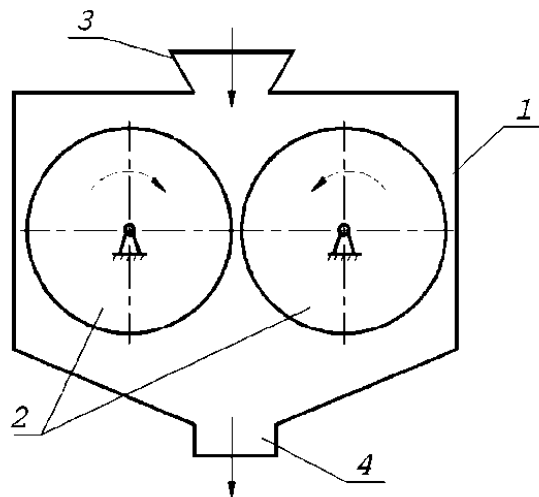


**Рис. 1.11. Валковий перероблювальний пристрій із гладкими поверхнями валків**

Через завантажувальний бункер подаються подрібнені відходи, які захвачуються валками, що обертаються назустріч один одному. За рахунок

стискаючих деформацій відбувається подрібнення матеріалу. І тільки у випадку, коли швидкості обертання валків різні, до стискаючих деформацій додаються ще й зсувні деформації. Величина стискаючих навантажень залежить від міжвалкового зазору та від деформації зсуву.

Процес подрібнення відходів у пристроях із гладкими валками є досить поширеним і добре дослідженим. Він досить простий за конструкцією установки та за обслуговуванням. Ступінь дисперсності, що досягається при такому способі, становить від 0,2 мм до 2 мм. Величину дисперсності можна налаштувати регулюванням зазору між валками. Можливість регулювати ступінь дисперсності дозволяє перероблювати майже всі види попередньо подрібнених відходів, простота конструкції пристрою, легкість і зручність в обслуговуванні – все це обумовлює широке використання валкових пристроїв з гладкими валками.

Що ж стосується недоліків згаданих пристроїв, то одним із них є неможливість якісного подрібнення волокнистих матеріалів.

При подрібненні чистих речовин і хімічних реактивів головною проблемою є збереження чистоти матеріалу, що перероблюється. А підібрати відповідний конструкційний матеріал, з якого виготовляють валки і який би зміг задовольнити вимоги до переробки відходів, неможливо. Для цього використовують пустотілі валки з вакуумом всередині, що дозволяють подрібнювати згадані відходи. З подрібнюваного матеріалу на валках утворюється щільний шар за рахунок вакуумного всмоктування [74]. Така конструкція дає ефект не тільки з огляду на економію дефіцитних конструкційних матеріалів, але й дозволяє вирішувати проблему переробки чистих речовин зі збереженням потрібної чистоти.

У багатьох перероблювальних пристроях використовують механізм “привалу-відвалу”, який дозволяє усунути перекося валків при нерівномірній подачі матеріалу по робочій довжині валків чи при попаданні сторонніх предметів у міжвалковий зазор, а також дозволяє притискати валки рівномірно по їх робочій довжині [77].



Для подрібнення твердих та абразивних речовин застосовують пристрій, валки якого виконані у вигляді обичайок, змонтованих на валках безпосередньо набором гумових кілець, установлених по довжині обичайки і з'єднаних між собою за допомогою гвинтів. У процесі переробки валки з набором гумових кілець, стиснутих зусиллям, вищим за зусилля руйнування частинок відходів, не відхиляючись від обертання, руйнують частини цього матеріалу, забезпечуючи якість і ефективність подрібнення. Така конструкція валків забезпечує безступінчасте регулювання фрикційного зусилля при всебічному стисканні набору гумових кілець [79].

Існує перетирочний пристрій, який складається з двох валків, один з яких встановлений із можливістю обмеженого вісьового зміщення і оснащений генератором віброколивань з електромагнітною котушкою перемінного струму [80]. Використання такого пристрою дозволяє підвищити ефективність переробки дрібних відходів і, відповідно, покращити якість подрібненого матеріалу. Ефективність досягається за рахунок досить великої амплітуди коливань валків відносно один одного. Конструкція пристрою досить проста і, відповідно, надійна. Також завдяки такій конструкції пристрою підвищується ефективність переробки вихідного матеріалу.

У таких пристроях валкового типу, крім основних робочих органів, гладких валків, можуть використовуватися також допоміжні подрібнювальні елементи. Наприклад, шнек, який установлений в живильному пристрої [81]. Конструкція установки має підвищену продуктивність за рахунок того, що відходи можуть подрібнюватися шнеком живильника під дією примусової подачі в зону звуження в нижній частині корпуса, далі у міжвалковий зазор.

А в установці для переробки будівельних, гірничорудних матеріалів в барабані для розмелювання, крім валків, є ще диски, які вмонтовані з можливістю обертання, та додаткові валки [82]. Валки розміщені попарно по колу на периферії дисків. Ця конструкція дозволяє підвищити ефективність процесу подрібнення матеріалу.

*Зубчасті валкові подрібнювачі*

Валкові пристрої із зубчастими валками призначені для подрібнення корисних копалин, різних будівельних матеріалів, сипучих матеріалів (зерна), полімерних матеріалів, кінофотоматеріалів, гуми, дерева, керамічних мас.

Ці перероблювальні пристрої знайшли застосування в гірничорудній, будівельній, деревообробній, целюлозно-паперовій, харчовій, комбікормовій та в інших галузях промисловості. Подрібнені відходи надалі можуть використовуватись як наповнювачі у полімерних композиціях, для одержання гумових виробів, різних харчових добавок.

Валкові пристрої із зубчастими валками [84-86] мають таку ж будову конструкції установки, як і подрібнювачі з гладкими валками (рис. 1.12). Різниця полягає лише у тому, що поверхня валків може бути виконана із зубцями різної конфігурації. Зубчасті валки за розташуванням зубців на валку можна поділити на дві основні групи: валки, зубці яких виконані перпендикулярно до вісі обертання. Використовуються для подрібнення листового матеріалу, наприклад, кінофотоматеріалів, паперу, листових полімерів; валки, зубці яких виконані паралельно до вісі обертання валка. Використовуються для подрібнення гранулоподібних матеріалів, наприклад, зерна, гуми.

До основних видів зубчатих валкових пристроїв можна віднести пристрої з валками із зигзагоподібним профілем. В установці для переробки відходів [84] всередині корпусу розміщено приводні валки 1 і 2 з повздовжнім зигзагоподібним профілем поверхні. Для підвищення ступеня подрібнення різних твердих частинок матеріалу, що перероблюється, і надійності роботи установки поверхні валків виконано з додатковим рифленням у вигляді кільцевих поперечних канавок (рис. 1.13).

Існує аналогічний пристрій для подрібнення полімерної плівки [85]. Різниця лише в тому, що з метою підвищення якості подрібнення ріжучі елементи одного барабана 1 виконані у вигляді кільцевих ножів, кожен з яких має в поперечному перерізі трикутний профіль, а ріжучі елементи іншого барабана 2 виконані у вигляді зубців зі скошеною ріжучою кромкою, причому кромки зубців двох з'єднаних рядів спрямовані у протилежні сторони (рис. 1.14).

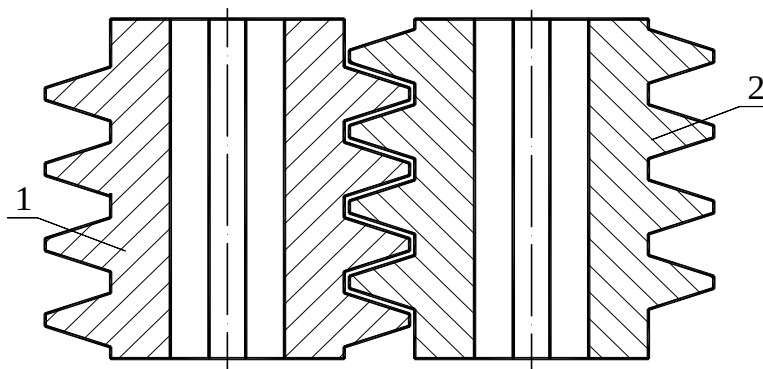


**Рис. 1.12. Валковий перероблювальний пристрій із зубчастими валками: 1 – верхній зубчастий валок; 2 – нижній зубчатий валок**

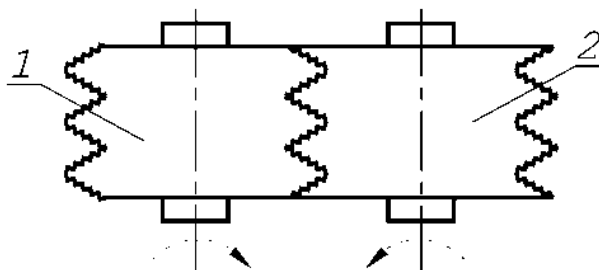


**Рис. 1.13. Валки із зигзагоподібним профілем:  
1,2 – верхній та нижній валки**

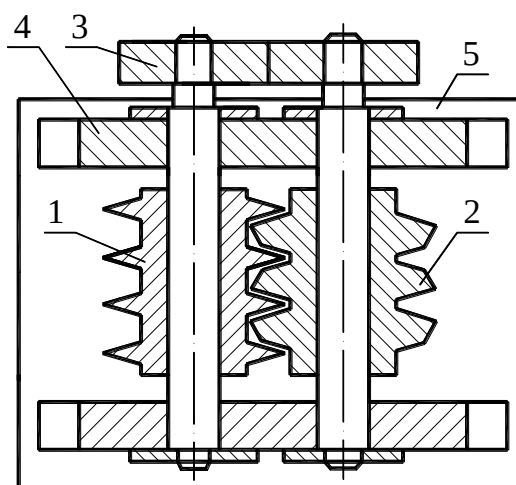


**Рис. 1.14. Валковий пристрій для подрібнення полімерної плівки:  
1 – барабан із ріжучими зубцями; 2 – барабан із зубців зі скошеною ріжучою кромкою; 3 – зубчаста передача; 4 – стійки; 5 – станина**

Установки із зубчатими валками дозволяють переробляти відходи, орієнтуючись на тип подрібнюваного матеріалу [86]. Тобто для подрібнення сипучих матеріалів ефективніше використовувати валки з повздовжнім виконанням зубців. Для подрібнення листових матеріалів доцільніше використовувати валки з поперечним виконанням зубців. Це дозволяє отримувати вищий ступінь дисперсності вихідного матеріалу. Але водночас - прискорює зношування поверхонь як валків, так і корпусу, а також знижує ККД подрібнювача, що є суттєвими недоліками такого пристрою.

#### *Валки з криволінійною поверхнею*

Валкові пристрої із криволінійною поверхнею [87-93] використовують для подрібнення сипучих, полімерних, пластичних матеріалів (наприклад, гуми), рудних і нерудних копалин, зерна. Ці пристрої знайшли застосування в хімічній, харчовій, гірничорудній, комбікормовій, будівельній, сільськогосподарській та в інших галузях промисловості. Подрібнені відходи використовуються як наповнювачі для виготовлення бетонів, гумових виробів, муки, як наповнювачі у полімерних композиціях.

Установка для подрібнення інертних матеріалів при виготовленні будівельних бетонів, а також для подрібнення вугілля в котельних складається з корпусу, всередині якого по горизонтальних валах встановлено два валки 1 з криволінійною поверхнею, які мають квадратні торці [87].

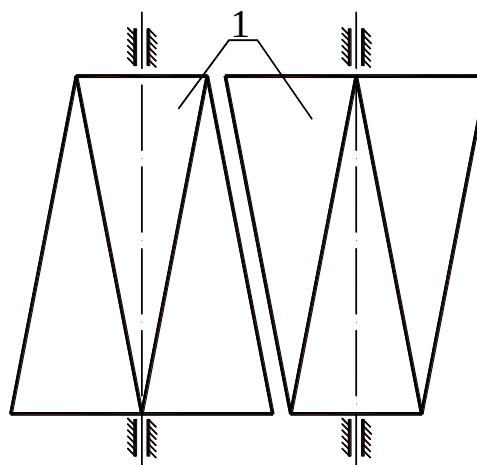


**Рис. 1.15. Валковий перероблювальний пристрій із конічною поверхнею валків: 1 – валки конічної форми**

Валки 1 з'єднані зубчатою парою із можливістю обертання в протилежні сторони і розміщені зі зміщенням на  $45^\circ$  сторін квадратних торців, які лежать в одній площині, з утворенням трикутної форми бокових граней (рис. 1.15).

Процес подрібнення здійснюється за рахунок аналогічних процесів, притаманних гладким валкам. У цьому випадку покращення процесу подрібнення досягається за рахунок огранки валків.

Ступінь дисперсності, якого можна досягти при такому способі подрібнення, становить від 0,1 мм до 4 мм.

Наявність криволінійної поверхні валків дозволяє розширити діапазон матеріалів, що переробляються, і, відповідно, розширити сферу застосування подібного обладнання.

Стосовно недоліків, притаманних конструкціям з криволінійною поверхнею валків, варто зазначити, що основним із них є нерівномірність дисперсності вихідного матеріалу.

У валкових пристроях із криволінійною поверхнею використовують валки найрізноманітніших форм. Для отримання тонкодисперсних порошків із полімерних еластичних матеріалів (гуми) використовують пристрій [88], який складається із валка 1 з горизонтальною віссю обертання і криволінійною робочою поверхнею та із валка 2 з вертикальною віссю обертання у формі зрізаного конуса (рис. 1.16).

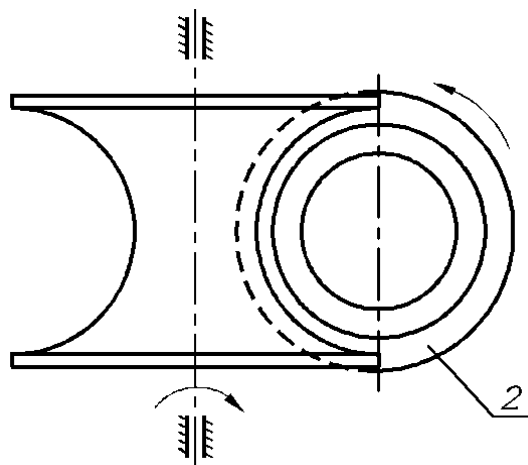


**Рис. 1.16. Валковий пристрій для переробки відходів: 1 – валик із горизонтальною віссю обертання; 2 – валик із вертикальною віссю обертання**

Руйнування матеріалу відбувається безпосередньо між валками 1 і 2, які є робочими органами цього перероблювального пристрою. Процес руйнування відбувається за рахунок стиску і зсуву шарів матеріалу, що перероблюється, між поверхнями валків у різних площинах. Ступінь дисперсності при такому способі переробки відходів становить від 0,1 до 4 мм. Валковий пристрій цієї конструкції забезпечує покращення якості вихідного продукту завдяки можливості досягнення рівномірного по довжині контакту криволінійних поверхонь зазору між валками, при зміні його величини в широких межах.

Усі характеристики цього валкового подрібнювача стосуються також і до наступної конструкції перероблювального пристрою. Різниця між ними лише в тому, що з метою підвищення ефективності процесу подрібнення валики цієї конструкції розташовані один над одним [89]. Робоча поверхня верхнього валка 1 виконана у вигляді шару, а робоча поверхня нижнього валика 2 відповідно ввігнута, причому лінія контакту валків виконана у формі півкруга (рис. 1.17).

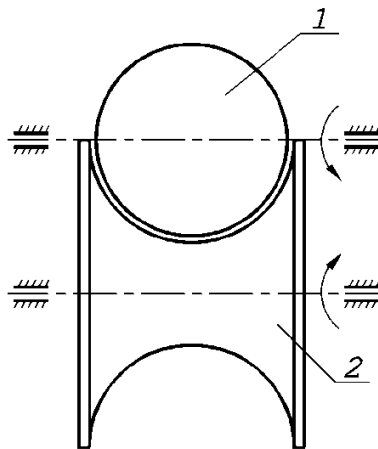


**Рис. 1.17. Валковий пристрій для переробки відходів: 1 – валик виконаний у вигляді шару; 2 – валик із ввігнутою поверхнею**

Така будова пристрою дозволяє покращити ефективність процесу переробки. Але конструкція пристрою є складною у виготовленні. Це стосується і будови попереднього подрібнювача (рис. 1.16).

Для розділення бракованих і стріляних гільз на поліетиленову трубку і металеву основу використовують пристрій [90] з двома валиками, які розміщені вертикально і виконані з лискою по всій циліндричній поверхні (рис. 1.18 а).

Основною перевагою цього пристрою є те, що такий профіль валків враховує форму подрібнених відходів. Хоча цей аргумент можна також віднести і до недоліків описуваної конструкції. Адже на пристроях із профільними валками можна перероблювати лише певний тип відходів, що відповідають згаданому профілю. Пристрій є простим в обслуговуванні, а також простим за конструкцією.

Валки (рис. 1.18 б), які в поперечному перерізі мають форму рівностороннього трикутника з випуклими сторонами і закругленими вершинами, використовують у подрібнювачах гірничорудної, хімічної та харчової промисловості [91, 92, 93].

Подрібнення матеріалу відбувається внаслідок утворення стискаючих деформацій.

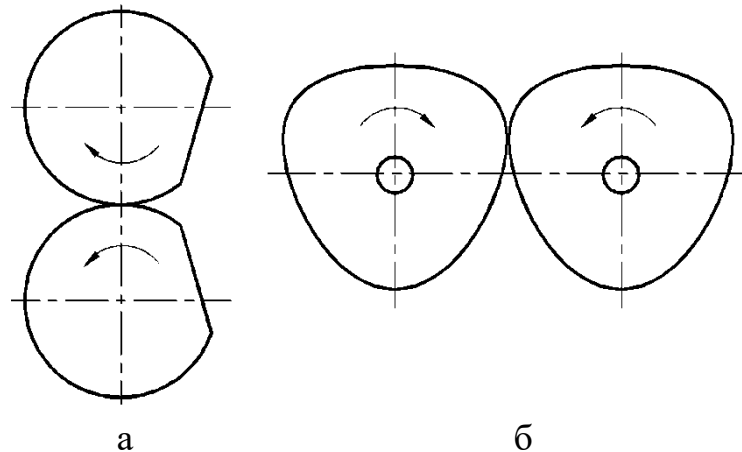


**Рис. 1.18. Валковий пристрій для переробки відходів: а – валки розміщені вертикально і виконані з лискою по всій поверхні; б – валки мають форму рівностороннього трикутника з випуклими сторонами**

Величина стискаючих навантажень залежить від міжвалкового зазору. Що ж стосується розмірів подрібненого матеріалу, то в перероблювальних пристроях подібної конструкції дуже тяжко провести налаштування зазору, що є основним її недоліком.

Головною перевагою пристроїв такої незвичної форми є збільшення кута захвату відходів, що перероблюються. Для розрахунку параметрів обладнання такого типу немає методики; хоча є методики для розрахунку параметрів змішувальних пристроїв, але вони недосконалі.

## **1.4. Виробництво полімерних виробів легкої промисловості з використанням перероблених пластмас**

### **1.4.1. Застосування перероблених полімерних відходів**

Вдруге перероблені полімерні матеріали використовуються у виробництві безлічі виробів різних сфер промислового виробництва товарів. Розвиток виробництва на основі вдруге перероблених пластмас має безпрецедентне зростання, стимульоване потребами знизити витрати, наситити ринок і відповідати вимогам більш жорсткого законодавства.

Тільки в США сьогодні випускається понад 1400 видів продукції із відновлених пластмас. Представлені каталоги виробів, які допомагають менеджерам і споживачам знаходити продукцію, отриману з повторно перероблених матеріалів, і перевіряти її відповідність законодавчим нормам.

Незважаючи на поточне зростання, виробництво виробів легкої промисловості із вторинних полімерних матеріалів має низку проблем. Серед них - розробка і впровадження необхідних технологій і обладнання для переробки відходів легкої промисловості, значні витрати і слабка поінформованість ринку.

Згідно з [94, 95], вдруге перероблені полімерні матеріали можна використовувати в більшості технологічних процесів виробництва виробів легкої промисловості, таких як: лиття під тиском, компресійне пресування, екструзія, каландрування, термоформування і ротаційне формування. Однак для отримання заданих властивостей нових полімерних виробів у ці процеси потрібно внести ряд змін. Відновлені матеріали можуть відрізнятися за своїми властивостями від оригінальних полімерних матеріалів внаслідок деструкції під час їх тривалого використання, при повторній переробці, а також через наявність домішок інших полімерів, забруднень і паперу. Визначальним фактором є джерело відновленого матеріалу, наприклад, це можуть бути промислові чи побутові відходи.



Важливо сформулювати технічні вимоги та критерії функціональності, що пред'являються до полімеру, з якого виготовляють товари легкої промисловості, і встановити межі їх якості. Необхідно мінімізувати наявність ряду недоліків у матеріалі, розглянутих вище, за допомогою: розробки нових технологічних процесів і обладнання для переробки полімерних відходів в сировину, без погіршення механічних властивостей полімерів в процесі переробки; розробки литтєвої оснастки, що дозволяє використовувати перероблений полімер як наповнювач або сполучний елемент при виготовленні нових полімерних виробів легкої промисловості, що підвищує їх експлуатаційні властивості; конструювання виробів, які можуть допускати наявність дефектів матеріалу (наприклад, це може бути потовщення або зміцнення стінки; або, у випадку з двошаровим литтям, використання у відповідальних місцях виробів первинного матеріалу, а в інших частинах – переробленого).

Вторинні матеріали більшою мірою підходять для виробництва виробів, для яких колір не є критичним. Пластмаси з побутових відходів зазвичай мають різноманітні кольори і вторинний полімер виходить темно-зеленим або чорним. При незначному забарвленні можна додавати барвники, щоб приховати вихідний колір (наприклад, при переробці молочних пляшок з ПЕТФ).

Найбільш придатними технологічними процесами й устаткуванням для виробництва полімерних виробів легкої промисловості з використанням перероблених відходів є ті, які мають широкий діапазон технологічних параметрів. У зв'язку з цим, до найбільш відповідних технологічних процесів, в яких можна використовувати перероблені полімерні відходи, можна віднести такі: лиття під тиском, компресійне лиття та екструзії. Інші способи формування можна застосовувати тільки в тих випадках, коли вторинний полімер має властивості, близькі до властивостей оригінального матеріалу [95].

Щоб забезпечити можливість введення більшої частки переробленого полімерного матеріалу у виріб, слід застосовувати спеціальні технологічні прийоми, серед яких:

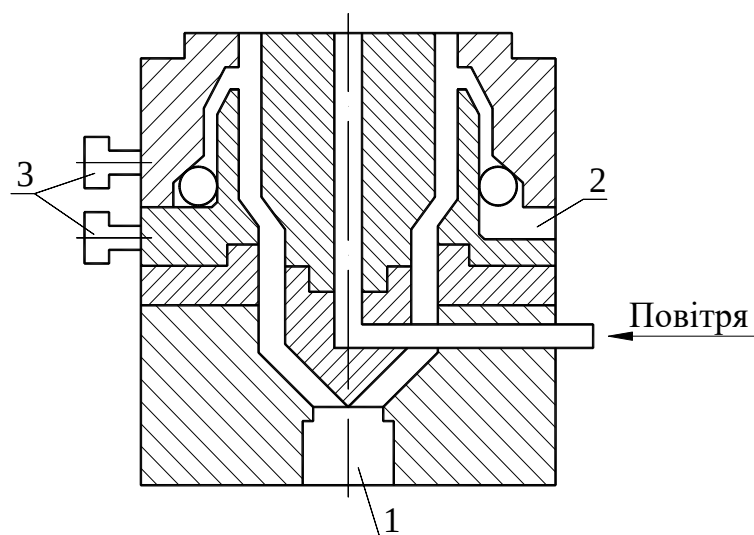


**Рис. 1.19. Соекструзійна головка для отримання двошарових плівок:**  
**1 – вхід для розплаву, що утворює внутрішній шар; 2 – вхід для розплаву, що утворює зовнішній шар; 3 – регулювальні болти**

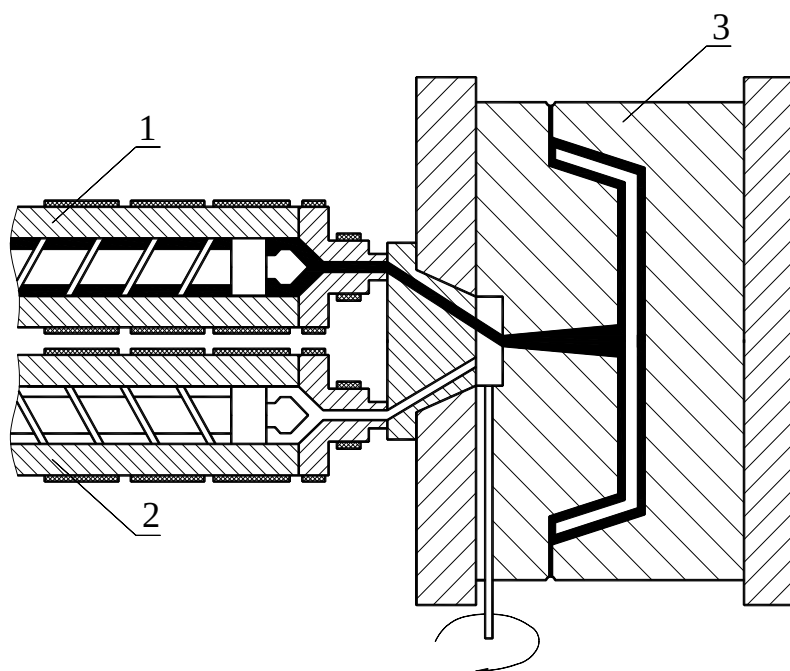


**Рис. 1.20. Обладнання для багатокомпонентного лиття під тиском:**  
**1 – екструдер для утворення поверхневого шару; 2 – екструдер для утворення серцевини виробу; 3 – прес-форма**

- соекструзії – процес отримання багатошарового виробу із середнім шаром із відновленого матеріалу, що утворює «сендвіч» з бічними шарами з оригінального полімеру [96] (рис. 1.19);

- багатокомпонентне лиття під тиском («сендвіч-лиття») (рис. 1.20), коли відновлені полімери утворюють сердечник у товстостінному виробі, в якому стінки зроблені з оригінального матеріалу [97]. При виборі місця розташування літника слід брати до уваги, що спочатку впорскується певна кількість поверхневого матеріалу, а після цього поверхневий і серцевинний матеріал впорскуються одночасно. В принципі, можна використовувати більшість типів літникових каналів, однак часто виникає необхідність зміни їх геометричних параметрів. Допустимими варіантами є стрижневий, щілинний, точковий і тунельний літникові канали, але використання для багатокомпонентного лиття під тиском звичайної гарячочанальної літничкової системи неможливе, оскільки в цьому випадку в нагрівальному каналі змішалися б поверхневий і серцевинний матеріали.

- лиття під тиском «змішаних» полімерних матеріалів – технології, які успішно застосовуються при введенні значної частки перероблених полімерних відходів як з'єднувального матеріалу.

Перевага цих технологій у тому, що часто вони не вимагають промивання матеріалів перед переробкою, а недолік – низька міцність і висока повзучість [95]. Розв'язання цієї проблеми представляє науковий і практичний інтерес при виробництві литтям під тиском полімерних виробів легкої промисловості, армованих переробленими відходами. Цій проблемі буде присвячено основну частину досліджень у межах виконання нашої дисертації.

#### **1.4.2. Способи армування полімерних виробів легкої промисловості**

Більшість сучасних полімерних виробів виробляють із композицій двох полімерів, що дозволяє виробам мати поєднані властивості. Спільна робота різнорідних матеріалів дає ефект, що дорівнює створенню нового матеріалу, який поєднує властивості вихідних матеріалів.

У більшості випадків компоненти композиції різні за геометричною ознакою (один безперервний – матриця, інший переривчастий – армувальний). Залежно від виду армування композиційні матеріали бувають дисперсно-зміцнені та волокнисті.

Дисперсно-зміцнені полімерні вироби: у матриці рівномірно розподілені подрібнені фракції іншого полімеру, які можуть витримати певні навантаження під впливом механічного або теплового полів.

Полімерні вироби, що армуються волокнами: у матриці рівномірно розподілено волокна, які сприймають основні напруження при впливі зовнішніх навантажень і забезпечують жорсткість і міцність у напрямку волокон. Як волокна може бути використаний той же матеріал, з якого складається матриця, або інші полімерні матеріали, що мають підвищені експлуатаційні характеристики.

Найчастіше практичне застосування знаходять такі способи виробництва виробів із армованих пластиків [98]: контактне формування з укладанням просоченого смолою волокнистого полотна на форму; напилення волокнисто-полімерної композиції на поверхню форми; різні способи формування в закритій формі; намотування просоченого смолою волокна на форму; пултрузія, або формування профільних виробів шляхом протягання волокна через ванну з полімером і калібрувальну фільтру.

Залежно від технології формування, значення властивостей полімерних композитів можуть відрізнятися у кілька разів. Вибір технології залежить від конструкції виробу, умов його експлуатації, обсягу виготовлення і наявних виробничих ресурсів.

Неправильна організація техпроцесу, незадовільна підготовка вихідних компонентів, недотримання технологічних режимів (тиску пресування, тривалості і температури процесу, приписів із підготовки сировини і матеріалів) а також багато інших причин можуть значно змінювати властивості готових виробів. Тому дуже важливо не тільки грамотно, з урахуванням конструкції і умов експлуатації виробів, побудувати технологічний процес, але й при його реалізації чітко дотримуватися технологічних режимів. З цією метою необхідно

на всіх стадіях процесу здійснювати поточний контроль технологічних параметрів і властивостей виробу, що виготовляється.

Для виготовлення невеликих серій великогабаритних виробів складної геометричної форми застосовують пошарове укладання ламінату, використовуючи як з'єднувальний матеріал смоли холодного затвердіння (епоксидні, поліефірні та ін.) [98, 99]. Цю технологію називають контактним формуванням (рис. 1.21).

При такому способі ламінат 2, що являє собою армувальний матеріал, просочений полімерною композицією, укладається на спеціальну негативну форму 1 (матрицю), потім ретельно наочується валиком 3 з метою ущільнення і видалення бульбашок повітря, після чого полімерна композиція затвердіває. Поверхня готового виробу є дзеркальним відображенням поверхні використаної форми і повністю відтворює її фактуру.

При великих товщинах майбутнього виробу зі склопластику нанесення ламінату проводять у декілька стадій, даючи можливість кожному шарові затвердіти і охолотитися. Це пов'язано з тим, що затвердіння смоли відбувається із виділенням значної кількості тепла (рис. 1.21). В результаті відбувається перегрів композиції, що твердіє, з'являються значні внутрішні напруги, що призводять до деформацій, викривлення і розтріскування готових виробів.

Останніми роками набув розвитку спосіб виготовлення великогабаритних виробів зі склопластику шляхом напилення на формотвірну оснастку композиції [98, 100], що містить з'єднувальний матеріал (поліефірну смолу і каталізатор затвердіння) і рубане скловолокно (рис. 1.22).

Важливою особливістю напилювального обладнання останнього покоління є те, що змішування смоли і каталізатора затвердіння відбувається поза напилювальним пістолетом, тобто в потоці повітря, що транспортує і перемішує всі три компоненти (смолу, каталізатор затвердіння і рубане скловолокно). Така конструкція напилювального обладнання дозволяє уникнути затвердіння полімерної композиції всередині камери змішувача і у шлангах при внутрішньому змішуванні компонентів. Потік повітря виконує подвійну функцію: перемішує компоненти і транспортує суміш до матриці.

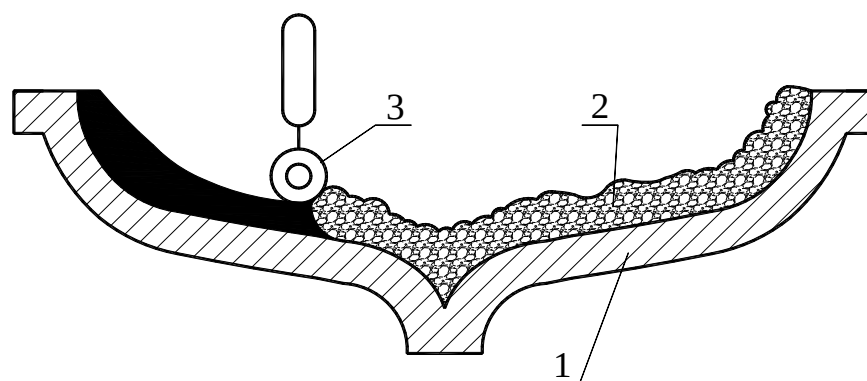


**Рис. 1.21. Схема контактного формування: 1 – форма; 2 – ламінат; 3 – прикаточний валик**

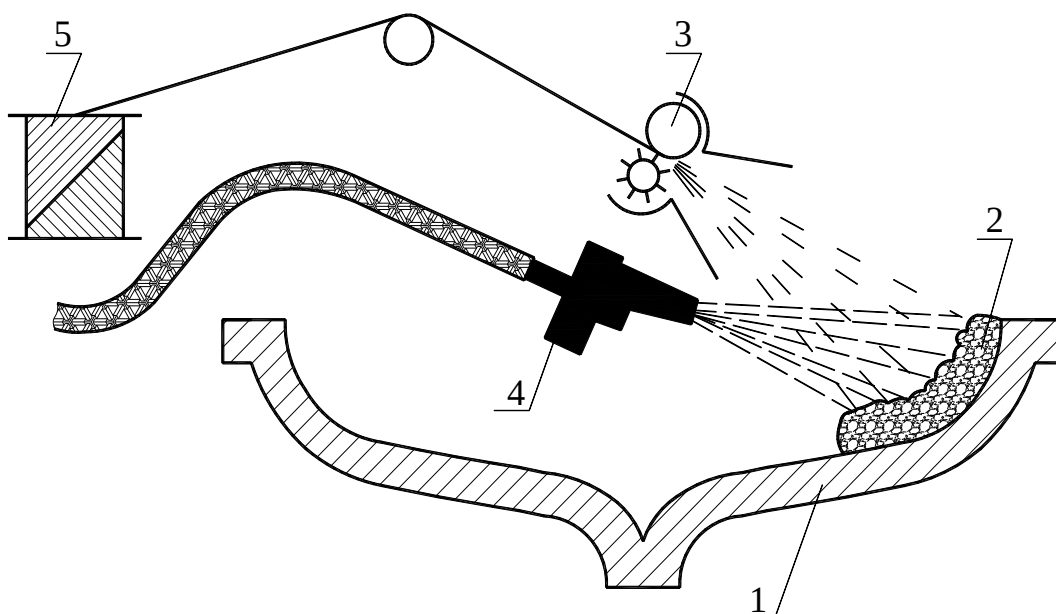


**Рис. 1.22. Схема виробництва виробів зі склопластику методом напилення:  
1 – форма; 2 – ламінат; 3 – різальний пристрій; 4 – напилювальний пістолет; 5 – бобіна ровінгу**

Як і при пошаровому ручному укладанні просоченої смолою тканини, напилений на матрицю шар композиції накочується валиком з метою ущільнення і видалення бульбашок повітря. Збільшення вмісту волокна в композиції призводить до зростання міцносних властивостей. Однак для хорошого просочення волокна зв'язувальним матеріалом його вміст при такій технології не повинен перевищувати 33-35% за масою.

При використанні технології напилення непотрібні попередній розкрій скломатеріалів, підготовка полімерної композиції і просочення нею армувального наповнювача. Це дозволяє скоротити виробничі площі, підвищити продуктивність праці і знизити собівартість продукції.

Технологія виробництва виробів шляхом напилення найбільш економічно доцільна при виготовленні великогабаритних виробів, тому що кількість відходів, що утворюються, залежить від площі виробу і знижується з її збільшенням. Так, при площі виробу, більшій за 1 м<sup>2</sup>, кількість відходів не повинна перевищувати 2%.

Для багатьох сфер застосування склопластиків, особливо для виготовлення архітектурно-будівельних виробів, продукції культурно-побутового призначення, водних гірок і атракціонів, велике значення має кольорове оформлення виробів. Досягнення необхідних кольорів виробів із одночасним підвищенням їх стійкості до дії УФ-опромінення, а також до різних агресивних середовищ, стирання й інших навантажень здійснюється шляхом використання як зовнішнього шару спеціальних полімерних композицій (гель-коутів), забарвлених у необхідний колір. Для їх виготовлення використовують поліефірні смоли з більш високими фізико-механічними і фізико-хімічними властивостями, ніж смоли, які застосовують для виготовлення склопластику.

Для фарбування гель-коутів у необхідні кольори використовують органічні і неорганічні пігменти. Використовуючи комбінації кольорових паст, сучасна промисловість поставляє споживачам сотні гель-коутів різних кольорних відтінків.

Товщина покриття складає 0,4-0,6 мм. При недостатній товщині через нього проступає структура армувального наповнювача, знижується довговічність покриття, а при завищеній товщині гель-коут схильний до розтріскування і

появи інших дефектів. Нерівномірна товщина шару гель-коута також призводить до зниження властивостей зовнішнього шару, тому її необхідно ретельно контролювати в процесі напилення на матрицю.

Пресування склопластиків у замкнутих об'ємах – досить відомий процес. Його використовують для виробництва формованих виробів із заданою поверхнею і точними розмірами. Формування проводять під тиском при кімнатній або підвищеній температурі. Замкнутий простір, відповідний геометрії виробу, може створюватися роз'ємною формою (рис. 1.23) або за допомогою еластичної діафрагми (рис. 1.24).

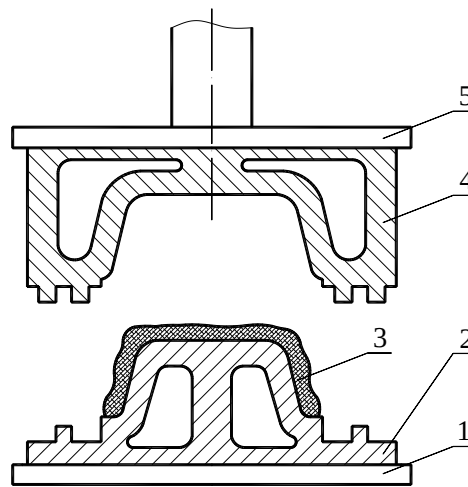


**Рис. 1.23. Схема пресування виробу в замкнутій формі: 1 – нерухома плита преса; 2 – пуансон; 3 – заготовка; 4 – матриця; 5 – рухома плита преса**

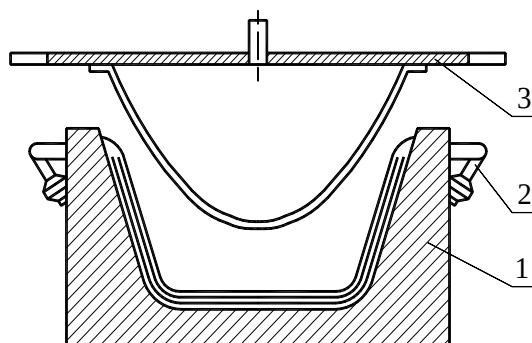


**Рис. 1.24. Схема пресування виробу за допомогою еластичної діафрагми: 1 – форма; 2 – запірні болти; 3 – верхня плита; 4 – еластична діафрагма**



Роль еластичної діафрагми часто виконує гумовий мішок, який може обтискати заготовку за рахунок тиску повітря, що подається в нього, або шляхом створення вакууму між мішком і заготовкою [98-100].

Необхідність нагріву форми із заготовкою визначається властивостями з'єднувального матеріалу. Так, використання як з'єднувального матеріалу фенолформальдегідних смол вимагає нагріву матеріалу протягом 15-20 хв. при температурі 190-200 °С. Застосування поліефірних і епоксидних смол дозволяє проводити затвердіння при кімнатній температурі.

Останніми роками широко використовують формування армованих пластиків за RTM-процесом (resin transfer moulding) [98]. При цій технології також використовують закриті форми, що складаються з двох частин (рис. 1.25).

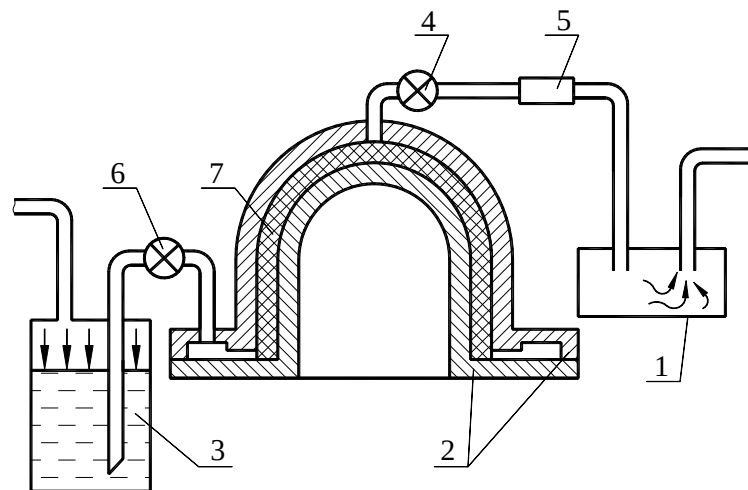


**Рис. 1.25. Схема формування виробів за RTM-процесом:**

**1 – водний фільтр; 2 – форма; 3 – місткість зі з'єднувальним матеріалом;  
4 – кран вакуумної лінії; 5 – вакуум-насос; 6 – кран лінії подачі  
з'єднувального матеріалу; 7 – армувальний наповнювач**

Затвердіння з'єднувального матеріалу відбувається при кімнатній температурі. Процес формування такий. У форму 2 закладають армувальний волокнистий наповнювач 7 у вигляді тканини, полотна чи інших волокнистих матеріалів. Форма герметично закривається, і в ній за допомогою вакуум-насоса 5 створюється вакуум. Після цього у форму з місткості 3 під невеликим тиском

подається полімерна композиція. При цьому з'єднувальний матеріал розтікається по всьому об'єму форми і просочує армувальний наповнювач.

Форма повинна мати достатню жорсткість, щоб її внутрішній простір не змінювався ні під дією вакууму, ні при подачі смоли під тиском. Зміна геометрії форми призводить до виникнення спотворень у виробі. Стабільність внутрішнього простору форми при формуванні виробу досягається створенням на її зовнішній поверхні ребер жорсткості. Однак, оскільки формування відбувається при низькому тискові, форма може бути зроблена зі склопластику, бетону та інших недорогих матеріалів.

Гаряче пресування і RTM-процес дозволяють отримувати вироби з армованих полімерних композитів із високою якістю всієї поверхні. Оскільки в обох випадках формування проводять у закритій формі під тиском, то виріб, отриманий по всій площі контакту з формою, відтворює її поверхню і має задану формою не тільки геометрію, але й фактуру поверхні.

Застосування цих технологій має важливі переваги. Воно прискорює процес затвердіння смоли, збільшує продуктивність праці, скорочує виробничі площі, знижує трудомісткість, підвищує точність розмірів виробів і їх стабільність, скорочує обсяги утворення відходів, підвищує механічні властивості виробів і покращує санітарно-гігієнічні умови виробництва.

Слід, однак, зауважити, що вартість пресової оснастки досить висока і тому всі перераховані переваги пресування реалізуються тільки при масовому виробництві однотипної продукції.

Велике значення при пресуванні виробів у закритих формах має правильний вибір роз'єднувальних матеріалів, якими покривають внутрішні поверхні напівформ. Такий вибір полегшує розкриття форм і видалення з них відформованих виробів, а також продовжує термін експлуатації технологічної оснастки.

При виготовленні циліндричних виробів з армованих полімерів використовують технологію намотування. За цією технологією на оправку, що обертається, намотується волокно, просочене з'єднувальним матеріалом.

Просочення здійснюється у ванні зі з'єднувальним матеріалом, через який проходить безперервне волокно або джгут.

Намотування проводиться під кутом до поздовжньої вісі оправки для підвищення міцності готового виробу у вісьовому напрямку. Укладання армувального наповнювача здійснюється за різними схемами залежно від умов роботи готового виробу. У промисловості застосовують такі схеми намотування: кільцеву, орбітальну, поздовжньо-поперечну, спіральну.

Цим способом виробляють труби великого діаметра (до 5 м), цистерни для перевезення хімічних продуктів, корпуси ракет, інші вироби. При виготовленні цистерни окремо виготовляють трубу способом намотування і дві обичайки методом наплення, які потім з'єднують за клейовою технологією за допомогою фланців. Формування замкнутих корпусів циліндричної форми здійснюють у вигляді коконів шляхом орбітального намотування з посиленням окремих найбільш навантажених ділянок корпусу. Процес намотування проводиться в автоматичному режимі за допомогою програмного управління.

Для виготовлення довгомірних елементів із невеликим поперечним перерізом, таких як стрижні, трубки, куточки, швелери, використовують безперервне формування способом пултрузії [98] (рис. 1.26).

Технологія виробничого процесу полягає в тому, що скловолокнистий матеріал у вигляді джгутів, стрічок і т.п. зі шпулярника 1 протягують через ванну 2, наповнену полімерною композицією, а потім – через нагріту до 130-150 °С формувальну матрицю 3 необхідної конфігурації. При цьому методі відношення смоли до армувального матеріалу дорівнює 3:1. Міцність при розриві таких виробів у поздовжньому напрямку сягає 1100 МПа.

У результаті на виході отримуємо армований профіль, конфігурація якого повторює форму філь'єри. Цим методом можна отримувати вироби з будь-яким профілем. Основними вузлами пултрузійної установки є: секція подачі склонаповнювача, просочувальна секція, філь'єра, тягнучий вузол, гідромаслостанція, пила і контрольний вузол, який включає в себе блок живлення, блок управління нагрівальними елементами і блок управління тягнучим вузлом.

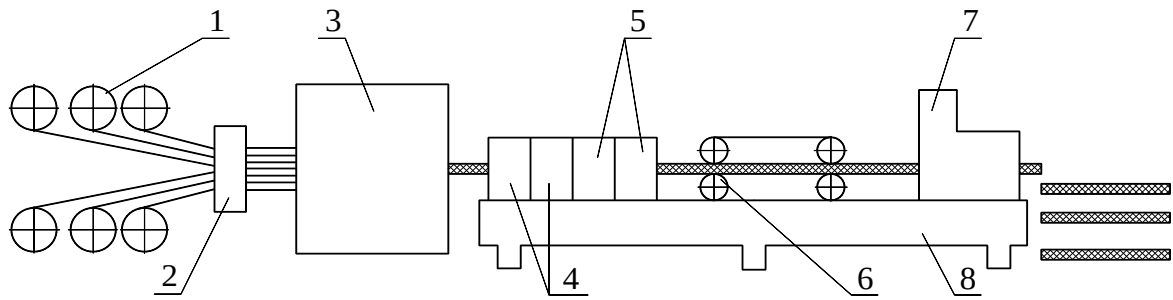


**Рис. 1.26. Установка для формування профілів зі склопластику способом пултрузії: 1 – шпулярник; 2 – просочувальна ванна; 3 – формувальна матриця; 4 – камера термообробки; 5 – камера охолодження; 6 – тягнучий пристрій; 7 – дискова пила; 8 – станина**

У сучасних пултрузійних установках нагрівання здійснюється за допомогою змінного електричного поля високої частоти, що дозволяє здійснювати практично миттєвий нагрів матеріалу до заданої температури в будь-якому об'ємі. Використання високочастотного нагріву дозволяє виготовляти способом пултрузії товстостінні вироби з високою продуктивністю, що досягає 6 м/хв.

Особливий інтерес являє собою виробництво з армованих полімерних композитів пустотілих виробів оболонкової форми. Як правило, такі вироби виготовляються шляхом намотування на оправку, яка може бути нерозбірною, розбірною, такою, що виплавляється, руйнується, випалюється, надувається, комбінованою.

Таким чином, технологічні можливості виробництва виробів з армованих композиційних матеріалів різноманітні, вибір технології виробництва - дуже важлива стадія при розробці і конструюванні виробів, від якої залежать не тільки властивості готової продукції, а й її собівартість.

При виборі способу виробництва необхідно враховувати: конструкцію виробу, умови його експлуатації, властивості сировинних матеріалів, режими затвердіння з'єднувального матеріалу, технологію підготовки армувальних матеріалів, вартість технологічної оснастки та обсяги виробництва виробів із композиційних армованих пластиків.

Наведений вище огляд способів армування полімерних виробів у процесі їх виготовлення показав, що наявні технології використовують як армувальний матеріал первинний неперероблений полімер, що відрізняється від матеріалу матриці підвищеними експлуатаційними властивостями.

У роботах [94, 95] розглядаються способи використання переробленого полімеру як частини багатошарового виробу, що займає невідповідальну область цього виробу. Також пропонується використовувати перероблені полімерні відходи як матриці армованих полімерних виробів.

### **1.5. Сучасні структурні моделі полімерних матеріалів**

Моделювання структури полімерних матеріалів має досить важливе теоретичне значення, оскільки воно дає можливість кількісно описувати взаємозв'язок між структурою, параметрами переробки та фізико-механічними характеристиками полімерного матеріалу.

Моделювання структури полімеру та її змін під впливом механічного та теплового полів дозволяє визначати нові, досі невідомі властивості полімерних матеріалів. Наприклад, результати, отримані після застосування рентгенівських і радіоспектроскопічних методів та методу скануючої електронної мікроскопії, дали можливість сформулювати нові модельні уявлення про структуру полімерних матеріалів, і, відповідно, виявити нові їх властивості [101-126].

Сьогодні існує величезна кількість моделей структури полімерних матеріалів [101, 102, 107, 108, 112, 117, 125, 127-140], але лише невелика їх частина відповідає сучасним уявленням про структуру полімерів.

Сучасне моделювання структури полімерних матеріалів розвивається за трьома напрямками: перший – це отримання структурних моделей полімерів, які дають можливість на основі сучасних уявлень про будову полімерів змодельовати процес зміни їх структури, а відповідно і властивостей, під дією механічних та теплових навантажень [108, 112, 120-125, 134-138]; другий – це створення фізичних моделей, які дають можливість на основі знань про

структуру полімерного матеріалу за допомогою методів механіки суцільного анізотропного середовища описати фізико-механічні властивості полімерних матеріалів під дією механічних, теплових та інших навантажень [107, 140, 141-145]; третій – це комбінування першого та другого напрямків, тобто розробка математичної моделі зміни структури полімерних матеріалів під дією різних силових і теплових полів [110, 114, 117, 118, 139, 140], яка дає можливість описати фізико-механічні властивості полімерних матеріалів.

У роботах [107, 108, 118, 132] встановлено, що будова полімерних матеріалів – природних або штучних - має мікрогетерогенну структуру. Тобто полімерний матеріал містить кристалічні й аморфні області, що є причиною специфічності їх властивостей. Наприклад, поряд із властивостями, які притаманні всім кристалічним тілам, полімерні матеріали, завдяки наявності в їхній структурі аморфної області, можуть отримувати великі деформації [132].

Орієнтовані полімерні матеріали характеризуються взаємозалежністю вісей орієнтації усіх кристалітів полімеру. В результаті орієнтації кристалічних полімерів у них утворюється певна анізотропна структура, яка має, відповідно, анізотропні властивості. Як приклад полімерів з орієнтованою структурою можуть розглядатися плівки та волокна. Найпоширеніша модель будови орієнтованих полімерних матеріалів запропонована науковцями Хоземаном та Бонаром. Згідно з цією моделлю, структура орієнтованого полімеру має такий вигляд (рис.1.27).

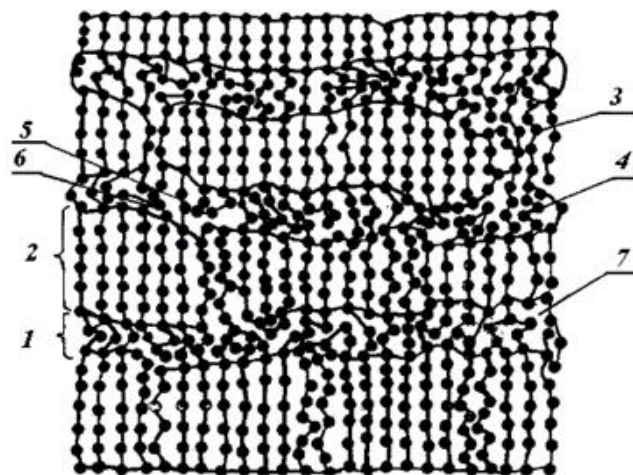


**Рис. 1.27. Модель будови полімерного матеріалу Бонара-Хоземана:**  
**1 – аморфна область, 2 – ламелі, 3 – вільні кінці ланцюгів, 4 – довгі складки,**  
**5 – витягнуті ланцюги, 6 – короткі складки, 7 – пустоти.**

Тобто, вздовж вісі орієнтації більш щільні кристалічні області чергуються з менш щільними аморфними [108, 112]. Кількість зв'язків, що з'єднують кристалічні області, порівняно невелика, а макромолекули на границі кристалічної та аморфної областей накладаються одна на одну і повертаються в кристалічну область, утворюючи складки.

Таких же уявлень про будову перехідної області орієнтованих полімерних матеріалів дотримується більшість сучасних науковців, серед яких Келлер, Флорі, Петерхін, Скульо. На їхню думку, структура орієнтованих полімерних матеріалів являє собою чергування кристалічної й аморфної областей, а макромолекули в кристалічних областях утворюють складчасту конформацію, хоча деякі з них переходять з однієї кристалічної області в іншу через аморфний прошарок [120, 134]. Однак ця модель не відтворює всі характеристики орієнтаційного упорядкування, а саме: вона не враховує дезорієнтацію надмолекулярних утворень, таких як кристалічні області (кристали).

Структуру орієнтованих полімерних матеріалів можна представити таким чином (рис. 1.28.а) [121, 125].

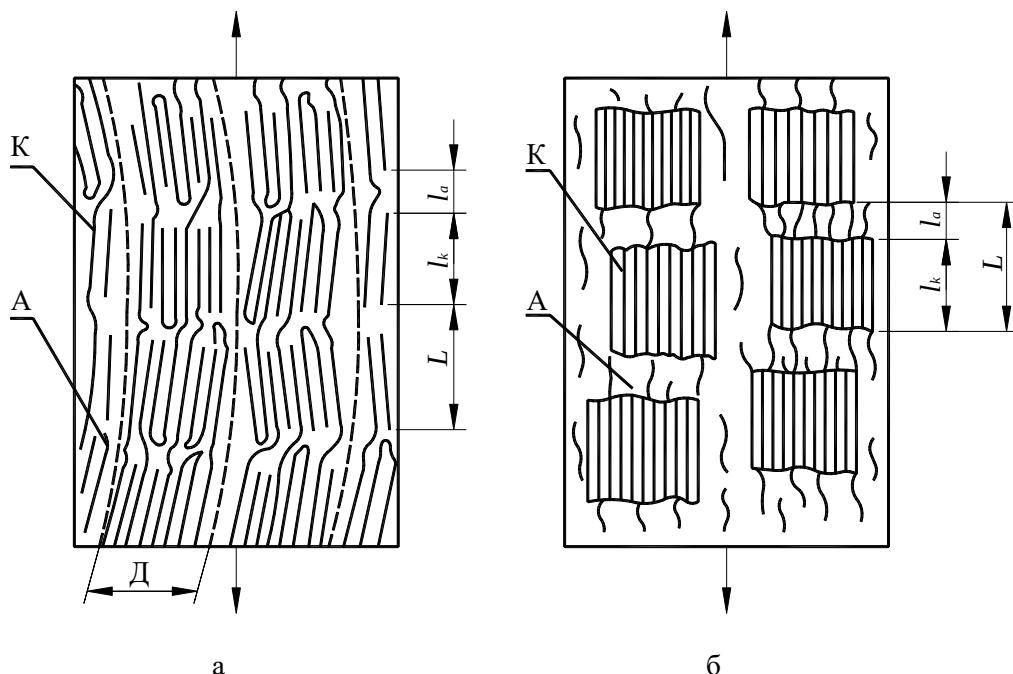


**Рис. 1.28. Моделі будови полімерних матеріалів, що відповідають електронно-мікроскопічним дослідженням (а) і рентгенографічним даним (б):  $K$  – кристалічні області;  $A$  – аморфні області;  $l_k$  – довжина кристалічних областей;  $l_a$  – довжина аморфних областей;  $L$  – період;  $D$  – діаметр фібрили**

Полімер утворюється з фібрил, що мають діаметр від  $100 \text{ \AA}$  до  $300 \text{ \AA}$ , вздовж яких чергуються кристалічні й аморфні області з періодом  $L=100\ldots 300 \text{ \AA}$ . Кристалічні області мають, як правило, довжину, яка становить 70% від періоду  $L$ . При розтягу кристалічних областей вздовж вісі орієнтації спостерігається збіг відносної деформації кристалічної та аморфної області  $E_L$  з деформацією самого полімерного зразка [125]. При цьому деформація кристалічної області  $E_k$  виявилася меншою більше, ніж на порядок, у порівнянні з деформацією періоду  $E_L$ . Це говорить про те, що практично вся деформація полімерного зразка зумовлена деформацією аморфних областей; це підтверджують дослідження, які проводилися методом скануючої електронної мікроскопії.

Наступна модель будови орієнтованих полімерних матеріалів відповідає результатам експериментальних досліджень, проведених за допомогою рентгенографічного методу. Зазначена структурна модель наведена на рис. 1.28 б. [125, 135-137]. Згідно з цією моделлю, весь об'єм полімеру являє собою чергування кристалічних та аморфних областей вздовж вісі орієнтації полімерного матеріалу, але при цьому ці кристалічні та аморфні області не утворюють чітку фібрилярну структуру. Період чергування  $L$  між найближчими кристалічними областями складає від  $60 \text{ \AA}$  до  $200 \text{ \AA}$ .

У результаті розтягу полімерного матеріалу вздовж вісі орієнтації, згідно з цією моделлю, відбувається пружній розтяг періоду чергування  $L$ , а відносна деформація полімерного зразка, за аналогією до попередньої моделі, збігається з відотною деформацією періоду чергування  $L$ . Деформація аморфних областей у 2-4 рази перевищує деформацію зразка і на порядок перевищує деформацію кристалічних областей. Отже, деформацію орієнтованого полімерного матеріалу, згідно з розглянутими моделями його структури (рис. 1.28), можна представити, як розсування кристалічних областей, які, у свою чергу, розтягують аморфні області.



В роботах [138] описано модель безперервної кристалічної області зі складками, що статично розподілені по всій області кристала. В результаті незначного розтягу полімерного матеріалу і впливу високих температур, згідно з цією моделлю, відбувається деформація фібрилярної структури, при якій мікрофібрили цілком розпадаються на розгорнуті ланцюги (рис. 1.29).

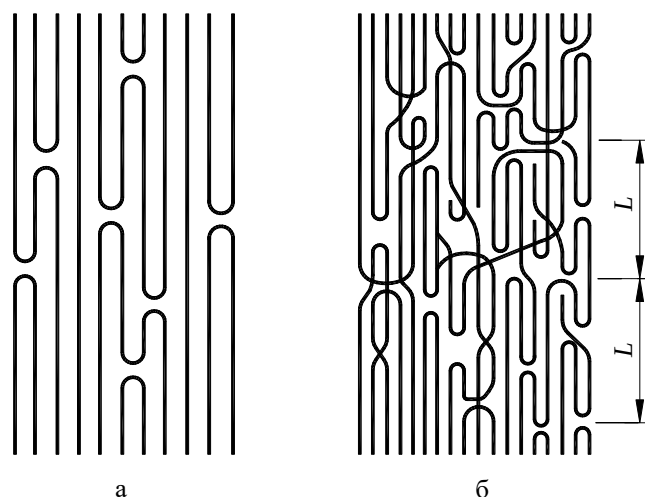


**Рис. 1.29. Модель кристалічної області зі статистично розподіленими складками: а – розтягнуте волокно, що складається зі складок ланцюгів; б – фібрилярна структура зі складками та прохідними ланцюгами.**

Надмірно розтягнутий полімерний матеріал містить витягнуті розгорнуті ланцюги у кристалічній області зі складками, що залишилися, тобто з дефектами. Такий полімерний матеріал, якщо його кінці не закріплювати, не буде відновлюватися (релаксувати) при відпалі, тобто усадка буде відсутня.

Недоліком цієї моделі є те, що вона не описує перехід з неорієнтованого стану полімерного матеріалу до орієнтованого і, як зазначено вище, не описує явище усадки при відпалі полімеру.

Сьогодні при побудові моделей структури полімерних матеріалів використовують механічну модель будови композитного середовища визначеної структури з тими ж фізико-механічними властивостями [140, 141-155].

Розглядаючи фізико-механічні властивості неорієнтованого полімерного матеріалу, варто поставити питання про розподіл напружень між кристалічними

та аморфними областями. Визначити напруження можна тільки у тому випадку, якщо припустити, що всі надмолекулярні утворення зазнають однакової деформації і перебувають під однаковим напруженням.

Загальним недоліком для всіх таких моделей є те, що вони не зможуть коректно описати напруження і деформацію на границі між кристалічною і аморфною областями. Тобто, припущення щодо постійної деформації та напруження в межах надмолекулярних утворень не дозволяють визначати напружено-деформований стан реального полімерного матеріалу.

Верхня границя – припущення щодо постійної деформації, і нижня границя – припущення щодо однорідності напружень, відрізняються на величину першого, другого порядку, тому в проміжку між ними потрібно проводити екстраполяцію.

У зв'язку з цим використовують узагальнені моделі Кернера [146], Хашина [147], Дьюті [148], що описують структуру композиційних матеріалів відносно полімерних матеріалів [149-150].

Запропоновані рівняння, в основі яких лежить принцип Ешеблі [151], дозволяють розрахувати пружні константи для різних полімерних матеріалів при низькій і середній кристалічності матеріалів. Однак, як показують дослідження, результати яких опубліковані в роботах [152, 153], значення цих пружних постійних сильно завищено.

В роботах [153, 154] показано, що рівняння Кернера та інші вирази, отримані на основі цих рівнянь, дозволяють визначати модуль пружності в загальному вигляді.

В роботах [142, 155] були отримані ще більш узагальнені вирази:

$$\frac{X}{X_k} = \frac{1 + A \cdot B \cdot \chi_k}{1 - B \cdot \psi \cdot \chi_k}, \quad (1.1)$$

де  $X$  – модуль пружності полімеру (зсувний, при розтягу-стиску або об'ємний);  $A$ ,  $B$ ,  $\psi$  – константи;  $X_k$  – модуль пружності кристалічної області;  $\chi_k$  – ступінь кристалічності.

В роботах [156, 157] представлена ще одна модель, що описує зміну властивостей полімерних матеріалів при дії напружень розтягу. Недоліком цієї моделі є те, що, у зв'язку з прийнятими припущеннями про лінійну залежність пружних постійних від об'єму кристалічної області, визначення властивостей полімерного матеріалу недостатньо точні. Тому ця модель не дозволяє повною мірою описувати зміну структури полімерного матеріалу, що відбувається при його переробці, а саме при витягуванні, стисканні та зсуві.

Останнім часом для моделювання властивостей полімерного матеріалу в орієнтованому і неорієнтованому станах під впливом силового, температурного та інших полів використовується складена модель [140]. Згідно з цією моделлю (рис. 1.30), структура полімерного матеріалу моделюється багатокомпонентним композиційним середовищем. Особливістю цієї моделі є те, що вона моделює неорієнтований полімерний матеріал як систему пружних елементів анізотропної структури з такими ж фізико-механічними властивостями, як у орієнтованого полімеру. Значення пружних постійних усереднюються на основі припущення про однорідність напружень та деформацій в кожному елементі цієї моделі. Перше припущення дозволяє сумувати коефіцієнти піддатливості (рис. 1.30 а), а друге дає можливість сумувати модулі пружності (рис. 1.30 б) усіх елементів моделі.

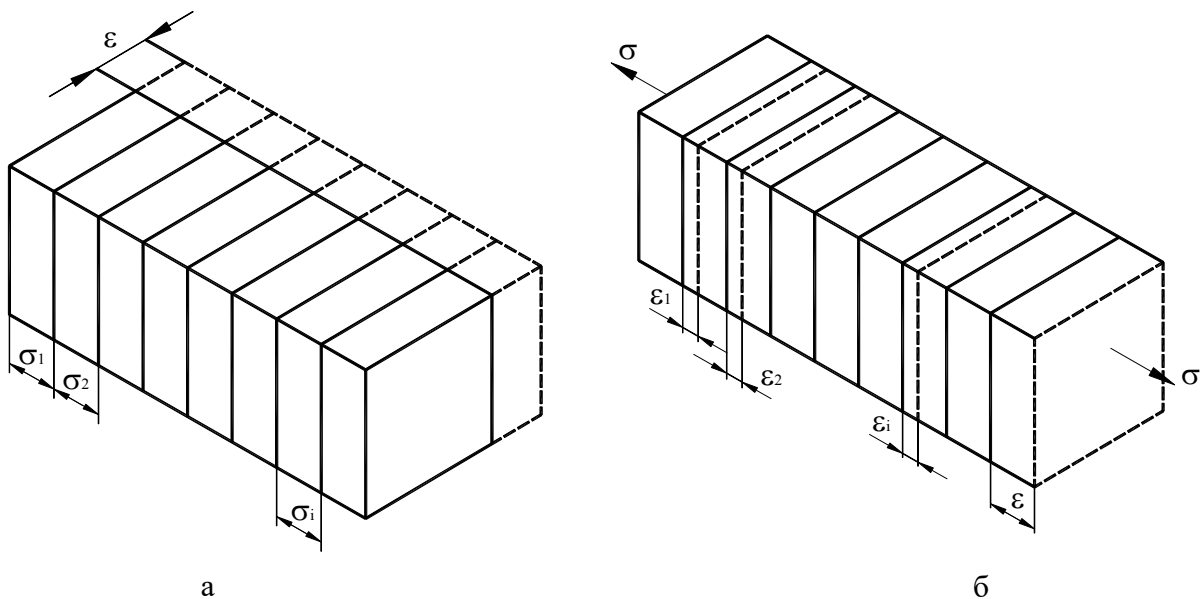


**Рис. 1.30. Складена модель полімерних матеріалів:**  
**а – однорідного напруження; б – однорідної деформації**

Оскільки головні вісі дії напружень та деформацій для анізотропного середовища не збігаються, то усереднення пружних постійних вимагає додаткових припущень для цієї моделі. Так, у випадку однорідності напружень деформації неоднорідні, і навпаки, при однорідних деформаціях напруження неоднорідні. В цьому випадку автори моделі приймають, що кожний окремий шар є анізотропним пружним середовищем, у якому є площина ізоотропії, що поперечна до напрямку деформацій. Напрямок пружної симетрії кожного елемента моделі визначається кутом  $\varphi$  між напрямками пружної симетрії і діючого в полімері напруження. При дії однорідного напруження деформацію кожного шару вздовж головної вісі  $x_1$  розраховують за таким виразом:

$$\varepsilon_1^i = \sigma_1 (S_{11} \sin^4 \varphi + S_{33} \cos^4 \varphi + (2S_{13} + S_{44}) \cdot \sin^2 \varphi \cdot \cos^2 \varphi), \quad (1.2)$$

де  $S_{11}$ ,  $S_{33}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{44}$  – коефіцієнти піддатливості шарів, що відповідають орієнтованому стану полімерного матеріалу.

Середнє значення деформації всього полімерного матеріалу визначається таким чином:

$$\varepsilon_1 = \sum_{i=1}^N \varepsilon_1^i / N = \sum_{i=1}^N \sigma_1 (S_{11} \sin^4 \varphi + S_{33} \cos^4 \varphi + (2S_{13} + S_{44}) \cdot \sin^2 \varphi \cdot \cos^2 \varphi) / N, \quad (1.3)$$

де  $N$  – кількість шарів полімерного матеріалу.

Якщо полімерний матеріал неорієнтований, тобто система статично збалансована, то середнє значення піддатливості, що визначається вздовж напрямку дії прикладеного до полімеру навантаження, запишеться в такий спосіб:

$$\bar{S}_{11} = \varepsilon_1 / \sigma_1 = (8/15) \cdot S_{33} + (1/5) \cdot S_{11} + 2/15 \cdot (2S_{13} + S_{44}). \quad (1.4)$$

При однорідній деформації модель структури полімеру представляється як набір з  $N$  елементів, які утворюють складену модель (рис. 1.30 б). Дослідження напруженого стану полімерного матеріалу дозволяють визначати пружні властивості для статичної системи, що є моделлю ізотропного неорієнтованого полімеру:

$$\bar{C}_{11} = \sigma_1 / \varepsilon_1 = (8/15) \cdot C_{33} + (1/5) \cdot C_{11} + (4/15) \cdot C_{13} + 2C_{44}. \quad (1.5)$$

Піддатливість при зсуві  $S_{44}$  і модуль зсуву  $C_{44}$  для ізотропного неорієнтованого полімеру можуть бути визначені аналогічно до (1.4) та (1.5):

$$\bar{S}_{33} = \frac{14}{15} S_{11} - \frac{2}{3} S_{12} - \frac{8}{15} S_{13} + \frac{4}{15} S_{33} + \frac{2}{5} S_{44}, \quad (1.6)$$

$$\bar{C}_{44} = \frac{7}{30} C_{11} - \frac{1}{6} C_{12} - \frac{2}{15} C_{13} + \frac{1}{15} C_{33} + \frac{2}{5} C_{44}. \quad (1.7)$$

В результаті аналізу застосування залежностей (1.6) та (1.7) для полімерних матеріалів встановлено, що експериментально визначені значення коефіцієнта піддатливості лежать між розрахованими за допомогою згаданих виразів граничними значеннями, а для деяких полімерних матеріалів виміряні значення коефіцієнта піддатливості взагалі виходять за межі цих граничних значень [157].

Основним недоліком представлених вище моделей зміни структури полімерів під впливом силових полів є те, що вони не враховують взаємозв'язок між кристалічними і аморфними елементами полімерного матеріалу.

Спроби пов'язати аморфні та кристалічні області полімерного матеріалу привели до створення моделі полімеру як двокомпонентного композитного середовища із трансверсально-ізотропною матрицею надмолекулярних структур [143-145, 158], що являють собою сукупність закристалізованих макромолекул. У цій математичній моделі припускається, що залежність модуля пружності  $E$  від кристалічності  $\chi$  є лінійною. З позиції механіки композитних матеріалів, для цієї моделі одержані рівняння, що пов'язують теплофізичні та механічні властивості полімеру зі ступенем його кристалічності. У випадку нелінійної залежності пружних постійних від кристалічності полімеру така модель не дає можливості описати поведінку полімеру залежно від ступеня його витягування та зміни його структури.

В роботі [139] представлена модель фібрилярної структури орієнтованого полімерного матеріалу (рис. 1.31). Ця модель базується на припущенні, що кристалічна область полімерного матеріалу містить орієнтовані вздовж вісі витягування голкоподібні елементи, модулі пружності яких дорівнюють модулям пружності кристалічних областей (кристалів)  $E_k$ , поміщених в аморфне середовище з модулем пружності другого роду  $G_a$ .

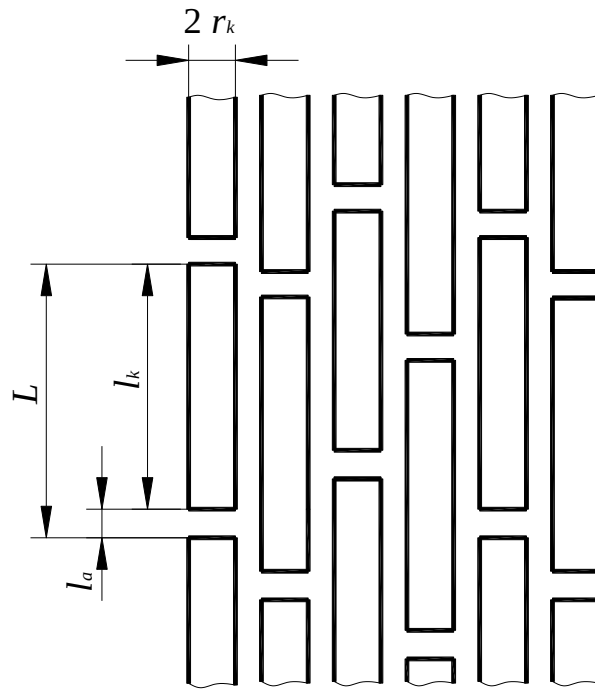


**Рис. 1.31. Модель фібрилярної структури полімерів**

Для структурної моделі (рис. 1.31) модуль пружності в напрямку вісі витягування визначається з такого виразу:

$$E = E_k \cdot \chi_k \cdot (1 - \operatorname{tg} x / x) + G_a (1 + \chi_k) . \quad (1.8)$$

де  $\chi_k$  – ступінь кристалічності;  $E_k$  – модуль пружності кристалів;  $G_a$  – модуль зсуву аморфного середовища.

Невідома величина  $x$  розраховується з такого виразу:

$$x = l_k / r_k \cdot \left[ G_a / (E_k \ln 2\pi \cdot (3\chi_k)^{-0,5}) \right]^{0,5} , \quad (1.9)$$

де  $l_k$ ,  $r_k$  – відповідно, довжина та радіус голки.

В результаті підстановки в рівняння (1.9) експериментальних значень модуля пружності кристалів  $E_k$  і модуля зсуву аморфного середовища  $G_a$  отримано значення невідомої величини  $x$ , яке виявилось пропорційною величині  $\lambda^{3/2}$  ( $\lambda$  – ступінь витягування). При чому ця пропорційність зберігається при значеннях ступеня витягування  $\lambda$  від 1 до 40.

Аналіз рівнянь (1.8) та (1.9) показує, що при змінні ступеня витягування в межах від 1 до 40 відношення  $l_k / r_k$  також має змінюватися в широких межах. Тобто, при ступені витягування  $\lambda = 10$ , згідно з моделлю (1.8)-(1.9) довжина

елементів збільшиться в 5 разів, а діаметр збільшиться в 1,5 раза, що є суперечливим, оскільки співвідношення між модулем пружності кристалічної області  $E_k$  і модулем зсуву аморфного середовища  $G_a$  становить 30...500 [159]. Крім того, цією математичною моделлю не обмежується зростання періоду  $L$ , що не узгоджується з результатами досліджень, наведених у роботах [117, 118, 159], згідно з якими зростання періоду  $L$  обмежується ступенем витягування  $\lambda = 5...9$ , а подальше подовження відбувається за рахунок пластичної деформації фібрил.

Таким чином, запропонована модель (рис. 1.31) не описує двохвісьову орієнтацію полімеру та перехід його від неорієнтованого стану до орієнтованого.

Однією з найбільш точних структурних моделей полімерного матеріалу є модель, що розроблена в роботі [117] і вдосконалена в роботах [110-155]. За допомогою цієї моделі можна описати перетворення ламелярної будови полімерного матеріалу на фібрилярну (рис. 1.32).

Ламелярна структура (рис. 1.32 а) утворена ламелями товщиною  $\approx 2 \cdot 10^{-2}$  мкм і шириною  $\approx 1$  мкм. Фібрилярна структура (рис. 1.32 б) утворена фібрилами, що мають довжину  $\approx 1...3$  мкм при досить малому діаметрі  $\approx 10^{-2}$  мкм. Паралельне розташування ламелей утворює сітку з періодом  $L \approx 2 \cdot 10^{-2}$ , що являє собою суму довжин кристалічного компонента  $l_k$  та аморфного середовища  $l_a$  для кожної ламелі:  $L = l_k + l_a$ .

Поверхневий шар, що являє собою аморфну область полімеру, містить складені ланцюги 1, їх кінці 2 та прохідні ланцюги 3. Деякі складені ланцюги можуть бути дуже короткими, а деякі – дуже довгими. Певна кількість складених ланцюгів повертається в кристалічну область не одразу, а через декілька складень. Частка прохідних ланцюгів 3 становить близько одного відсотка від загальної кількості ланцюгів у кристалі. В поперечному напрямку до орієнтації ламелей не спостерігається будь-яких суттєвих дефектів кристалічної області. В фібрилах спостерігається чергування кристалічних та аморфних областей з періодом  $L$ . Фібрили об'єднуються в пучки, що майже не відрізняються один від одного орієнтацією кристалічних областей та ступенем витягування.

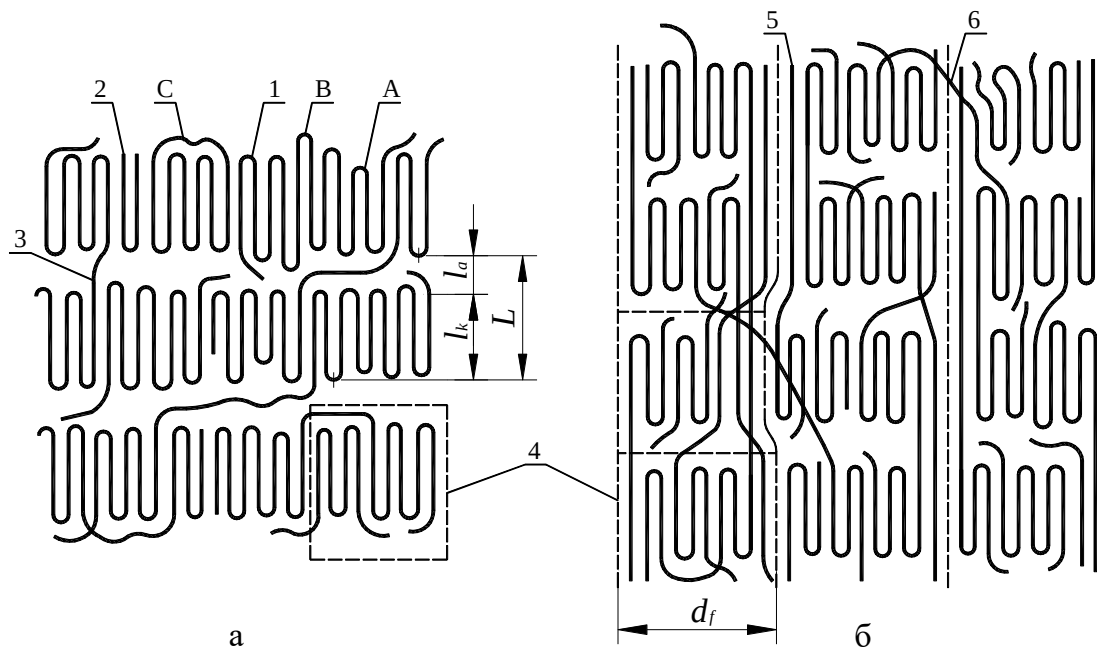


**Рис. 1.32. Модель пакування паралельних ламелей (а)  
та орієнтованих фібрил (б)**

В процесі розтягу полімерного матеріалу, згідно з цією моделлю, кристалічні області зі складеними ланцюгами 4 висувуються з набору паралельно розташованих ламелей. Внаслідок цього відбувається часткове розгортання прохідних ланцюгів, що з'єднують кристалічні області однієї й тієї ж ламелі, утворюючи велику кількість перенапружених фібрилярних ланцюгів. Значна кількість розгорнутих прохідних ланцюгів розміщується на зовнішній межі фібрили, де разом зі складеними ланцюгами утворюють шар. У результаті прохідні ланцюги, що зв'язували ламелі, тепер зв'язують фібрили, а отже діють як міжфібрилярні прохідні ланцюги. Кристалічні області 4 (рис. 1.32 а) з'єднані прохідними ланцюгами 5 всередині фібрили і міжфібрилярними прохідними ланцюгами – між сусідніми фібрилами.

Представлена вище структурна модель полімерного матеріалу (рис. 1.32) коректно описує зміну його структури при невеликих ступенях витягування  $\lambda = 2 \dots 10$ . Подальший розтяг приведе до пластичної деформації фібрилярної структури, що може бути описана зсувом фібрил.

Згідно з цією моделлю, що враховує неоднорідність напружень в кристалічних областях, модуль пружності визначається таким чином:



$$E = E_k \frac{\beta + (1 - \beta) \cdot E_a / E_k}{1 - (l_k / L)(1 - \beta)(1 - E_a / E_k)} \approx E_k \beta \cdot (1 - \chi) , \quad (1.10)$$

де  $E_k$ ,  $E_a$  – модулі пружності, відповідно, кристалічної області та аморфного середовища в напрямку витягування;  $\beta$  – частка аморфного середовища в полімерному матеріалі, що містить прохідні ланцюги;  $\chi$  – ступінь кристалічності;  $l_k$  – товщина кристалічних областей;  $L$  – період чергування кристалічних та аморфних областей.

Вираз (1.10) дає точні результати при невеликих ступенях витягування  $\lambda = 2 \dots 4$ . При більшому ступені витягування  $\lambda = 5 \dots 10$  використовують таке рівняння:

$$E = E_k [\beta + (1 - \beta) / (1 + (l_k / L) \cdot (E_k / E_a - 1))] . \quad (1.11)$$

Розглянута модель найбільш адекватно описує пружні властивості розтягнутого полімеру та їх зміну при дії механічних та теплових напружень. Але вона не дозволяє спостерігати за зміною структури полімерного матеріалу, що відбувається при його витягуванні.

В роботах [140, 160, 161] представлена структурна модель полімерних матеріалів у неорієнтованому стані, в якій кристалічні області моделюються сферолітами.

Згідно з цією моделлю, кристалічні полімери - це, як правило, лінійні полімери з регулярними ланцюгами, які в неорієнтованому стані зазвичай утворюють сфероліти. Сфероліти виникають у результаті тривимірного зростання, коли кристалізація йде так швидко, що лінійний або двовимірний зародок не встигає перетворитися на фібрилярний або ламелярний кристал [140]. Швидка кристалізація полімерних матеріалів характерна для лиття під тиском.

Сферолітна структура складається з променів сфероліта, в яких чергуються кристалічні та аморфні області, з основної аморфної фази між променями сфероліта і з міжфазного шару. Полімерні ланцюги при кристалізації утворюють ламелі (рис. 1.33, а). У променях сферолітів ламелі складаються так, що ланцюги

розташовуються перпендикулярно до напрямку променів. Полімерні кристали є лише складовою частиною сферолітів.

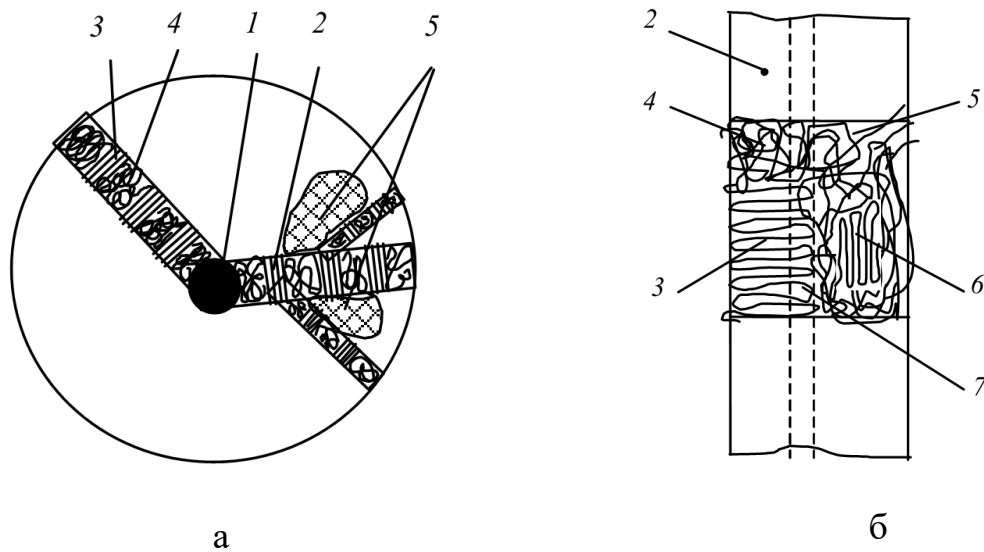


**Рис. 1.33. Схема структурних складових кристалічних полімерів:**  
**1 – зародження кристалізації; 2 – промені сфероліта; 3 – кристалічна область променя (ламель); 4 – аморфна область променю; 5 – аморфна фаза;**  
**6 – кристалічна фаза; 7 – міжфазовий шар; а – сферолітна структура;**  
**б – елементи структури сфероліта**

Найчастіше у фібрилярних сферолітах кристали є складовою частиною променів, в яких вони чергуються з аморфним середовищем, що складається з прохідних ланцюгів. Іноді бувають полімерні матеріали сферолітної будови, в яких в променях сферолітів аморфна область майже відсутня, тоді ці промені можна вважати послідовністю ламелей, закручених навколо вісі променю. В цьому випадку утворюються так звані кільцеві сфероліти [162].

Структурні елементи в сфероліті можуть бути представлені схемою Пакула, Плюта, Крішевського (рис. 1.33, а), яку в подальшому уточнив Ягфаров (рис. 1.33, б). За Ягфаровим [163], кристалічна фаза представлена кристалічними областями променів сфероліта – ламелями, аморфна фаза представлена міжпроменевими і внутрішньо променевими областями, а неупорядкована частина представлена міжфазним шаром [161].

Після утворення ламелей в аморфній фазі залишаються прохідні ланцюги, кінці ланцюгів і петлі. Прохідні ланцюги є в променях сферолітів, вони

з'єднують сусідні кристали, перебуваючи в основній аморфній фазі. Петлі і кінці ланцюгів знаходяться в міжфазному шарі. Прокідні ланцюги в основній аморфній фазі не мають можливості складатися, але вони можуть агрегуватися із сусідніми ланцюгами, утворюючи бахромчасті міцели кристалічної фази.

Полімери, що використовуються в легкій промисловості, в більшості є аморфно-кристалічними [164-172]. За структурою аморфно-кристалічні полімери схожі з наповненими, де роль кристалів відіграє наповнювач, який гальмує зростання розривів і збільшує жорсткість аморфної матриці.

Така структурна модель дозволяє описати структуру полімерних матеріалів сферолітної будови, але не дає можливості визначати пружні постійні полімерних матеріалів під впливом механічних та теплових напружень.

Таким чином, розглянуті структурні моделі полімерних матеріалів не дають можливості повною мірою описати зміну структури полімерів під впливом силових, температурних та інших полів. У зв'язку з цим потрібно розробити структурну модель полімерного матеріалу, яка дозволить моделювати зміну структури полімеру під впливом механічних та теплових напружень і, відповідно, спостерігати за зміною фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів. На основі такої моделі слід розробити методи, які дозволять визначати мінімальні деформації, при яких полімерний матеріал руйнується, а це у свою чергу дасть можливість проектувати обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості.

## **Висновки до розділу 1**

У результаті проведеного огляду наукових праць, присвячених технологічному обладнанню для механічної переробки полімерних відходів, обладнанню для виробництва наповнених полімерних виробів легкої промисловості та сучасним структурним моделям полімерних матеріалів, встановлено таке:

1. Обладнання для механічної переробки полімерних відходів легкої промисловості сьогодні недостатньо, в основному на ринку пропонують обладнання виключно для переробки поліетилену або поліетилетерефталату, але в більшості випадків і це обладнання запозичене з інших галузей промисловості.

2. Обладнання із закріпленими робочими органами є найбільш ефективним для переробки полімерних відходів. Ефективність роботи такого обладнання характеризується потужністю приводу, формою та розмірами робочих органів, тому при проектуванні обладнання із закріпленими робочими органами слід враховувати фізико-механічні властивості полімерного матеріалу, геометрію робочих органів та динаміку їх взаємодії з матеріалом.

3. Обладнання для отримання полімерних виробів легкої промисловості литтям під тиском дозволяє використовувати перероблені полімерні відходи без суттєвих втрат експлуатаційних властивостей цих виробів. Крім того, використання частинок перероблених полімерних відходів, які мають анізотропію фізико-механічних характеристик, дозволяє підвищити експлуатаційні властивості виробів легкої промисловості, отриманих литтям під тиском.

4. Розробка сучасного перероблювального обладнання здійснюється без урахування зміни фізико-механічних властивостей полімеру в процесі впливу на нього робочих органів обладнання. В результаті цього основними недоліками процесу переробки полімерних відходів наявним обладнаннями є: значні витрати енергії, що зумовлені руйнуванням кристалітів; низька продуктивність, внаслідок швидкого зношування робочих органів під дією сил тертя і удару; суттєве зниження експлуатаційних властивостей переробленого полімеру; неможливість подрібнення полімерних відходів на частинки з орієнтованою структурою, а, отже, їхнього подальшого використання як наповнювача при виробництві полімерних виробів легкої промисловості.

5. Сучасні моделі структури полімерного матеріалу не дають можливості повною мірою описати зміну фізико-механічних властивостей полімерів під впливом механічних і теплових полів, що генеруються робочими органами перероблювального обладнання.

У зв'язку з цим, метою дисертаційного дослідження є розробка наукових основ проектування обладнання для переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості.

Для досягнення поставленої мети розв'язувались такі завдання:

1. Розвинути наукові підходи до проектування технологічного обладнання для переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості.
2. Розвинути структурну модель полімерного матеріалу, яка дозволить описати формування фізико-механічних характеристик полімеру внаслідок дії на нього робочих органів технологічного обладнання.
3. Розробити модель напружено-деформованого стану полімерного матеріалу при впливі на нього механічного і теплового полів, що генеруються перероблювальним обладнанням.
4. Розробити метод проектування обладнання для перетворення полімерних відходів на частинки із орієнтованою структурою та анізотропними фізико-механічними властивостями.
5. Визначити раціональні конструктивні параметри робочих органів технологічного обладнання та ефективні режими переробки полімерних відходів, при яких створюється гранична деформація, що забезпечує високу орієнтацію структури полімерних відходів та їх руйнування.
6. Експериментально визначити вплив конструктивних параметрів перероблювального обладнання та технологічних режимів його роботи на питому потужність, що витрачається для утворення одиниці вільної поверхні перероблених полімерних відходів.
7. Розробити конструкцію прес-форми та спроектувати пристрій для подачі частинок полімерних відходів у впускний канал прес-форми з метою отримання підшви із суміші розплаву полімеру і частинок перероблених полімерних відходів методом лиття під тиском.
8. Визначити вплив концентрації та орієнтації частинок різної форми і розмірів на експлуатаційні властивості підшов відносно напрямку дії навантажень.

## РОЗДІЛ 2

### МОДЕЛЬ ЗМІНИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРУ ПІД ВПЛИВОМ МЕХАНІЧНОГО ТА ТЕПЛОВОГО ПОЛІВ

Розробка обладнання для переробки полімерних відходів вимагає створення структурної моделі полімеру, яка дозволяє простежити за змінами фізико-механічних властивостей полімеру під впливом напружено-деформованого стану, що створюється робочими органами перероблювального обладнання.

Будемо представляти полімерний матеріал у вигляді певної композитної структури, що складається з кристалічних та аморфних надмолекулярних утворень. Використання різноманітних методів досліджень суцільного анізотропного середовища дозволить якісно та кількісно описати процес зміни фізико-механічних характеристик певного полімерного матеріалу під дією механічного та температурного полів, що генеруються перероблювальним обладнанням.

#### 2.1. Структурна модель недеформованих полімерів

З роботи [117] відомо, що полімер руйнується в першу чергу по границях структурних утворень, тому спочатку розглянемо будову надмолекулярної структури полімеру.

Аналіз підходів до питання про організацію макроструктури полімеру [117, 160] та врахування того факту, що більшість полімерних виробів легкої промисловості отримують литтям під тиском (58 % від усіх виробів), дозволяє сформулювати уявлення про будову полімерних матеріалів.

Наявність великої кількості різних надмолекулярних утворень, що виникають залежно від різних умов отримання і переробки полімерів, не дозволяє сьогодні описати в рамках однієї моделі механічні властивості полімерів. Звідси основна ідея нашої роботи – модельна фіксація надмолекулярної структури полімеру, що змінюється при деформації.

Без сумніву, найбільш зручним об'єктом для вивчення структурних перетворень, що відбуваються у полімерах при їх деформації, є монокристали (рис. 2.1 а). Однак основним і найбільш поширеним структурним утворенням сьогодні є полімер сферолітної будови (рис. 2.1 б).

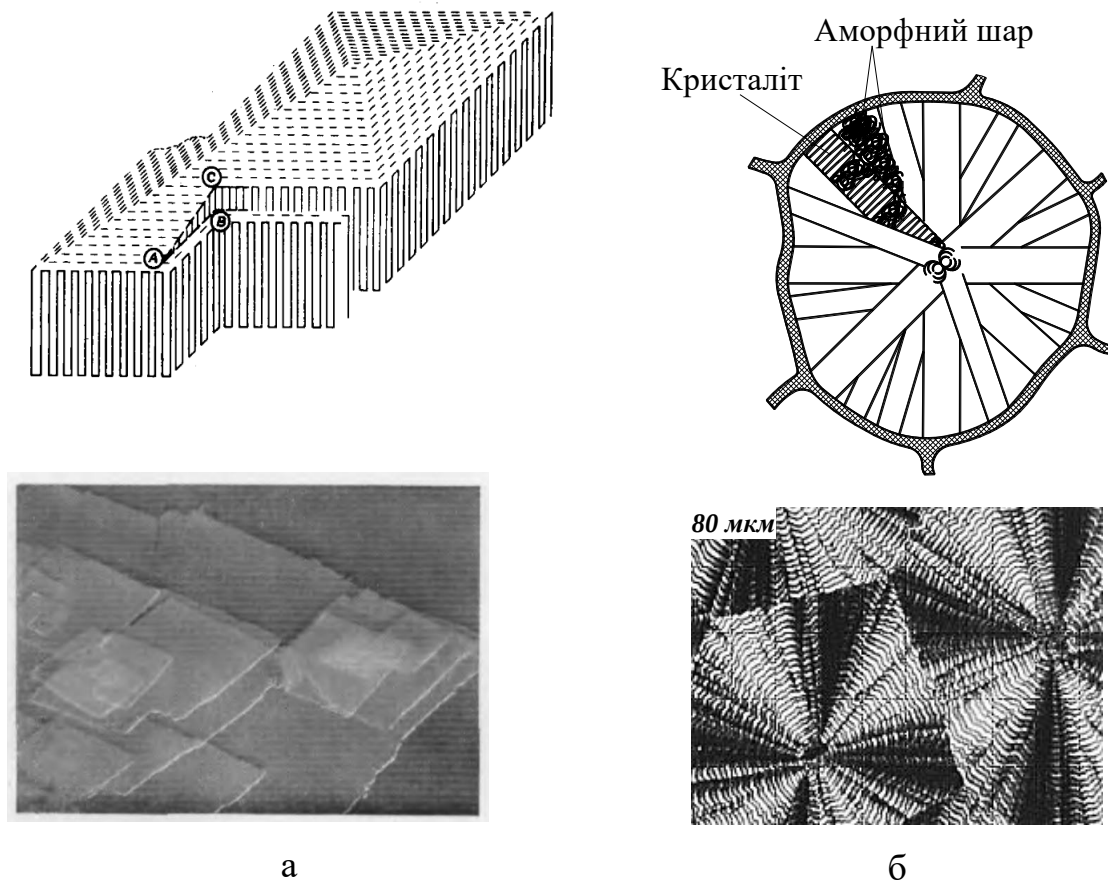


**Рис. 2.1. Структурна модель будови полімерного матеріалу:  
а – монокристал; б – сфероліт**

Структурна модель сферолітної будови полімеру (див. рис. 2.1 б) складається з двох взаємопов'язаних моделей, що описують два стани надмолекулярної структури полімерів: до деформації – модель неорієнтованої сферолітної структури; після деформації – модель орієнтованої сферолітної структури полімеру. Розглянемо структурну модель стану полімеру до його деформації – модель неорієнтованої сферолітної структури полімеру. Структура неорієнтованого полімеру сферолітної будови відображає стан полімерного матеріалу, отриманого в результаті його формування в прес-формі.

У процесі лиття під тиском полімерних виробів [173-177] з метою уникнення утворення усадки після заповнення прес-форми, виріб деякий час необхідно підживлювати полімером, у результаті цього ступінь орієнтації структури полімерного матеріалу знижується. Отже, всі полімерні вироби легкої промисловості, що були отримані литтям під тиском, мають неорієнтовану структуру. Тому, для можливості повторного використання полімерних відходів легкої промисловості, необхідно певним чином змінити їх структуру. Моделювання зміни структури неорієнтованого полімерного матеріалу під впливом механічного і температурного полів представлено в наступних підрозділах.

Модель сферолітної структури полімеру може бути представлена як необмежене в'язкопружне ізотропне середовище [158, 178-180], що складається зі сферолітної структури, поміщеної в однорідну аморфну матрицю. При побудові моделі були прийняті такі припущення: сфероліти мають однакову форму (сферичну) та розміри; сфероліти розташовані в кутах просторової решітки [158, 178, 179]; все кристалічне середовище полімеру зосереджене у сферолітах (рис. 2.2).

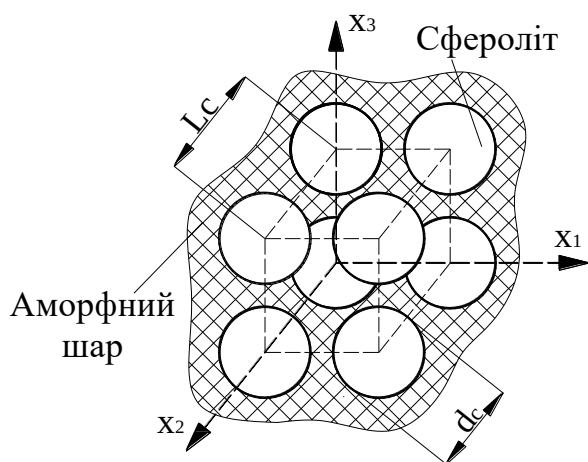


**Рис. 2.2. Модель сферолітної структури полімерного матеріалу**

Для побудови теорії ефективних модулів сферолітної структури в першому наближенні першорядного значення набувають: визначення відносного об'ємного наповнення середовища сферолітами  $\xi$ , розмірів сферолітів, що мають форму сфери діаметром  $d_c$ ; вид упаковки  $\mu$  і циклічна симетрія в його структурі.

Як характеристику, що визначає ймовірний тип просторової решітки, а також форму і тип сферолітів, будемо використовувати показник ступеня об'ємної кристалічності полімерного матеріалу [178-180].

$$\chi = (\rho - \rho_a) / (\rho_c - \rho_a), \quad (2.1)$$



де  $\rho$  – щільність зразка;  $\rho_a$ ,  $\rho_c$  – відповідно, щільність аморфної та кристалічної фази полімеру (можуть бути визначені за допомогою рентгеноструктурного аналізу).

Враховуючи припущення, що вся кристалічна частина полімеру зосереджена у сферолітах, які складаються з ламелярних кристалічних областей, що чергуються, і міжламелярних аморфних прошарків (рис. 2.1 б) [101, 145, 188], можна припустити, що ступінь об'ємної кристалічності  $\chi$  пов'язана з відносним об'ємом наповнення середовища сферолітами  $\xi$  та коефіцієнтом компактності просторової решітки  $\mu$  [181].

$$\xi = \chi^2 = k^2 \cdot \mu, \quad (2.2)$$

де  $k = d_c/L_c$  – коефіцієнт щільності упаковки матеріалу сферолітами ( $0 \leq k \leq 1$ );  $L_c$  – відстань між центрами сферолітів. Коефіцієнт компактності просторової решітки, в кутах якої розташовані сфероліти, визначається її видом. Так, вираз  $\mu = \pi/6$  – відповідає найпростішій кубічній решітці;  $\mu = \pi/3$  – об'ємноцентрованої кубічній решітці;  $\mu = 2\pi/3$  – гранецентрованої кубічній решітці;  $\mu = \sqrt{2}\pi/6$  – гексагональній структурі кубічної решітки.

Зрозуміло, що найбільш щільній упаковці сфер, радіусом  $d_c/2$ , а отже граничному заповненню просторової решітки, відповідає така структура, коли сфери дотикаються одна до одної, тобто при  $d_c = L_c$ . В такому випадку  $k = 1$ , а  $\xi = \chi^2 = \mu$ .

Завданням нашого моделювання сферолітної надмолекулярної структури полімерного матеріалу є визначення ступеня впливу фізико-механічних властивостей полімеру і його напружено-деформованого стану на вид просторової решітки і форму та розміри сферолітів, що дасть змогу прогнозувати зміну форми просторової решітки, в кутах якої розташовані сфероліти, та форму і розміри самих сферолітів при будь-якій деформації полімеру сферолітної будови.

Отримані в результаті побудови моделі закономірності впливу в'язкопружних постійних на форму і розміри сферолітів та на вид їх взаємного

розташування можна буде використати при побудові моделі сферолітної структури, що формується в процесі витягування полімерів.

У зв'язку з викладеним вище розглянемо напружено-деформований стан сферичної кристалічної фази, що знаходиться в ізотропному необмеженому аморфному середовищі, яке піддається розтягу вздовж вісі  $x_3$  (рис. 2.3).

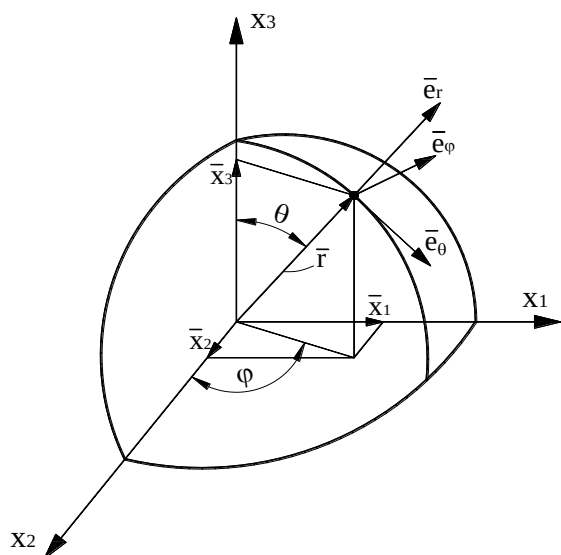


**Рис. 2.3. Схема напружено-деформованого стану сфероліту в структурі полімеру**

Припустивши, що аморфна та кристалічна область полімеру є ізотропним середовищем, а також, що сфероліти упаковані в гексагональну решітку і між ними діють невідомі однорідні напруження взаємодії, будемо вирішувати задачу в криволінійній системі координат  $(q^1, q^2, q^3)$ , що пов'язана з міжфазною границею середовища, а початок координат розташований у центрі сфероліта.

Як відомо з [181], вектори основного локального базису криволінійної системи координат визначають за формулою:

$$\bar{e}_i = \partial \bar{r} / \partial q^i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.3)$$

$i$  є дотичними до координатних ліній  $q^i$ , що проходять через точку  $\bar{r} = \bar{r}(q^1, q^2, q^3)$ . Координати  $q^1, q^2, q^3$  однозначно визначають вектор  $\bar{r}$  в криволінійній системі координат, а координати  $x_1, x_2, x_3$  однозначно визначають цей вектор у декартовій системі координат (рис. 2.3). Декартові координати  $x_i$  та криволінійні  $q^i$  можуть мати різну розмірність, тобто компоненти базису криволінійної та декартової системи координат можуть бути різними.

Для врахування цього необхідно визначити довжини відповідних векторів локального основного базису криволінійної системи координат:

$$H_\nu = \sqrt{(\partial x_1 / \partial q^\nu)^2 + (\partial x_2 / \partial q^\nu)^2 + (\partial x_3 / \partial q^\nu)^2}, \quad \nu = 1, 2, 3 \quad (2.4)$$

і розділити на них ці вектори, тобто:

$$\vec{e}_{(\nu)} = \vec{e}_\nu / H_\nu. \quad (2.5)$$

Локальний базис з одиничних векторів  $\vec{e}_{(\nu)}$  у науковій літературі називають “фізичним” базисом, а його використання є дуже зручним при розв’язуванні фізичних задач.

Оскільки сфероліт має форму шару, то будемо використовувати сферичну систему координат, яка є окремим випадком криволінійної системи координат. Відтак, положення вектора  $\vec{r}$  однозначно будуть визначати сферичні координати  $r, \theta, \varphi$ . З рис. 2.3 визначимо декартові координати  $x_1, x_2, x_3$  вектора  $\vec{r}$  через сферичні координати  $r, \theta, \varphi$ .

$$x_1 = r \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi, \quad x_2 = r \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi, \quad x_3 = r \cdot \cos \theta, \quad (2.6)$$

при цьому  $0 \leq r < \infty, 0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$ .

Використовуючи рівняння (2.3) та вирази (2.6), розкладемо одиничні вектори сферичної системи координат за ортами декартової системи координат.

$$\begin{aligned} \vec{e}_r &= \sin \theta \sin \varphi \cdot \vec{e}_1 + \sin \theta \cos \varphi \cdot \vec{e}_2 + \cos \theta \cdot \vec{e}_3, \\ \vec{e}_\theta &= r \cdot \cos \theta \sin \varphi \cdot \vec{e}_1 + r \cdot \cos \theta \cos \varphi \cdot \vec{e}_2 - r \sin \theta \cdot \vec{e}_3, \\ \vec{e}_\varphi &= r \cdot \sin \theta \cos \varphi \cdot \vec{e}_1 - r \cdot \sin \theta \sin \varphi \cdot \vec{e}_2 + 0 \cdot \vec{e}_3. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Приведемо розмірність компонентів базису криволінійної системи координат до розмірності вектора  $\vec{r}$  (або до розмірності базису декартових координат), тобто до одиниці. Для цього розділимо одиничні вектори сферичної системи координат на їх довжини (параметри Ламе  $H_\nu (\nu = 1, 2, 3)$ ), що визначаються з рівняння (2.4). В результаті система (2.7) перепишеться таким чином:

$$\begin{aligned} \vec{e}_{(r)} &= \sin \theta \sin \varphi \cdot \vec{e}_1 + \sin \theta \cos \varphi \cdot \vec{e}_2 + \cos \theta \cdot \vec{e}_3, \\ \vec{e}_{(\theta)} &= \cos \theta \sin \varphi \cdot \vec{e}_1 + \cos \theta \cos \varphi \cdot \vec{e}_2 - \sin \theta \cdot \vec{e}_3, \\ \vec{e}_{(\varphi)} &= \cos \varphi \cdot \vec{e}_1 - \sin \varphi \cdot \vec{e}_2 + 0 \cdot \vec{e}_3, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де  $e_{(\nu)} (\nu = 1, 2, 3)$  – приведений або “фізичний” базис. У подальшому дужки, що стоять біля індексу, будемо опускати.

Отже, ортогональна матриця переходу від декартового базису до сферичного запишеться таким чином:

$$\begin{aligned}\vec{e}_r &= a_{11} \cdot \vec{e}_1 + a_{12} \cdot \vec{e}_2 + a_{13} \cdot \vec{e}_3, \\ \vec{e}_\theta &= a_{21} \cdot \vec{e}_1 + a_{22} \cdot \vec{e}_2 + a_{23} \cdot \vec{e}_3, \\ \vec{e}_\varphi &= a_{31} \cdot \vec{e}_1 + a_{32} \cdot \vec{e}_2 + a_{33} \cdot \vec{e}_3,\end{aligned}\tag{2.9}$$

де  $a_{ij}$  – компоненти ортогональної матриці переходу від декартового базису до сферичного:

$$\begin{aligned}a_{11} &= \sin \theta \sin \varphi, & a_{12} &= \sin \theta \cos \varphi, & a_{13} &= \cos \theta, \\ a_{21} &= \cos \theta \sin \varphi, & a_{22} &= \cos \theta \cos \varphi, & a_{23} &= -\sin \theta, \\ a_{31} &= \cos \varphi, & a_{32} &= -\sin \varphi, & a_{33} &= 0.\end{aligned}\tag{2.10}$$

Зворотнє перетворення здійснюється за такими рівняннями:

$$\begin{aligned}\vec{e}_1 &= a_{11} \cdot \vec{e}_r + a_{21} \cdot \vec{e}_\theta + a_{31} \cdot \vec{e}_\varphi, \\ \vec{e}_2 &= a_{12} \cdot \vec{e}_r + a_{22} \cdot \vec{e}_\theta + a_{32} \cdot \vec{e}_\varphi, \\ \vec{e}_3 &= a_{13} \cdot \vec{e}_r + a_{23} \cdot \vec{e}_\theta + a_{33} \cdot \vec{e}_\varphi.\end{aligned}\tag{2.11}$$

Для визначення фізико-механічних властивостей (в'язкопружного модуля та коефіцієнта Пуассона) в напрямку вісі витягування полімеру (вісі  $x_3$ ) розглянемо випадок повздовжнього розтягу неорієнтованої сферолітної будови.

Під час розтягу в сфероліті виникає напружений стан, що згідно з діадним представленням [158, 182-184], можна описати таким чином:

$$\mathbf{T} = \vec{e}_x \vec{e}_x \sigma_{xx} + \vec{e}_y \vec{e}_y \sigma_{yy} + \vec{e}_z \vec{e}_z \sigma_{zz} + (\vec{e}_x \vec{e}_y + \vec{e}_y \vec{e}_x) \cdot \sigma_{xy} + (\vec{e}_y \vec{e}_z + \vec{e}_z \vec{e}_y) \cdot \sigma_{yz} + (\vec{e}_z \vec{e}_x + \vec{e}_x \vec{e}_z) \cdot \sigma_{zx},\tag{2.12}$$

де  $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$  – одиничні орти декартової системи координат;  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$  – нормальні напруження, що діють на площадках, перпендикулярних до відповідних вісей системи координат;  $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$  – тангенціальні (дотичні) напруження, що діють на тих же площадках.

Зорієнтуємо вісі координат таким чином, щоб на площадках елементарного об'єму, обмеженого сферичною поверхнею, тангенціальні напруження були відсутні. Тоді рівняння (2.12) перепишеться таким чином:

$$\mathbf{T} = \vec{e}_1 \vec{e}_1 \sigma_1 + \vec{e}_2 \vec{e}_2 \sigma_2 + \vec{e}_3 \vec{e}_3 \sigma_3,\tag{2.13}$$

де  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$  – одиничні орти декартової системи координат  $x_1, x_2, x_3$ ;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – напруження на головних площадках, перпендикулярних до відповідних вісей системи координат  $x_1, x_2, x_3$ .

Представимо кожне головне напруження як добуток середнього напруження  $\hat{\sigma}_3$ , що діє на сфероліт вздовж вісі  $x_3$ , та невідомих постійних  $\sigma^0$ , що характеризують рівень напружень однорідної взаємодії і рівень напружень на головних площадках.

$$\mathbf{T}^c = (\vec{e}_1 \vec{e}_1 \sigma_1^0 + \vec{e}_2 \vec{e}_2 \sigma_2^0 + \vec{e}_3 \vec{e}_3 \sigma_3^0) \hat{\sigma}_3, \quad (2.14)$$

Напруження взаємодії між сферолітами виникають у результаті зміни напружено-деформованого стану сферолітів.

У сферичних координатах (2.6) тензор напружень (2.14) можна виразити таким чином [158, 182-184]:

$$\mathbf{T}^c = (\vec{e}_r \vec{e}_r \sigma_r^0 + \vec{e}_\theta \vec{e}_\theta \sigma_\theta^0 + \vec{e}_\varphi \vec{e}_\varphi \sigma_\varphi^0 + (\vec{e}_r \vec{e}_\theta + \vec{e}_\theta \vec{e}_r) \cdot \sigma_{r\theta}^0) \hat{\sigma}_3, \quad (2.15)$$

Невідомі постійні  $\sigma^0$  у сферичних координатах виразимо через декартові підстановкою виразів (2.11) у рівняння (2.14)

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^c = & [\vec{e}_r \vec{e}_r (a_{11}^2 \sigma_1^0 + a_{12}^2 \sigma_2^0 + a_{13}^2 \sigma_3^0) + \vec{e}_\theta \vec{e}_\theta (a_{21}^2 \sigma_1^0 + a_{22}^2 \sigma_2^0 + a_{23}^2 \sigma_3^0) + \vec{e}_\varphi \vec{e}_\varphi (a_{31}^2 \sigma_1^0 + a_{32}^2 \sigma_2^0 + a_{33}^2 \sigma_3^0) + \\ & + (\vec{e}_r \vec{e}_\theta + \vec{e}_\theta \vec{e}_r) \cdot (a_{11} a_{21} \sigma_1^0 + a_{12} a_{22} \sigma_2^0 + a_{13} a_{23} \sigma_3^0) + (\vec{e}_r \vec{e}_\varphi + \vec{e}_\varphi \vec{e}_r) \cdot (a_{11} a_{31} \sigma_1^0 + a_{12} a_{32} \sigma_2^0 + a_{13} a_{33} \sigma_3^0) + \\ & + (\vec{e}_\theta \vec{e}_\varphi + \vec{e}_\varphi \vec{e}_\theta) \cdot (a_{21} a_{31} \sigma_1^0 + a_{22} a_{32} \sigma_2^0 + a_{23} a_{33} \sigma_3^0)] \cdot \hat{\sigma}_3. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Вище ми припустили, що сфероліти утворюють гексагональну просторову решітку. В мікроструктурі, що відповідає гексагональній упаковці, фізико-механічні властивості не залежать від обраного напрямку (є ізотропними), тому в прийнятому наближенні спрямуємо вісь  $x_3$  так, щоб напружений стан сферолітів не залежав від кута  $\varphi$ . У цьому випадку приймемо, що кут  $\varphi = 0$ , і з урахуванням виразів (2.10), отримаємо:

$$\mathbf{T}^c = [\vec{e}_r \vec{e}_r (a_{23}^2 \sigma_2^0 + a_{22}^2 \sigma_3^0) + \vec{e}_\theta \vec{e}_\theta (a_{22}^2 \sigma_2^0 + a_{23}^2 \sigma_3^0) + \vec{e}_\varphi \vec{e}_\varphi \sigma_1^0 + (\vec{e}_r \vec{e}_\theta + \vec{e}_\theta \vec{e}_r) \cdot (\sigma_3^0 - \sigma_2^0) \cdot a_{22} a_{23}] \cdot \hat{\sigma}_3. \quad (2.17)$$

Порівнявши отриманий вираз (2.17) з рівнянням (2.15), визначимо невідомі компоненти тензора напружень сфероліта:

$$\begin{aligned}\sigma_r^c &= (a_{23}^2 \sigma_2^0 + a_{22}^2 \sigma_3^0) \cdot \hat{\sigma}_3, & \sigma_\theta^c &= (a_{22}^2 \sigma_2^0 + a_{23}^2 \sigma_3^0) \cdot \hat{\sigma}_3 \\ \sigma_\varphi^c &= \sigma_1^0 \cdot \hat{\sigma}_3, & \sigma_{r\theta}^c &= (\sigma_3^0 - \sigma_2^0) \cdot a_{22} a_{23} \cdot \hat{\sigma}_3.\end{aligned}\quad (2.18)$$

Згідно з вирішенням задачі теорії пружності про вісесиметричний напружено-деформований стан сфери [158, 178, 183, 184], невідомі компоненти тензора напружень сфероліта визначимо таким чином:

$$\begin{aligned}\sigma_r^c &= -2 \cdot E_c \cdot A_0 - \frac{2 \cdot E_c}{1 + \nu_c} \cdot (3 \cdot A_2 \cdot \nu_c \cdot r^2 - B_2) \cdot P_2(\cos \theta), \\ \sigma_{r\theta}^c &= \left( \frac{E_c}{1 + \nu_c} \cdot (A_2 \cdot (2\nu_c + 7) \cdot r^2 + B_2) \right) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta}, \\ \sigma_\theta^c &= -2E_c \cdot A_0 - \frac{2E_c}{1 + \nu_c} (3A_2 \cdot r^2(7 + \nu_c) + 2B_2) \cdot P_2(\cos \theta) - \frac{E_c}{1 + \nu_c} (A_2 \cdot r^2(7 - 4\nu_c) + B_2) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} \operatorname{ctg} \theta, \\ \sigma_\varphi^c &= -2E_c \cdot A_0 - \frac{E_c}{1 + \nu_c} (30 \cdot A_2 \cdot \nu_c \cdot r^2 - 2B_2) \cdot P_2(\cos \theta) + \frac{E_c}{1 + \nu_c} (A_2 \cdot r^2(7 - 4\nu_c) + B_2) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} \operatorname{ctg} \theta.\end{aligned}\quad (2.19)$$

де  $E_c$  – модуль пружності сфероліта;  $\nu_c$  – коефіцієнт Пуассона сфероліта;  $P_0(\cos \theta)$ ,  $P_1(\cos \theta)$ ,  $P_2(\cos \theta)$  – поліноми Лежандра першого роду нульового, першого та другого порядку;  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_2$  – невідомі постійні, які знаходяться з граничних умов;  $r$  – радіус-вектор точки об'єму сфероліта.

Компоненти вектора переміщень для сфероліта виразимо у сферичній системі координат:

$$\mathbf{u}^c = \vec{\mathbf{e}}_r u_r^c + \vec{\mathbf{e}}_\theta u_\theta^c + \vec{\mathbf{e}}_\varphi u_\varphi^c. \quad (2.20)$$

Невідомі компоненти вектора переміщень сфероліта визначимо таким чином:

$$\begin{aligned}u_r^c &= A_0 \cdot r \cdot (-2)(1 - 2\nu_c) \cdot P_0(\cos \theta) + (A_1 \cdot r^2 \cdot 2 \cdot (-1 + 4\nu_c) + B_1) \cdot P_1(\cos \theta) + \\ &+ (A_2 \cdot r^3 \cdot 3 \cdot 4\nu_c + 2B_2 \cdot r) \cdot P_2(\cos \theta) = -2 \cdot (1 - 2\nu_c) \cdot A_0 \cdot r + 2 \cdot (A_2 \cdot r^3 \cdot 6\nu_c + B_2 \cdot r) \cdot P_2(\cos \theta), \\ u_\theta^c &= (A_0 \cdot r \cdot (5 - 4\nu_c) + B_0 \cdot r^{-1}) \cdot \frac{dP_0(\cos \theta)}{d\theta} + (A_1 \cdot r^2 \cdot (6 - 4\nu_c) + B_1) \cdot \frac{dP_1(\cos \theta)}{d\theta} + \\ &+ (A_2 \cdot r^3 \cdot (7 - 4\nu_c) + B_2 \cdot r) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} = (A_2 \cdot r^3 \cdot (7 - 4\nu_c) + B_2 \cdot r) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta}, \\ u_\varphi^c &= 0.\end{aligned}\quad (2.21)$$

Згідно з [158, 182], компоненти напруження в кожній точці аморфної області полімерного матеріалу можна представити таким чином:

$$\begin{aligned}
\sigma_r^a &= \frac{1}{3} \cdot Q + \frac{2 \cdot E_a}{1 + \nu_a} \cdot \frac{D_0}{r^3} + \left( \frac{2 \cdot E_a}{1 + \nu_a} \cdot \left( \frac{6 \cdot D_2}{r^5} - \frac{C_2}{r^3} \cdot (10 - 2\nu_a) \right) + \frac{2}{3} \cdot Q \right) \cdot P_2(\cos \theta), \\
\sigma_{r\theta}^a &= \left( \frac{2 \cdot E_a}{r^3} \cdot C_2 - \frac{4 \cdot E_a}{1 + \nu_a} \cdot \frac{D_2}{r^5} + \frac{1}{3} Q \right) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta}, \\
\sigma_\theta^a &= \frac{2}{3} Q - \frac{E_a}{1 + \nu_a} \frac{D_0}{r^3} - \left( \frac{2E_a}{1 + \nu_a} \frac{C_2}{r^3} (1 - 2\nu_a) - \frac{9E_a}{1 + \nu_a} \frac{D_2}{r^5} - \frac{2}{3} Q \right) \cdot P_2(\cos \theta) - \\
&\quad - \left( 2E_a \cdot \frac{C_2}{r^3} \cdot \frac{1 - 2\nu_a}{1 + \nu_a} + \frac{E_a}{1 + \nu_a} \cdot \frac{D_2}{r^5} \right) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} \cdot \operatorname{ctg} \theta, \\
\sigma_\phi^a &= -\frac{E_a}{1 + \nu_a} \frac{D_0}{r^3} + \frac{E_a}{1 + \nu_a} \left( \frac{C_2}{r^3} (10 - 20\nu_a) - \frac{3D_2}{r^5} \right) \cdot P_2(\cos \theta) + \\
&\quad + \frac{E_a}{1 + \nu_a} \left( \frac{C_2}{r^3} \cdot (2 - 4\nu_a) + \frac{D_2}{r^5} \right) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} \cdot \operatorname{ctg} \theta.
\end{aligned} \tag{2.22}$$

де  $E_a$  – в'язкопружний модуль аморфної матриці;  $\nu_a$  – коефіцієнт Пуассона аморфної матриці;  $Q$  – однорідне напруження взаємодії сферолітів;  $P_0(\cos \theta)$ ,  $P_2(\cos \theta)$  – поліноми Лежандра першого роду нульового та другого порядку;  $D_0$ ,  $D_2$ ,  $C_2$  – невідомі постійні, які знаходяться з граничних умов;  $r$  – радіус-вектор точки об'єму сфероліта.

Із системи рівнянь (2.22) видно, що напруження, які виникають у певній точці аморфної матриці, зменшуються із віддаленням від початку системи координат. Це пояснюється тим, що, деформуючись, сфероліт здійснює певний вплив на аморфну фазу полімеру, яка складається з прохідних мікрофібрил, що з'єднують сфероліти. Чим більша відстань від сфероліта до точки аморфної фази полімеру, тим менший вплив на неї здійснює деформація цього сфероліта.

Компоненти вектора переміщень для аморфної фази представимо так:

$$\mathbf{u}^a = \vec{\mathbf{e}}_r u_r^a + \vec{\mathbf{e}}_\theta u_\theta^a + \vec{\mathbf{e}}_\phi u_\phi^a. \tag{2.23}$$

Компоненти переміщення в кожній точці аморфної фази полімерного матеріалу можна представити таким чином:

$$\begin{aligned}
u_r^a &= \frac{1 - 2\nu_a}{E_a} \cdot \frac{Q \cdot r}{3} - \frac{D_0}{r^2} + \left( \frac{C_2}{r^2} \cdot (10 - 8\nu_a) + \frac{2(1 + \nu_a)}{E_a} \cdot \frac{Q \cdot r}{3} - \frac{3D_2}{r^4} \right) \cdot P_2(\cos \theta), \\
u_\theta^a &= \left( (1 - 2\nu_a) \cdot \frac{2C_2}{r^2} + \frac{1 + \nu_a}{E_a} \cdot \frac{Q \cdot r}{3} + \frac{D_2}{r^4} \right) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta}, \quad u_\phi^a = 0.
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Невідомі постійні  $A_0$ ,  $A_2$ ,  $B_2$ ,  $D_0$ ,  $D_2$ ,  $C_2$  можна визначити з умов ідеального контакту поверхонь сфероліта та аморфної матриці, що виникають у випадку дотику сферолітів, тобто при  $r = L_c/2 = a$ :

$$u_\theta^a = u_\theta^c; u_r^a = u_r^c; \sigma_r^a = \sigma_r^c; \sigma_\theta^a = \sigma_\theta^c; \sigma_{r\theta}^a = \sigma_{r\theta}^c. \quad (2.25)$$

Таким чином, вирішуючи системи рівнянь (2.21)-(2.24) можна визначати поле напружень та деформацій сферолітів у будь-який момент часу при одновісьовому витягуванні полімерного матеріалу.

В рівняння систем (2.22) та (2.24) входить однорідне напруження взаємодії сферолітів  $Q$ , якого немає в рівняннях систем (2.21) та (2.23). Це пояснюється тим, що сфероліти здійснюють вплив один на одного через аморфну фазу, що їх оточує. У результаті цього в аморфній матриці виникає додаткове напруження, що викликане взаємодією між сферолітами, через вплив на полімерний матеріал певного навантаження.

В результаті проведеного теоретичного дослідження було отримано математичну модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури, за допомогою якої можна розраховувати поля переміщень сферолітів один відносно іншого та поля напружень в аморфній області полімеру. Це дозволить визначати фізико-механічні характеристики полімерного матеріалу при створенні у ньому певної деформації.

## **2.2. Метод розрахунку фізико-механічних властивостей недеформованих полімерів**

На основі розробленої математичної моделі (пункт 2.1), беручи до уваги [184], ми визначили в'язкопружні властивості полімерів сферолітної будови, дослідили вплив деформації полімерного матеріалу на деформацію сферолітів, що є важливим при проектуванні перероблювального обладнання. Так, знаючи значення деформації полімеру, яке сприятиме витягненню сферолітів на необхідну довжину, можна спроектувати перероблювальний пристрій, що забезпечить



необхідні зусилля та напрямки їх дії для початку процесу руйнування полімерного матеріалу.

Задовольняючи умови ідеального контакту [111, 178] і прирівнюючи коефіцієнти при поліномах Лежандра, отримаємо вирази для невідомих постійних  $A_0, A, B, C, D_0, D$  через однорідне напруження взаємодії  $Q$ :

$$\begin{aligned}
 A_0 &= Q \cdot \frac{-(1-\nu_a)}{2(E_c(1+\nu_a) + E_a(1-2\nu_c))}, \\
 A_2 &= 0, \\
 B_2 &= Q \cdot \frac{5(1-\nu_a)(1+\nu_a)(1+\nu_c)}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)}, \\
 C_2 &= Q \cdot \frac{5r^3(1+\nu_a)(E_a(1+\nu_c) - E_c(1+\nu_a))}{6E_a(E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c))}, \\
 D_0 &= Q \cdot \frac{r^3(1+\nu_a)(E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c))}{3E_a(E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c))}, \\
 D_2 &= Q \cdot \frac{r^5(1+\nu_a)(E_a(1+\nu_c) - E_c(1+\nu_a))}{E_a(E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c))}.
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Підставивши значення коефіцієнтів з (2.26) у рівняння для визначення компонент напруження в кожній точці кристалічної та аморфної області полімерного матеріалу [158], отримаємо вирішення крайової задачі одновісьового розтягування ізотропного необмеженого аморфного середовища, що містить сфероліт. У результаті матимемо такі вирази компонентів вектора переміщень  $\mathbf{u}$  і тензора напружень  $\mathbf{T}_\sigma$ .

– Для сфероліту:

$$\begin{aligned}
 \sigma_r^c &= E_c \cdot Q \cdot \left( \frac{1-\nu_a}{E_c(1+\nu_a) + E_a(1-2\nu_c)} + \frac{10(1-\nu_a^2)}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \cdot P_2(\cos\theta) \right), \\
 \sigma_{r\theta}^c &= E_c \cdot Q \cdot \left( \frac{5(1-\nu_a^2)}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \right) \cdot \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta}, \\
 \sigma_\theta^c &= E_c \cdot Q \cdot \left( \frac{1-\nu_a}{E_c(1+\nu_a) + E_a(1-2\nu_c)} - \frac{5(1-\nu_a^2)}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \cdot \left( 4P_2(\cos\theta) + \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta} \operatorname{ctg}\theta \right) \right), \\
 \sigma_\phi^c &= E_c \cdot Q \cdot \left( \frac{1-\nu_a}{E_c(1+\nu_a) + E_a(1-2\nu_c)} + \frac{5(1-\nu_a^2)}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \cdot \left( 2P_2(\cos\theta) + \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta} \operatorname{ctg}\theta \right) \right),
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

$$\begin{aligned}
u_r^c &= Q \cdot r \cdot (1 - v_a) \left( \frac{1 - 2v_c}{E_c(1 + v_a) + E_a(1 - 2v_c)} + \frac{10(1 + v_a)(1 + v_c)}{E_c(1 + v_a)(8 - 10v_a) + E_a(7 - 5v_a)(1 + v_c)} \cdot P_2(\cos \theta) \right), \\
u_\theta^c &= Q \cdot r \cdot \frac{5(1 - v_a^2)(1 + v_c)}{E_c(1 + v_a)(8 - 10v_a) + E_a(7 - 5v_a)(1 + v_c)} \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta}, \\
u_\phi^c &= 0.
\end{aligned} \tag{2.28}$$

– Для аморфної матриці:

$$\begin{aligned}
\sigma_r^a &= Q \cdot \left( \frac{1}{3} + \frac{2}{3} r \left( \frac{E_c(1 - 2v_a) - E_a(1 - 2v_c)}{E_c(1 + v_a) + 2E_a(1 - 2v_c)} \right) + \left( \frac{1}{3} + \frac{E_c(1 + v_a) - E_a(1 + v_c)}{E_c(1 + v_a)(8 - 10v_a) + E_a(7 - 5v_a)(1 + v_c)} \cdot \left( \frac{5}{3}(10 - 2v_a) - 12 \right) \right) \cdot P_2(\cos \theta) \right), \\
\sigma_\phi^a &= -Q \cdot \left( \frac{E_c(1 - 2v_a) - E_a(1 - 2v_c)}{3[E_c(1 + v_a) + 2E_a(1 - 2v_c)]} - \frac{E_c(1 + v_a) - E_a(1 + v_c)}{E_c(1 + v_a)(8 - 10v_a) + E_a(7 - 5v_a)(1 + v_c)} \times \right. \\
&\quad \times \left[ \left( \frac{25}{3}(1 - 2v_a) + 3 \right) \cdot P_2(\cos \theta) - \left( \frac{5}{3}(1 - 2v_a) + 1 \right) \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} \operatorname{ctg} \theta \right] \Bigg), \\
\sigma_\theta^a &= Q \cdot \left( \frac{2}{3} - \frac{E_c(1 - 2v_a) - E_a(1 - 2v_c)}{E_c(1 + v_a) + 2E_a(1 - 2v_c)} - \frac{2}{3} P_2(\cos \theta) - \frac{E_c(1 + v_a) - E_a(1 + v_c)}{E_c(1 + v_a)(8 - 10v_a) + E_a(7 - 5v_a)(1 + v_c)} \left( \frac{113}{12} P_2(\cos \theta) - \frac{8}{3} \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} \operatorname{ctg} \theta \right) \right), \\
\sigma_{r\theta}^a &= Q \cdot \left[ \frac{1}{3} \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} - \frac{E_c(1 + v_a) - E_a(1 + v_c)}{E_c(1 + v_a)(8 - 10v_a) + E_a(7 - 5v_a)(1 + v_c)} \cdot \left( \frac{5}{6}(1 + v_a) - 4 \right) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} \right].
\end{aligned} \tag{2.29}$$

$$\begin{aligned}
u_r^a &= Q \cdot r \cdot \left[ \frac{1 - 2v_a}{3E_a} - \frac{(1 + v_a)(E_c(1 - 2v_a) - E_a(1 - 2v_c))}{3 \cdot r \cdot E_a(E_c(1 + v_a) + 2E_a(1 - 2v_c))} + \frac{2(1 + v_a)}{3E_a} \cdot P_2(\cos \theta) - \right. \\
&\quad \left. - \frac{(1 + v_a)(E_c(1 + v_a) - E_a(1 + v_c))}{E_a(E_c(1 + v_a)(8 - 10v_a) + E_a(7 - 5v_a)(1 + v_c))} \cdot \left( \frac{5}{6}(1 - 8v_a) - 3 \right) P_2(\cos \theta) \right], \\
u_\theta^a &= Q \cdot r \cdot \left[ \frac{1 + 2v_a}{3E_a} - \frac{(1 + v_a)(E_c(1 + v_a) - E_a(1 - 2v_c))}{E_a(E_c(8 - 10v_a)(1 + v_a) + E_a(7 - 5v_a)(1 + v_c))} \left( \frac{5}{3}(1 - 2v_a) + 1 \right) \right] \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta}, \\
u_\phi^a &= 0.
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Для визначення напруження взаємодії між сферолітами  $Q$  скористаємося методом послідовної регуляризації [158], що дозволяє виразити потенційну енергію деформації  $U$  через поверхневий інтеграл:

$$U = \frac{1}{2V} \sum_{k=1}^N \int_{V_k} \sigma_{ik} \varepsilon_{ik} dV = \frac{1}{2V} \sum_{S_0} \int \sigma_{in} u_i df_n, \tag{2.31}$$

де  $df_n$  – елемент із нормаллю  $n$  до поверхні, що обмежує об'єм  $V$ ;  $\sigma_{in}$ ,  $u_i$  – компоненти тензора напруження  $\mathbf{T}_\sigma$  і вектора переміщень  $\mathbf{u}$ , що діють на поверхні  $S_0$ .

Використовуючи перше представлення енергії деформації через середні значення напружень  $\bar{\sigma}_1$  і деформацій  $\bar{\varepsilon}_1$ :

$$U = 0,5 \bar{\sigma}_1 \bar{\varepsilon}_1. \quad (2.32)$$

і виразивши компоненти вектора переміщень  $\mathbf{u}^a$  у сферичній системі координат через середні значення деформації  $\bar{\varepsilon}_1$ , знайдемо потенціал деформації для полімеру сферолітного будови:

$$\frac{1}{2V} \iint_{(S)} [\sigma_r^a \bar{\varepsilon}_1 r (\cos^2 \theta - \nu_a \sin^2 \theta) - \sigma_{r\theta}^a \bar{\varepsilon}_1 r (1 + \nu_a) \sin \theta \cos \theta] r^2 \sin \theta d\theta d\varphi = \frac{1}{2} \bar{\sigma}_1 \bar{\varepsilon}_1. \quad (2.33)$$

Підставивши в отриманий вираз значення напружень  $\sigma_r^a$  і  $\sigma_{r\theta}^a$  з рівняння (2.29), проінтегрувавши (2.33) по  $\varphi$  на інтервалі  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  і по  $\theta$  на інтервалі  $0 \leq \theta \leq \pi$  (звівши тим самим елементарну комірку до концентричної зі сферолітом радіусом  $r$ ), визначимо однорідне напруження взаємодії  $Q$  між сферолітами через задані середні напруження розтягу  $\bar{\sigma}_1$ :

$$Q = \frac{\bar{\sigma}_1}{1 + \frac{2}{3} \chi^2 \left( \frac{(1 - 2\nu_a)(E_c(1 - 2\nu_a) - E_a(1 - 2\nu_c))}{E_c(1 + \nu_a) + 2E_a(1 - 2\nu_c)} + \frac{(7 - 5\nu_a)(1 + \nu_a)(E_c(1 + \nu_a) - E_a(1 + \nu_c))}{E_c(1 + \nu_a)(8 - 10\nu_a) + E_a(7 - 5\nu_a)(1 + \nu_c)} \right)}. \quad (2.34)$$

Компоненти тензора напружень  $\mathbf{T}_\sigma$  і вектора переміщень  $\mathbf{u}$  можуть бути знайдені з рівнянь (2.27), (2.29) і (2.28), (2.30) при підстановці в них значення однорідного напруження взаємодії із виразу (2.34). Компоненти тензора деформацій  $\mathbf{T}_\varepsilon$  отримаємо з таких рівнянь:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}; \quad \varepsilon_\varphi = \frac{u_\theta}{r} \operatorname{ctg} \theta + \frac{u_r}{r}; \quad \varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r}; \quad \varepsilon_{\theta\varphi} = \varepsilon_{\varphi r} = 0. \quad (2.35)$$

Для визначення в'язкопружного модуля полімерного середовища сферолітної будови  $E$  замінимо праву частину рівняння (2.33) другим представленням енергії [158], а напруження  $\sigma_r^a$  і  $\sigma_{r\theta}^a$  в підінтегральній функції – середніми значеннями напружень  $\bar{\sigma}_1$ :

$$\sigma_r^a = \bar{\sigma}_1 \cos^2 \theta, \quad \tau_{r\theta}^a = -\bar{\sigma}_1 \sin \theta \cos \theta$$

у результаті отримаємо

$$U = \frac{\bar{\sigma}_1}{2V} \iint_{(S)} (u_r^a \cos^2 \theta - u_{r\theta}^a \sin \theta \cos \theta) r^2 \sin \theta d\theta d\varphi = \frac{\bar{\sigma}_1^2}{2E}. \quad (2.36)$$

Підставляючи в (2.36) значення переміщень  $u_r^a$  і  $u_{r\theta}^a$  з (2.30), значення напружень однорідної взаємодії  $Q$  з (2.34) і розв'язуючи вираз (2.36) відносно  $E$ , знайдемо в'язкопружний модуль полімерного середовища сферолітної будови:

$$E = E_a \frac{1 + \frac{2}{3}\chi^2 \left( \frac{(1-2\nu_a)(E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c))}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)} + \frac{(7-5\nu_a)(1+\nu_a)(E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c))}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \right)}{1 - \frac{1}{3}\chi^2 \left( \frac{(1+\nu_a)(E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c))}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)} - \frac{4(4-5\nu_a)(1+\nu_a)(E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c))}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \right)}. \quad (2.37)$$

Фізико-механічні властивості будь-якого ізотропного матеріалу обумовлені двома незалежними константами. Другу постійну – об'ємної в'язкопружний модуль  $E_V$  - визначимо, розглядаючи рівномірне всебічне розтягування ( $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tilde{\sigma}$ ) полімерного ізотропного середовища сферолітної будови.

Повторюючи викладені вище міркування, отримаємо вирази для:

– напруження взаємодії між сферолітами  $Q$ :

$$Q = \frac{(1-2\nu_c)(1+\nu_a)[E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)]}{E_c(1+\nu_a) + 2\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + 2E_a(1-\chi^2)(1-2\nu_c)} \quad (2.38)$$

– об'ємного в'язкопружного модуля  $E_V$ :

$$E_V = E_a \frac{E_c(1+\nu_a) + 2\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + 2E_a(1-\chi^2)(1-2\nu_c)}{3[E_c(1-\chi^2)(1-2\nu_a)(1+\nu_a) + \chi^2 E_a(1+\nu_a)(1-2\nu_c) + 2E_a(1-2\nu_a)(1-2\nu_c)]} \quad (2.39)$$

Постійні  $E_V$  і  $E$  дозволяють визначити інші в'язкопружні константи полімерного матеріалу (коефіцієнт Пуассона  $\nu$  і модуль зсуву  $G$ ):

$$\nu = (3E_V - E)/6E_V; \quad G = 3E_V E / (9E_V - E). \quad (2.40)$$

Вирази (2.37), (2.39), (2.40) дозволяють прогнозувати фізико-механічні властивості полімерних матеріалів у залежності від ступеня кристалічності [184] і вимагають у першому наближенні знання фізико-механічних властивостей

аморфної фази  $E_a$ ,  $\nu_a$  і сферолітів  $E_c$ ,  $\nu_c$ . Якщо в'язкопружні константи різних полімерів в аморфному стані можуть бути виміряні або взяті з довідникової літератури, то використання модуля пружності кристалічної решітки полімерів як константи кристалічної фази, як це зроблено в більшості робіт [106-139, 185-190], на нашу думку, є не зовсім коректним. По-перше, це пов'язано зі складною будовою сферолітів [140, 160], які є третім, після кристалітів і ламелей, рівнем НМС, і в якому і кристаліти, і ламелі, маючи різну орієнтацію в просторі, з'єднані між собою аморфними прошарками, що не дозволяє розглядати сфероліти та інші структурні утворення як єдині кристалічні морфози. По-друге, в деяких роботах, наприклад [178, 184], встановлено, що сфероліти навіть при високих кінцевих деформаціях деформуються з полімером як єдине ціле (рис. 2.4) [191], витягаючись у напрямку навантаження і лише незначно відстаючи від деформації зразка.

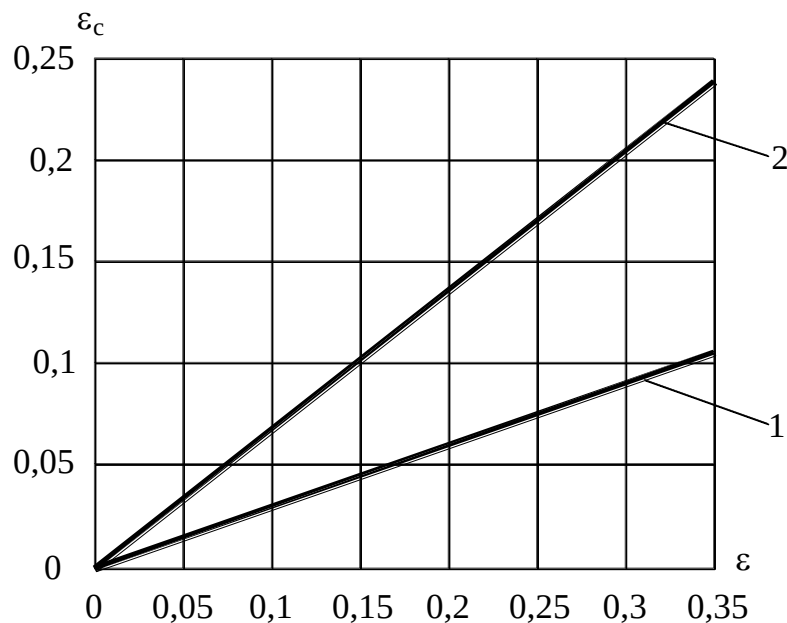


**Рис. 2.4. Залежності деформації сферолітів  $\epsilon_c$  від деформації  $\epsilon$  поліпропіленової (крива 1) і поліетиленової (крива 2) плівки при температурі  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$**

При співвідношенні між в'язкопружними постійними кристалітів  $E_k$  і аморфної фази  $E_a$ , що дорівнює для поліетилену близько  $5 \cdot 10^3$  ( $E_k/E_a = 250 \cdot 10^3 / 0,05 \cdot 10^3 = 5 \cdot 10^3$ ) [158, 178], таке явище не спостерігається.

Як пружні константи для сферолітів  $E_c$  запропоновано використовувати значення в'язкопружних постійних, визначених із рівнянь (2.37), (2.39), (2.40) при ступені кристалічності  $\chi_{\max}$ , що відповідає максимально можливій для такого полімеру, у разі припущення про ідеальну будову сферолітів, тобто при підстановці в рівняння (2.37) величини  $E_k$  замість  $E_c$ . Отримане значення в'язкопружного модуля  $E$  можна використовувати в подальшому як модуль пружності сферолітів  $E_c$  при прогнозуванні фізико-механічних властивостей полімерів.

Перевірка описаної вище моделі проведена на поліетилені і поліетилентерефталаті, які є представниками висококристалічних і середньокристалічних полімерів. На рис. 2.5 представлені залежності в'язкопружного модуля поліетилену (криві 1 і 3, шкала значень В) і поліетилентерефталату (криві 2 і 4, шкала значень А) від ступеня кристалічності  $\chi$ . Криві 1 і 2 отримані в нашій роботі при використанні  $E_c$ ,  $\nu_c$  як результатів першого наближення ( $E_c = E$ ). Вихідні дані при побудові кривих 1 і 2: для поліетилену  $E_c = 1020$  МПа,  $\nu_c = 0,2$ ,  $E_a = 77$  МПа,  $\nu_a = 0,39$ ; для поліетилентерефталату  $E_c = 8240$  МПа,  $\nu_c = 0,2$ ,  $E_a = 2000$  МПа,  $\nu_a = 0,39$ .

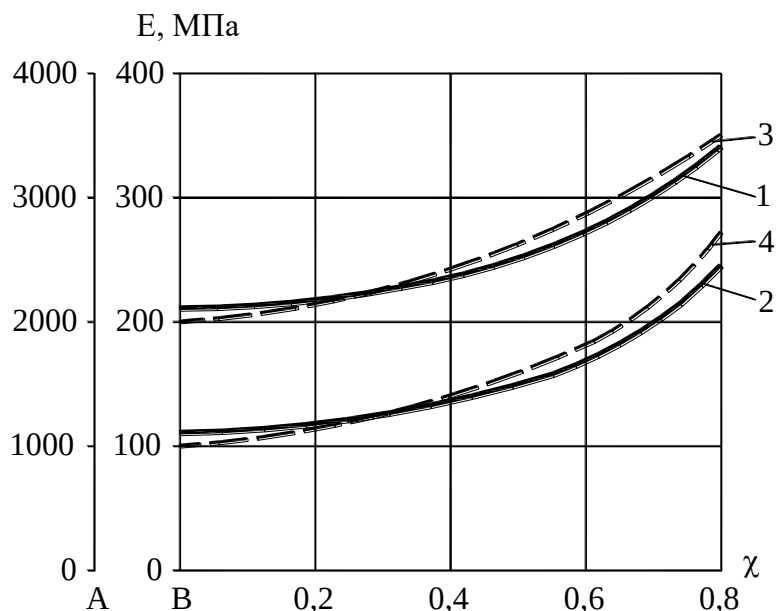


**Рис. 2.5. Залежності в'язкопружного модуля  $E$  поліетилену (криві 1, 3; шкала значень В) і поліетилентерефталату (криві 2, 4; шкала значень А) від ступеня кристалічності: 1, 2 – дані, отримані в нашій роботі; 3, 4 – експериментальні дані, отримані в роботі [191-194]**

Аналіз наведених на рис. 2.5 даних показав задовільний збіг прогнозованих та виміряних значень модуля Юнга, найбільший розкид значень не перевищує 15% для поліетилентерефталату та 12% для поліетилену.

Таким чином, наведена модель задовільно відображає сферолітну будову полімерних матеріалів. В'язкопружні постійні  $E_v$  і  $E$ , отримані в результаті побудови моделі, що беруться як вихідні дані, можна використовувати при побудові моделі надмолекулярної структури полімерного матеріалу, що формується в процесі його розтягу.

### 2.3. Структурна модель орієнтованого полімеру

Процес переходу з неорієнтованого стану кристалічних полімерів до орієнтованого є невід'ємною стадією переробки полімерних відходів. Зміну фізико-механічних властивостей полімерів у процесі деформації розтягу можна пов'язати з кінцевою деформацією основних рівнів надмолекулярної структури. Аналітичне вирішення цієї задачі слід знаходити методом послідовного врахування взаємодії різних рівнів надмолекулярної структури полімеру шляхом встановлення функціональної залежності фізико-механічних властивостей матеріалу від зміни надмолекулярної структури при деформації полімерного матеріалу.

В результаті аналізу [121, 192, 193], встановлено, що в неорієнтованому стані полімерів сферолітної будови можна виділити два основних рівні надмолекулярної структури полімеру – сфероліти, що мають гетерогенну кристалічну структуру, і аморфну фазу, що має однорідну неупорядковану структуру. В роботі [184] запропоновано модель неорієнтованої структури полімеру сферолітної будови, що задовільно пов'язує показники фізико-механічних властивостей полімерного матеріалу зі зміною його структури під час деформації.

Наявні моделі структури полімерів [194-199] не враховують особливості будови надмолекулярної структури полімерів, взаємозв'язок між аморфними і кристалічними компонентами, не дозволяють кількісно описувати структурні зміни, що відбуваються в процесі деформації полімеру.

Для визначення раціональних конструктивних та технологічних параметрів обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості, при яких забезпечуються потрібна фракція та структура переробленого полімеру, а також мінімальні витрати енергії, необхідно розробити структурну модель орієнтованого стану полімерів, на основі якої розробити метод розрахунку фізико-механічних властивостей полімерів з орієнтованою структурою залежно від напрямку і виду деформації.

Прийнявши як вихідну модель (рис. 2.6) і врахувавши характеристики структурних елементів [184, 191, 200] – сферолітів і аморфної області, а також їх внутрішню будову [107, 111, 201], нехтуючи дисипативними явищами в цих елементах, у першому наближенні розіб'ємо весь процес витягування полімеру на кінечну кількість станів із фіксованим ступенем деформації сферолітів. Раніше було встановлено [184], що при ступені витягування, що дорівнює природньому, зберігається прямий генетичний зв'язок між вихідним сферолітним порядком і орієнтаційним. При цьому зі збільшенням ступеня витягування, збільшується ступінь сплюсненості сферолітів, тобто сфероліти змінюють сферичну форму, стаючи витягнутими в напрямку орієнтації. Наведені вище факти є основою для гіпотези про існування кількісного зв'язку між параметрами витягування сферолітів і фізико-механічними властивостями полімерів у кожному зі згаданих станів.

Розглянемо модель неорієнтованого стану сферолітної структури [202], яка піддається одновісьовій орієнтації зі ступенем витягування  $\lambda$ . На рис. 2.6 представлено модель перетворення вихідної неорієнтованої сферолітної структури на орієнтовану. Врахувавши той факт, що зміна форми сферолітів у результаті орієнтаційного витягування відбувається однорідно [158, 178] в напрямку вісі  $x_1$  і при незмінному об'ємі сферолітів [117, 192, 193] ( $\rho_c = \text{const}$ ), будемо моделювати орієнтаційне витягування як рівномірне розтягнення простору зі ступенем витягування полімеру  $\lambda$ . При цьому фактично відбувається рівномірне стиснення сфероліта в напрямку від площини  $x_2 0 x_3$ , прийнятої за основну (рис. 2.6). Формули перетворення координат з урахуванням



незмінності об'єму сфероліта матимуть вигляд  $x_1^* = \lambda x_1$ ,  $x_2^* = x_3^* = \lambda^{-1/2} x_2$ . При цьому можливі два випадки:

- при  $\lambda > 1$  можливе одновісьове розтягнення простору;
- при  $\lambda < 1$  – одновісьове стискання простору.

Рівняння, що описує форму сфероліта радіусом  $r_c$  ( $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = r_c^2$ ), що піддається рівномірному розтягуванню з коефіцієнтом витягування  $\lambda$ , в результаті підстановки формул перетворення координат і приведення його до канонічного вигляду, має такий вигляд:

$$\frac{(x_1^*)^2}{\lambda^2 r_c^2} + \lambda \frac{(x_2^*)^2 + (x_3^*)^2}{r_c^2} = 1. \quad (2.41)$$

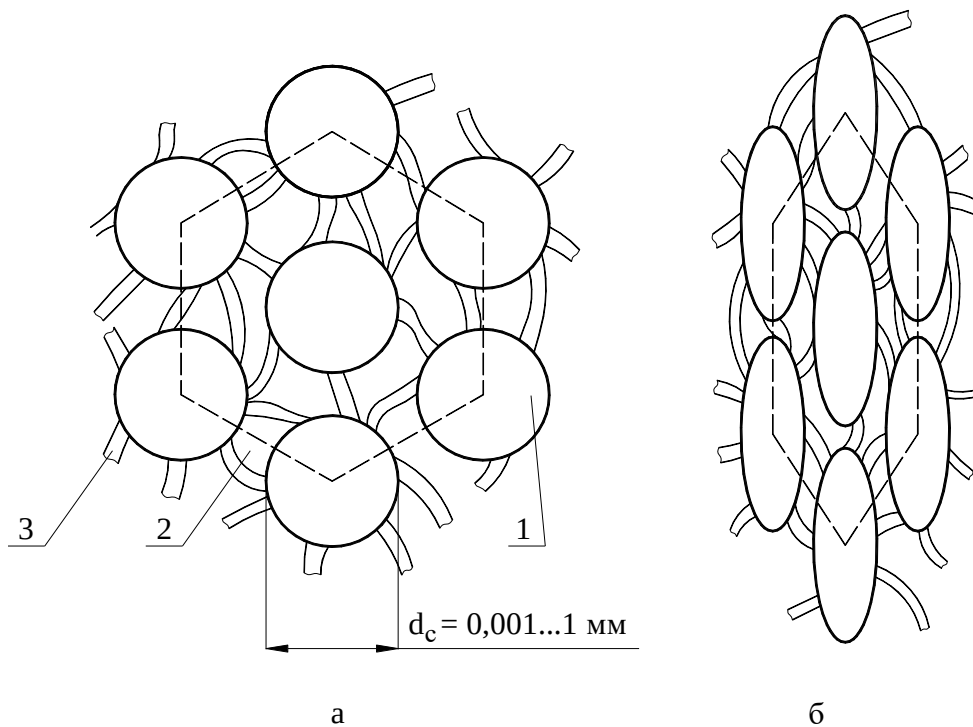


**Рис. 2.6. Модель сферолітної структури полімерів у неорієнтованому (а) і орієнтованому (б) стані: 1 – аморфна область; 2 – сфероліти (кристалічна область); 3 – прохідні фібрили**

Вираз (2.41) являє собою рівняння еліпсоїда обертання (сфероїда). Слід мати на увазі, що якщо  $\lambda > 1$ , то сфероліт має форму витягнутого в напрямку вісі

$x_1$  еліпсоїда обертання, а якщо  $\lambda < 1$ , він стиснутий у цьому ж напрямку. Таким чином, при одновісьовій орієнтації відбувається перетворення форми сферолітів зі сферичної на еліпсоїдальну, що задовільно узгоджується з результатами електронно-мікроскопічних [121] і дифрактометричних [117, 192] досліджень.

Зміна форми сферолітів, як буде показано нижче, в процесі витягування сприяє виникненню загальної анізотропії полімерного середовища при ізотропності елементів надмолекулярної структури (сферолітів і аморфної області).

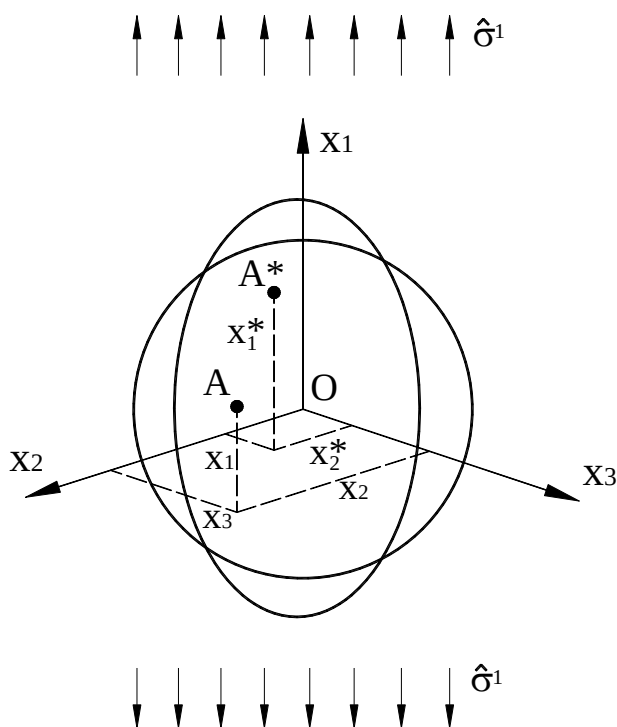


**Рис. 2.7. Модель витягування полімеру сферолітної будови**

В'язкопружні постійні орієнтованого полімеру будемо визначати, виходячи з позицій мікромеханіки композитних матеріалів [158] із залученням як декартової, так і криволінійної систем вироджених еліпсоїдальних координат  $r$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ , взаємозв'язок між якими (рис. 2.7) визначається такими виразами:

$$x_1 = r_c \left( \lambda^2 - \lambda^{-1} \right)^{1/2} \operatorname{ch} r \cos \theta; \quad x_2 + i x_3 = r_c \left( \lambda^2 - \lambda^{-1} \right)^{1/2} \operatorname{sh} r \sin \theta e^{i\varphi}. \quad (2.42)$$

Коефіцієнти Ламе системи (2.42) виражені такими рівняннями:

$$\begin{aligned} H_r^2 &= H_\theta^2 = r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta), \\ H_\varphi^2 &= r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \cdot \text{sh}^2 r \cdot \sin^2 \theta. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Першу квадратичну форму елемента довжини дуги  $ds$  знаходимо з такого виразу:

$$ds^2 = r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \left[ (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta) (dr^2 + d\theta^2) + \text{sh}^2 r \sin^2 \theta d\varphi^2 \right] \quad (2.44)$$

Одиничні вектори криволінійної  $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\varphi$  і декартової  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$  систем координат зв'язані такими співвідношеннями

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_r &= a_{11} \cdot \mathbf{e}_1 + a_{12} \cdot \mathbf{e}_2 + a_{13} \cdot \mathbf{e}_3, \\ \mathbf{e}_\theta &= a_{21} \cdot \mathbf{e}_1 + a_{22} \cdot \mathbf{e}_2 + a_{23} \cdot \mathbf{e}_3, \\ \mathbf{e}_\varphi &= a_{31} \cdot \mathbf{e}_1 + a_{32} \cdot \mathbf{e}_2 + a_{33} \cdot \mathbf{e}_3, \end{aligned} \quad (2.45)$$

де

$$\begin{aligned} a_{11} &= \text{shr} \cos \theta / \sqrt{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta}; & a_{21} &= -\text{chr} \sin \theta / \sqrt{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta}; \\ a_{12} &= \text{chr} \sin \theta \cos \varphi / \sqrt{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta}; & a_{22} &= \text{shr} \cos \theta \cos \varphi / \sqrt{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta}; \\ a_{13} &= \text{chr} \sin \theta \sin \varphi / \sqrt{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta}; & a_{23} &= \text{shr} \cos \theta \sin \varphi / \sqrt{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta}; \\ a_{31} &= 0; & a_{32} &= -\sin \varphi; & a_{33} &= \cos \varphi. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Зворотнє перетворення здійснюється за такими рівняннями:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_1 &= a_{11} \cdot \mathbf{e}_r + a_{21} \cdot \mathbf{e}_\theta + a_{31} \cdot \mathbf{e}_\varphi, \\ \mathbf{e}_2 &= a_{12} \cdot \mathbf{e}_r + a_{22} \cdot \mathbf{e}_\theta + a_{32} \cdot \mathbf{e}_\varphi, \\ \mathbf{e}_3 &= a_{13} \cdot \mathbf{e}_r + a_{23} \cdot \mathbf{e}_\theta + a_{33} \cdot \mathbf{e}_\varphi. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Для визначення в'язкопружних постійних загальний напружений стан представимо як суперпозицію елементарних напружених станів – поздовжнього і двовірного поперечного розтягування, поздовжнього розтягування і повздовжнього зсуву. Детальний розгляд деформації сферолітної структури дозволяє виявити два типи деформації надмолекулярної структури при витягуванні: однорідної і неоднорідної [117, 192]. Однорідний характер деформації сферолітної структури відповідає сфероліту, всі частини якого розтягуються одночасно і пропорційно. Виходячи з цього, робимо висновок, що при дії однорідних напружень в полімерному середовищі напруження в

сфероліті є також однорідними і однотипними, тобто нормальні і дотичні напруження в сфероліті на головних площадках не змішуються між собою. Для міжсферолітного простору характерна наявність як однорідної, так і неоднорідної деформації, що свідчить про розсіяння механічної енергії витягування в основному в міжсферолітному просторі. Таким чином, в межах лінійної теорії можна прийняти, що між елементами надмолекулярної структури діють невідомі напруження взаємодії між сферолітами  $\alpha_1^0$ .

Для визначення в'язкопружного модуля  $E_1$  в напрямку вісі витягування  $x_1$  розглянемо випадок поздовжнього розтягу полімерного матеріалу сферолітної будови напруженнями  $\hat{\sigma}_1 \alpha_1^0$ . При цьому в сфероліті (рис. 2.7) виникає напружений стан:

$$\mathbf{T}^c = (\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 \alpha_1^c + \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2 \alpha_2^c + \mathbf{e}_3 \mathbf{e}_3 \alpha_3^c) \hat{\sigma}_1, \quad (2.48)$$

де  $\alpha_1^c$ ,  $\alpha_2^c$ ,  $\alpha_3^c$  – невідомі постійні, що характеризують рівень структурних напружень у сфероліті на головних площадках;  $\hat{\sigma}_1$  – середнє напруження розтягу, що діє на сфероліти та аморфне середовище.

У сферичній системі координат (2.42) тензор напружень (2.48) можна представити таким чином:

$$\mathbf{T}^c = (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_r \alpha_r^c + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_\theta \alpha_\theta^c + \mathbf{e}_\varphi \mathbf{e}_\varphi \alpha_\varphi^c + (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_\theta + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_r) \cdot \alpha_{r\theta}^c) \hat{\sigma}_1. \quad (2.49)$$

Невідомі компоненти тензора напруження сфероліта будемо визначати з рівняння (2.49), з урахуванням рівнянь (2.44), (2.45) та (2.46):

$$\begin{aligned} \sigma_r^c &= \hat{\sigma}_1 \alpha_r^c = (a_{21}^2 \alpha_2^c + a_{11}^2 \alpha_1^c) \cdot \hat{\sigma}_1, \\ \sigma_\theta^c &= \hat{\sigma}_1 \alpha_\theta^c = (a_{21}^2 \alpha_1^c + a_{11}^2 \alpha_2^c) \cdot \hat{\sigma}_1, \\ \sigma_{r\theta}^c &= \hat{\sigma}_1 \alpha_{r\theta}^c = (\alpha_2^c - \alpha_1^c) \cdot a_{11} a_{21} \cdot \hat{\sigma}_1. \end{aligned} \quad (2.50)$$

Компоненти вектора переміщень для сфероліта виразимо у сферичній системі координат з урахуванням рівнянь (2.42)-(2.46):

$$\begin{aligned} u_r^c &= r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} (\epsilon_1^c a_{11} \operatorname{chr} \cos \theta - \epsilon_2^c a_{21} \operatorname{shr} \sin \theta), \\ u_\theta^c &= r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} (\epsilon_1^c a_{21} \operatorname{chr} \cos \theta + \epsilon_2^c a_{11} \operatorname{shr} \sin \theta), \end{aligned} \quad (2.51)$$

де  $\varepsilon_1^c, \varepsilon_2^c = \varepsilon_3^c$  – компоненти тензора деформації сфероліта.

$$\varepsilon_1^c = \frac{1}{E_c} (\alpha_1^c - 2\nu_c \alpha_2^c) \hat{\sigma}_1, \quad \varepsilon_2^c = \varepsilon_3^c = \frac{1}{E_c} (\alpha_2^c (1 - \nu_c) - \nu_c \alpha_1^c) \hat{\sigma}_1, \quad (2.52)$$

де  $E_c, \nu_c$  – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона сфероліта [178]

Поле напружень в аморфному середовищі представимо у вигляді суми однорідного поля взаємодії між сферолітами і двох складових, що розсіюються на сферолітах і спадають у міру віддалення від них. Для орієнтованого полімеру сферолітної будови поле однорідної взаємодії між сферолітами в аморфному середовищі при розтягу напруженням  $\hat{\sigma}_1 \alpha_1^0$  представимо в такому вигляді:

$$\mathbf{T}^a = \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 \alpha_1^a \hat{\sigma}_1 = (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_r \alpha_r^a + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_\theta \alpha_\theta^a + (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_\theta + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_r) \cdot \alpha_{r\theta}^a) \hat{\sigma}_1, \quad (2.53)$$

де  $\alpha_r^a, \alpha_\theta^a, \alpha_{r\theta}^a$  – невідомі постійні, що характеризують рівень напруження на головних площадках аморфного середовища в результаті однорідної взаємодії між сферолітами, які виразимо з таких рівнянь:

$$\alpha_r^a = a_{11}^2 \alpha_1^a, \quad \alpha_\theta^a = a_{21}^2 \alpha_1^a, \quad \alpha_{r\theta}^a = a_{11} a_{21} \alpha_1^a. \quad (2.54)$$

Компоненти вектора переміщень з урахуванням виразів (2.42)...(2.46) визначимо в такий спосіб:

$$\begin{aligned} u_r^a &= r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} (\varepsilon_1^a a_{11} \operatorname{ch} r \cos \theta - \varepsilon_2^a a_{21} \operatorname{sh} r \sin \theta), \\ u_\theta^a &= r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} (\varepsilon_1^a a_{21} \operatorname{ch} r \cos \theta + \varepsilon_2^a a_{11} \operatorname{sh} r \sin \theta), \\ u_\phi^a &= 0, \end{aligned} \quad (2.55)$$

де  $\varepsilon_1^a, \varepsilon_2^a = \varepsilon_3^a$  – компоненти тензора деформації аморфного середовища.

$$\varepsilon_1^a = \alpha_1^a \hat{\sigma}_1 / E_a, \quad \varepsilon_2^a = \varepsilon_3^a = -\nu_a \alpha_1^a \hat{\sigma}_1 / E_a, \quad (2.56)$$

де  $E_a, \nu_a$  – в'язкопружний модуль та коефіцієнт Пуассона аморфного середовища [178].

Складові полів напружень, що розсіюються між сферолітами в аморфному просторі, будемо визначати, скориставшись вирішенням зовнішньої задачі для витягнутого еліпсоїда обертання, отриманим у роботах [158, 203, 204].

Як перше розсіяне поле будемо розглядати соленоїдальне поле переміщень, яке задовольняє рівнянню нерозривності поля [158, 203, 204]:

$$\operatorname{div} \mathbf{u}^* = 0. \quad (2.57)$$

Компоненти вектора переміщень аморфного середовища в результаті однорідної взаємодії між сферолітами, що задовольняють умову нерозривності (2.57), згідно з [158, 203, 204], визначимо в такий спосіб:

$$\begin{aligned} u_r^* &= \frac{r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta}} \frac{1 + \nu_a}{4E_a} A \cdot \hat{\sigma}_1 \cdot \left[ 2Q_1(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r - Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch} r \right] + \\ &\quad + \left[ 2Q_1(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r + Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch} r \right] \cdot \cos 2\theta, \\ u_\theta^* &= -\frac{r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta}} \frac{1 + \nu_a}{4E_a} A \cdot \hat{\sigma}_1 \cdot \left[ 2Q_1(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch} r + Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r \right] \cdot \sin 2\theta, \\ u_\phi^* &= 0, \end{aligned} \quad (2.58)$$

де  $A$  – невідома постійна, яку визначимо нижче;  $Q_1(\operatorname{ch} r)$ ,  $Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r)$  – приєднувальні функції Лежандра другого роду першого ступеня, відповідно, нульового та першого порядку.

Визначимо вектор напруження  $\mathbf{W}_r^*$  в аморфному середовищі на площадці з нормаллю  $\mathbf{e}_r$  через переміщення (2.58), що задовольняють умову (2.57) з урахуванням [182]:

$$\mathbf{W}_r^* = \frac{E_a}{1 + \nu_a} \left( \frac{1}{H_r} \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial r} + \frac{1}{2} \mathbf{e}_r \times \operatorname{rot} \mathbf{u}^* \right). \quad (2.59)$$

Вирішуючи рівняння (2.59) і враховуючи вирази (2.43), (2.45)-(2.47) і (2.58), визначимо напруження на поверхні, що софокусна сфероліту.

$$\begin{aligned} \sigma_r^* &= \frac{A \cdot \hat{\sigma}_1}{4(\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \cdot \left( \left[ 2Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r + \frac{dQ_1^{(1)}(\operatorname{ch} r)}{dr} \cdot \operatorname{ch} r \right] \cdot \cos 2\theta + \right. \\ &\quad \left. + \left[ 2Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r - \frac{dQ_1^{(1)}(\operatorname{ch} r)}{dr} \cdot \operatorname{ch} r \right] \right), \\ \sigma_{r\theta}^* &= -\frac{A \cdot \hat{\sigma}_1}{4(\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \cdot \left[ 2Q_1(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r + Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch} r \right] \cdot \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (2.60)$$

Переміщення аморфного середовища під впливом другого розсіяного поля визначаємо за допомогою рішення Папковича-Нейбера [158, 182]:

$$\mathbf{u}^{**} = \hat{\sigma}_1(1 + \nu_a)/E_a \cdot [(3 - 4\nu_a) \cdot \mathbf{e}_1 \cdot B_1 - \text{grad}(B_1 x_1 + B_0)], \quad (2.61)$$

де  $B_0, B_1, B_2 = B_3 = 0$  – функції Папковича-Нейбера, що задовольняють умови:

$$B_0 = -\frac{1}{2}r_c^2(\lambda^2 - \lambda^{-1})F \cdot \text{ch}^2 r_0 \cdot Q_2(\text{ch } r)P_2(\cos \theta), \quad B_1 = \frac{1}{2}r_c^2(\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}F \cdot Q_1(\text{ch } r)P_1(\cos \theta), \quad (2.62)$$

де  $P_1(\cos \theta), P_2(\cos \theta)$  – приєднувальні функції Лежандра першого роду;  $P_1(\cos \theta) = \cos \theta, P_2(\cos \theta) = 1/2(3\cos^2 \theta - 1)$ ;  $F$  – невідома постійна, яку визначимо нижче.

Компоненти вектора переміщення для другого розсіяного поля у сферичній системі координат визначаються з виразу (2.61), з урахуванням рівнянь (2.43), (2.45)-(2.47), у такий спосіб:

$$\begin{aligned} u_r^{**} &= \frac{r_c(\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta}} \frac{1 + \nu_a}{8E_a} F \cdot \hat{\sigma}_1 \cdot [2Q_1(\text{ch } r) \cdot \text{sh } r \cdot (3 - 4\nu_a) - 2Q_1^{(1)}(\text{ch } r) \cdot \text{ch } r + \\ &\quad + Q_2^{(1)}(\text{ch } r) \cdot \text{ch}^2 r_0] + [2Q_1(\text{ch } r) \cdot \text{sh } r \cdot (3 - 4\nu_a) - 2Q_1^{(1)}(\text{ch } r) \cdot \text{ch } r + \\ &\quad + 3Q_2^{(1)}(\text{ch } r) \cdot \text{ch}^2 r_0] \cdot \cos 2\theta, \\ u_\theta^* &= -\frac{r_c(\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta}} \frac{1 + \nu_a}{8E_a} F \cdot \hat{\sigma}_1 \cdot [2(1 - 2\nu_a)Q_1(\text{ch } r) \cdot \text{ch } r + 3\text{ch}^2 r_0 \cdot Q_2(\text{ch } r)] \cdot \sin 2\theta, \\ u_\varphi^{**} &= 0. \end{aligned} \quad (2.63)$$

Вектор напруження  $\mathbf{W}_r^{**}$  на площадці з нормаллю  $\mathbf{e}_r$ , що є дотичною до поверхні сфероліта, визначимо з рівняння (2.61), згідно з [182], у такий спосіб:

$$\mathbf{W}_r^{**} = \frac{E_a}{1 + \nu_a} \left( \frac{\mathbf{e}_r \nu_a}{1 - 2\nu_a} \text{div } \mathbf{u}^{**} + \frac{1}{H_r} \frac{\partial \mathbf{u}^{**}}{\partial r} + \frac{1}{2} \mathbf{e}_r \times \text{rot } \mathbf{u}^{**} \right). \quad (2.64)$$

Розв'язуючи рівняння (2.64) з урахуванням рівнянь (2.43), (2.45)-(2.47) та (2.61), (2.63), отримаємо напруження другого розсіяного поля в міжсферолітному просторі на поверхнях сферолітів:

$$\begin{aligned}
\sigma_r^{**} &= \frac{F \cdot \hat{\sigma}_1}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \left\{ 2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta) \left[ (1 - v_a) \text{sh} r \cos \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial r} - v_a \cdot \text{ch} r \cdot \sin \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} \right] - \right. \\
&\quad - (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta) \cdot \left( \frac{\partial^2 B_0^*}{\partial r^2} + \text{ch} r \cdot \cos \theta \frac{\partial^2 B_1^*}{\partial r^2} \right) + \text{ch} r \cdot \cos \theta \times \\
&\quad \times \left( \text{ch} r \cdot \text{sh} r \frac{\partial B_1^*}{\partial r} - \sin \theta \cdot \cos \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} \right) + \text{ch} r \cdot \text{sh} r \frac{\partial B_0^*}{\partial r} - \sin \theta \cdot \cos \theta \frac{\partial B_0^*}{\partial \theta} \left. \vphantom{\frac{\partial B_1^*}{\partial r}} \right\}, \\
\sigma_{r\theta}^{**} &= \frac{F \cdot \hat{\sigma}_1}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \left\{ (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta) [(1 - 2v_a) \left( \text{sh} r \cos \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} - \text{ch} r \cdot \sin \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial r} \right) - \right. \\
&\quad - \frac{\partial^2 B_0^*}{\partial r \partial \theta} - \text{ch} r \cdot \cos \theta \frac{\partial^2 B_1^*}{\partial r \partial \theta}] + \text{ch} r \cdot \sin \theta \cdot \left( \sin \theta \cdot \cos \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial r} + \text{ch} r \cdot \text{sh} r \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} \right) + \\
&\quad \left. + \sin \theta \cdot \cos \theta \frac{\partial B_0^*}{\partial r} + \text{ch} r \cdot \text{sh} r \frac{\partial B_0^*}{\partial \theta} \right\}, \tag{2.65}
\end{aligned}$$

$$\text{де } B_0^* = 1/2 r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \cdot F \cdot B_0; \quad B_1^* = 1/2 r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} \cdot F \cdot B_1.$$

Компоненти тензора напружень аморфного середовища  $\mathbf{T}_a$ , що створюються в результаті однорідної взаємодії між сферолітами, визначимо як суму напруження взаємодії між сферолітами  $\sigma_r^o$  та  $\sigma_{r\theta}^o$  (2.53), напруження, що відповідає першому розсіяному полю  $\sigma_r^*$  та  $\sigma_{r\theta}^*$  (2.60), і напруження, що відповідає другому розсіяному полю  $\sigma_r^{**}$  та  $\sigma_{r\theta}^{**}$  (2.65):

$$\sigma_r^a = \sigma_r^o + \sigma_r^* + \sigma_r^{**}, \quad \sigma_{r\theta}^a = \sigma_{r\theta}^o + \sigma_{r\theta}^* + \sigma_{r\theta}^{**}. \tag{2.66}$$

Відповідні їм компоненти вектора переміщення  $\mathbf{u}_a$  визначимо як суму компонентів вектора переміщення однорідної взаємодії  $u_r^o$  та  $u_\theta^o$  (2.55), переміщення під дією першого розсіяного поля  $u_r^*$  та  $u_\theta^*$  (2.58), і переміщення під дією другого розсіяного поля  $u_r^{**}$  та  $u_\theta^{**}$  (2.63):

$$u_r^a = u_r^o + u_r^* + u_r^{**}, \quad u_\theta^a = u_\theta^o + u_\theta^* + u_\theta^{**}. \tag{2.67}$$

Постійні  $A$  та  $F$ , що входять у рівняння (2.58), (2.60), (2.62), (2.63), (2.65), визначимо з крайових умов, за які приймемо умови ідеальності адгезійної взаємодії сфероліта та аморфного середовища, що виражається в неперервності полів напружень і переміщень:



$$u_r^c = u_r^a, \quad u_\theta^c = u_\theta^a, \quad \sigma_{r\theta}^c = \sigma_{r\theta}^a, \quad \sigma_r^c = \sigma_r^a. \quad (2.68)$$

Задовольняючи умови неперервності полів напружень і переміщень (деформацій) на поверхні сфероліта, при підстановці рівнянь (2.50) в (2.66) і (2.51) в (2.67), отримаємо вирази для невідомих постійних  $A$  та  $F$  через напруження взаємодії між сферолітами  $\alpha_1^o$ :

$$A = \alpha_1^o \left( \frac{2[E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c)]\{E_c(1+\nu_a)\beta_1 - E_a[(1-\nu_c)\beta_4 + (1-3\nu_c)(\beta_3 + \beta_4)]\} - [E_a(1+\nu_c)\gamma_3 - E_c(1+\nu_a)\gamma_2]\{E_c(1+\nu_a)\beta_1 - E_a[(1-\nu_c)\beta_4 + (1-3\nu_c)(\beta_3 + \beta_4)]\}}{[E_c(1+\nu_a)\beta_2 + E_a(1+\nu_c)\beta_3][E_c(1-\nu_a) - E_a(1-\nu_c)]} + \frac{[E_c(1+\nu_a)\beta_2 + E_a(1+\nu_c)\beta_3]\{E_c(1+\nu_a)\gamma_1 - E_a[(1-\nu_c)\gamma_4 + (1-3\nu_c)(\gamma_4 - \gamma_3)]\}}{[E_c(1+\nu_a)\gamma_3 - E_c(1+\nu_a)\gamma_2]\{E_c(1+\nu_a)\beta_1 - E_a[(1-\nu_c)\beta_4 + (1-3\nu_c)(\beta_3 + \beta_4)]\}} \right),$$

$$F = \alpha_1^o \left( \frac{2[E_c(1+\nu_a)\gamma_2 - E_a(1+\nu_c)\gamma_3][E_c(1-\nu_a) - E_a(1-\nu_c)] - [E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c)] \cdot \{E_c(1+\nu_a)\gamma_1 - E_c(1+\nu_a)\gamma_2\}}{[E_c(1+\nu_a)\beta_2 + E_a(1+\nu_c)\beta_3]\{E_c(1+\nu_a)\gamma_1 - E_a[(1-\nu_c)\gamma_4 + (1-3\nu_c)(\gamma_4 - \gamma_3)]\} - E_a[(1-\nu_c)\gamma_4 + (1-3\nu_c)(\gamma_4 - \gamma_3)]} - \frac{[E_c(1+\nu_a)\gamma_2 - E_a(1+\nu_c)\gamma_3]\{E_c(1+\nu_a)\beta_1 - E_a[(1-\nu_c)\beta_4 + (1-3\nu_c)(\beta_3 + \beta_4)]\}}{[E_c(1+\nu_a)\gamma_3 - E_c(1+\nu_a)\gamma_2]\{E_c(1+\nu_a)\beta_1 - E_a[(1-\nu_c)\beta_4 + (1-3\nu_c)(\beta_3 + \beta_4)]\}} \right), \quad (2.69)$$

де

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{Q_1(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{ch} u_0} - \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{2 \operatorname{sh} u_0}, & \gamma_2 &= \frac{Q_1(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{ch} u_0} + \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{2 \operatorname{sh} u_0}, \\ \gamma_3 &= \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{sh} u_0} - \frac{1}{2 \operatorname{ch} u_0} \frac{dQ_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{du_0}, & \gamma_4 &= \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{sh} u_0}; \\ \beta_1 &= (3-4\nu_a) \frac{Q_1(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{ch} u_0} - \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{sh} u_0} + \frac{\operatorname{ch} u_0}{2 \operatorname{sh} u_0} \frac{dQ_2(\operatorname{ch} u_0)}{du_0}, \\ \beta_2 &= (3-4\nu_a) \frac{Q_1(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{ch} u_0} - \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{sh} u_0} + \frac{3 \operatorname{ch} u_0}{2 \operatorname{sh} u_0} \frac{dQ_2(\operatorname{ch} u_0)}{du_0}, \\ \beta_3 &= -(1-2\nu_a) \left( \frac{Q_1(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{ch} u_0} + \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{sh} u_0} \right) + 3 \frac{\operatorname{ch} u_0}{\operatorname{sh} u_0} \frac{dQ_2(\operatorname{ch} u_0)}{du_0}, \\ \beta_4 &= 2(1-2\nu_a) \left( \frac{Q_1(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{ch} u_0} + \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{sh} u_0} \right) + 3 \frac{\operatorname{ch} u_0}{\operatorname{sh} u_0} \frac{dQ_2(\operatorname{ch} u_0)}{du_0}. \end{aligned} \quad (2.70)$$

Підставивши значення постійних у рівняння (2.50), (2.51), (2.66), (2.67), отримаємо в криволінійних координатах (2.42) вирішення крайової задачі розтягу полімерного матеріалу сферолітної будови в напрямку вісі  $x_1$  (рис. 2.6).

## 2.4. Метод розрахунку фізико-механічних властивостей полімерів з орієнтованою структурою

Для розрахунку значень фізико-механічних властивостей полімерного матеріалу орієнтованої сферолітної будови необхідно знати напруження взаємодії між сферолітами, що виникає в аморфному середовищі в процесі деформації полімеру. Для визначення напруження взаємодії між сферолітами  $\alpha_1^0$  скористаємося теоремою про еквівалентні стани [158], виражаючи потенціальну енергію деформації  $U$  через поверхневий інтеграл

$$U = \frac{1}{2V} \sum_{k=1}^{V_k} \int \sigma_{ik} \varepsilon_{ik} dV = \frac{1}{2V} \int_{S_*} \sigma_{in} u_i dS. \quad (2.71)$$

де  $S_*$  – приведена поверхня.

Перше представлення енергії деформації через середні напруження  $\hat{\sigma}_{ij}$  і деформації  $\hat{\varepsilon}_{ij}$  в разі поздовжнього розтягування має такий вигляд:

$$U = 0,5 \cdot \hat{\sigma}_1 \hat{\varepsilon}_1. \quad (2.72)$$

Виражаючи елементарну площадку (2.44) як

$$ds = H_\theta d\theta H_\varphi d\varphi = r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0,5} \text{sh} r \sin \theta d\theta d\varphi$$

і прирівнюючи в першому наближенні приведену поверхню інтегрування  $S_*$  в рівнянні (2.49) до поверхні витягнутого еліпсоїда обертання, сфокусованого зі сферолітом, отримаємо вираз для потенціальної енергії:

$$U = \frac{1}{2V_*} \int_{S_*} \sigma_{in} u_i r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0,5} \text{sh} r \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (2.73)$$

де  $V_* = \frac{4}{3} \pi r_c^3 (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{3/2} \operatorname{ch} r \operatorname{sh}^2 r$  – об'єм еліпсоїда, обмеженого приведеною поверхнею  $S_*$

Враховуючи, що  $\sigma_{in} u_i = \sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a$ , і використовуючи перше представлення енергії деформації, отримаємо:

$$\hat{\sigma}_1 \hat{\varepsilon}_1 = \frac{1}{V_*} \iint_{(S_*)} (\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a) r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0,5} \operatorname{sh} r \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (2.74)$$

Підставляючи в рівняння (2.74) значення однорідних переміщень  $u_r^0$  і  $u_\theta^0$ , значення напружень  $\sigma_r^a$ ,  $\sigma_{r\theta}^a$  з [205], інтегруючи (2.74) по  $\varphi$  від 0 до  $2\pi$  і по  $\theta$  від 0 до  $\pi$  та використовуючи вирази для постійних (2.69), отримаємо значення напруження взаємодії між сферолітами  $\alpha_1^0$  в залежності від діючого середнього напруження  $\hat{\sigma}_1$  і ступеня витягування  $\lambda$ :

$$\alpha_1^0 = \frac{\hat{\sigma}_1}{1 + (1 - 2\nu_a) \chi^2 A_* + (1 + \nu_a) \chi^2 F_*}, \quad (2.75)$$

де  $\chi$  – ступінь кристалічності [201, 203];  $A_*$ ,  $F_*$  – постійні, що мають структуру, яка відповідає виразам (2.69), і в яких функції  $\gamma_1^* \dots \gamma_4^*$ ,  $\beta_1^* \dots \beta_4^*$ , що визначають форму сферолітів, виражені через ступінь витягування  $\lambda$ :

$$\begin{aligned} \gamma_1^* &= \frac{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + (4 - 2\lambda^3) \sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1})}, & \gamma_2^* &= \frac{3\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + (4 + 2\lambda^3) \sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1})}, \\ \gamma_3^* &= \frac{(1 - \lambda^3) \sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1}}, & \gamma_4^* &= 1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_1^* &= (1 - 2\nu_a) \frac{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1}} + \frac{(2\lambda^3 + 1) \ln a + 6\lambda \sqrt{\lambda^4 - \lambda}}{4(\lambda^3 - 1)} + \gamma_1^*, \\ \beta_2^* &= 2(1 - 2\nu_a) \frac{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1}} + 3 \frac{(2\lambda^3 + 1) \ln a + 6\lambda \sqrt{\lambda^4 - \lambda}}{4(\lambda^3 - 1)} + \gamma_2^*, \end{aligned} \quad (2.76)$$

$$\beta_3^* = -4(1 - 2\nu_a) + 3 \frac{(2\lambda^3 + 1)\ln a + 6\lambda\sqrt{\lambda^4 - \lambda}}{2(\lambda^3 - 1)},$$

$$\beta_4^* = 2(1 - 2\nu_a) - 3 \frac{(2\lambda^3 + 1)\ln a + 6\lambda\sqrt{\lambda^4 - \lambda} + 2(\lambda^3 - 1)}{2(\lambda^3 - 1)},$$

$$\ln a = \ln \frac{\lambda\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda^3 - 1}}.$$

Згідно до [203] запишемо друге представлення енергії у такому вигляді:

$$\frac{\hat{\sigma}_1^2}{2E_1} = \frac{r_c^2(\lambda^2 - \lambda^{-1})}{2V_*} \iint_{(S_*)} (\sigma_r^0 u_r^a + \sigma_{r\theta}^0 u_\theta^a) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0,5} \text{sh } r \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (2.77)$$

Підставляючи в (2.77) значення однорідних напружень  $\sigma_r^0$  і  $\sigma_{r\theta}^0$  значення переміщень  $u_r^a$  і  $u_\theta^a$  з [203] і розв'язуючи вираз (2.72) відносно  $E_1$ , визначимо в'язкопружний модуль орієнтованого полімерного середовища сферолітної будови в напрямку  $x_1$ :

$$E_1 = E_a \frac{1 + (1 - 2\nu_a)\chi^2 A_* + (1 + \nu_a)\chi^2 F_*}{1 - (1 + \nu_a)\chi^2 A_{**} - (1 + \nu_a)\chi^2 F_{**}}, \quad (2.78)$$

де  $A_{**}$ ,  $F_{**}$  – постійні, що мають структуру, яка відповідає виразам (2.75), де функції  $\gamma_1^{**} \dots \gamma_4^{**}$ ,  $\beta_1^{**} \dots \beta_4^{**}$ , що визначають форму сферолітів, виражені через ступінь витягування  $\lambda$  таким чином:

$$\gamma_1^{**} = \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4 - 2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})}, \quad \gamma_2^{**} = \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4 + 2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})},$$

$$\gamma_3^{**} = \frac{(2 - 2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}, \quad \gamma_4^{**} = \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}};$$

$$\beta_1^{**} = 2 - 4\nu_a + \frac{1}{2} \frac{\lambda\sqrt{\lambda} [(1 + 2\lambda^3)\ln a + 6\lambda\sqrt{\lambda(\lambda^3 - 1)}]}{(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})(\lambda^3 - 1)} + \gamma_1^{**},$$

$$\begin{aligned}\beta_2^{**} &= 2 - 4\nu_a + \frac{3}{2} \frac{\lambda \sqrt{\lambda} \left[ (1 + 2\lambda^3) \ln a + 6\lambda \sqrt{\lambda(\lambda^3 - 1)} \right]}{(\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})(\lambda^3 - 1)} + \gamma_2^{**}, \\ \beta_3^{**} &= 4\nu_a - 2 + 3 \frac{\lambda \sqrt{\lambda} \left[ (1 + 2\lambda^3) \ln a + 6\lambda \sqrt{\lambda(\lambda^3 - 1)} \right]}{(\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})(\lambda^3 - 1)}, \\ \beta_4^{**} &= (2 - 4\nu_a) \frac{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{(\lambda^3 - 1)}}{2(1 - \lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}} - \frac{3}{2} \frac{\lambda \sqrt{\lambda} \left[ (1 + 2\lambda^3) \ln a + 6\lambda \sqrt{\lambda(\lambda^3 - 1)} \right]}{(\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})(\lambda^3 - 1)}.\end{aligned}$$

Вираз (2.78) дозволяє прогнозувати фізико-механічні властивості орієнтованих полімерних матеріалів сферолітної будови в напрямку вісі витягування і вимагає в першому наближенні знання фізико-механічних властивостей аморфної фази  $E_a, \nu_a$ , сферолітів  $E_c, \nu_c$  і конструктивних та технологічних параметрів технологічного процесу переробки, що сприяє зміні вихідної ізотропної неорієнтованої структури і формуванню орієнтованої структури полімерного середовища. Приклавши до отриманої орієнтованої структури полімеру поперечний розтяг або поздовжній зсув, можна остаточно зруйнувати полімерний матеріал на задані за розміром і формою частинки.

Як в'язкопружні константи орієнтованих сферолітів  $E_c, \nu_c$  пропонуємо використовувати значення в'язкопружних постійних, визначених на підставі рівняння (2.78) для в'язкопружного модуля і з [205] для коефіцієнта Пуассона, при ступені кристалічності  $\chi_c = \chi_{\max}$ , що є максимально можливим для цього полімеру. Іншими словами, моделюється ідеальна будова сфероліта як аморфно-кристалічного середовища, в якому кристаліти і (або) ламелі представляються еліпсоїдальними включеннями в аморфній матриці (рис. 2.6 а), що ідеально адгезійно пов'язані між собою. Пружний модуль таких моделей сферолітів дорівнює в'язкопружному модулю кристалічної решітки ( $E_c^* = E_p$ ). Отримані таким чином значення в'язкопружних констант можна використовувати в подальших обчисленнях як пружні константи сферолітів  $E_c, \nu_c$  при прогнозуванні фізико-механічних властивостей.

З метою визначення ступеня витягування, за якою починається перетворення вихідної неорієнтованої сферолітної структури полімеру на високоорієнтовану, яку легше зруйнувати на окремі частинки заданої форми та розміру, в роботі запропоновано метод розрахунку фізико-механічних властивостей полімерів з орієнтованою сферолітною структурою.

На рис. 2.8 представлені залежності, що дозволяють визначити ступінь витягування  $\lambda$ , за якою починається руйнування сферолітної структури поліетилентерефталату (ПЕТФ), поліаміду (ПІ) і поліетилену (ПЕ). Вихідні дані для отримання кривих 2, 4, 6 [94, 206-211]: ПЕТФ –  $E_c=8239$  МПа,  $\nu_c=0,32$ ,  $E_a=2000$  МПа,  $\nu_a=0,39$ ,  $\chi=0,4$ ; ПІ –  $E_c=5500$  МПа,  $\nu_c=0,35$ ,  $E_a=3400$  МПа,  $\nu_a=0,39$ ,  $\chi=0,1$ ; ПЕ –  $E_c=1020$  МПа,  $\nu_c=0,37$ ,  $E_a=77$  МПа,  $\nu_a=0,39$ ,  $\chi=0,68$ .

Криві 1, 3, 5 відповідають експериментальним даним, отриманим у [182] (на рис. 2.8. позначено (○)). За допомогою позначки (●) нанесено результати, отримані з інших джерел [121, 141] для ПЕТФ і для ПЕ.

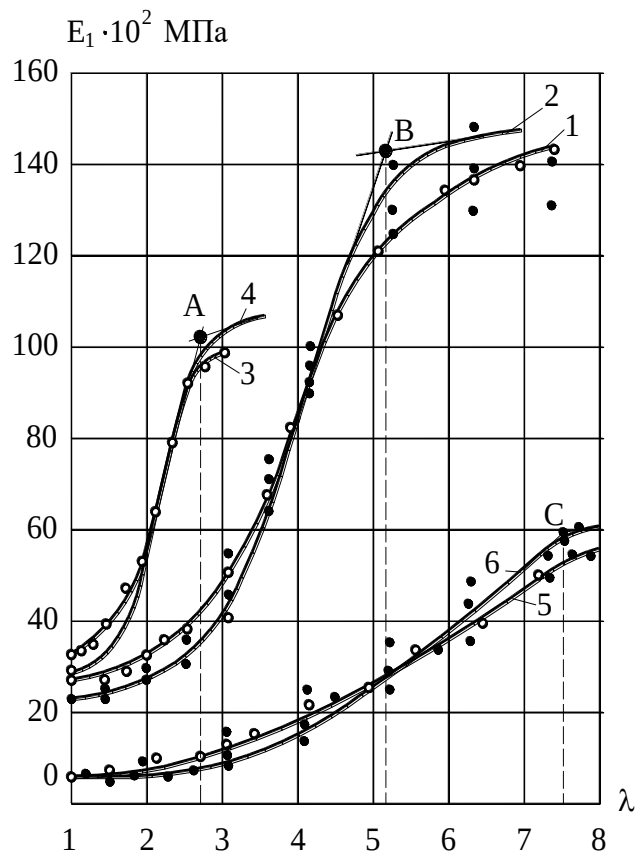


**Рис. 2.8. Залежності в'язкопружного модуля ПЕТФ (1, 2), ПІ (3, 4) і ПЕ (5, 6) від ступеня витягування**

Аналіз даних (рис. 2.8) показує задовільний збіг прогнозованих і вимірних значень в'язкопружного модуля  $E_1$ , найбільший розкид значень не перевищує 14% Для ПЕТФ, 16% – для ПІ і 18% – для ПЕ. Слід зазначити, що при отриманні орієнтованих полімерів як технологічні значення ступеня витягування  $\lambda$  вибираються значення, що відповідають прямолінійним ділянкам залежностей.

Для цих ділянок розкид значень між прогнозованими і вимірюваними значеннями набагато менший і становить не більше 8% для ПЕТФ, не більше 10% для ПЕ, і практично повний збіг для ПІ. Збільшення розкиду між прогнозованими і експериментальними значеннями при великих ступенях витягування пояснюється, мабуть, особливостями початкової стадії руйнування вихідної неорієнтованої сферолітної структури і перетворенням її у високоорієнтовану.

Залежності, представлені на рис. 2.8, дозволяють визначити ступінь витягування, що відповідає природній, при якій починається руйнування сферолітної структури. На прикладі кривої 2 (точка В) показана методика визначення ступеня природного витягування  $\lambda_p$ , яка може служити орієнтиром при проектуванні обладнання, призначеного для переробки полімерних відходів.

Розглядаючи граничний перехід у рівнянні (2.78) при  $\lambda = 1$ , можна показати, що рівняння (2.78) набуває вигляду, який відповідає моделі неорієнтованого стану ізотропного середовища і задовільно описує експериментальні дані.

## **2.5. Визначення фізико-механічних властивостей орієнтованих полімерів в поперечному до орієнтації напрямку**

У попередніх підрозділах було запропоновано модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури та змодельовано процес її зміни під впливом розтягуючої напружень [184, 202]. У результаті було розроблено метод розрахунку фізико-механічних властивостей полімерів з орієнтованою сферолітною структурою.

В цьому підрозділі розглядаємо зміну орієнтованої структури полімерного матеріалу сферолітної будови при дії на нього напруженнями розтягу в поперечному до попередньої орієнтації напрямку.

Завданням дослідження є розробка математичної моделі руйнування попередньо витягнутого полімерного матеріалу в поперечному до витягування напрямку. Це дозволить визначати необхідну деформацію полімерного матеріалу, при якій в'язкопружний модуль в поперечному до витягування напрямку найменший, що дасть можливість розрахувати мінімальні зусилля, які потрібно прикласти до полімерного матеріалу, щоб почався процес руйнування його структури. Розробка математичної моделі руйнування полімерних відходів, яка дозволяє простежити за направленими змінами внутрішньої структури полімеру, що приводять до її руйнування при різних видах напружено-деформованого стану, які генеруються технологічними пристроями в процесі переробки полімерних відходів, дозволить розробити таке обладнання, яке б зберегло в переробленому полімері фізико-механічні характеристики первинного матеріалу при мінімальних витратах енергії.

Розробка математичної моделі вимагає проведення структурного аналізу. В роботі [162] було встановлено, що в неорієнтованому стані полімерних матеріалів сферолітної будови можна виділити два основних рівні надмолекулярної структури – сфероліти з мікрогетерогенною кристалічною структурою і однорідну аморфну частину середовища з неврегульованою структурою. В роботі [184] запропоновано модель неорієнтованої структури полімерних матеріалів, яка задовільно пов'язала показники їх фізико-механічних властивостей із параметрами структури і результатами експериментів інших дослідників. У роботі [200] було визначено ступінь витягування, що відповідає природному, при якому в полімерному матеріалі, що перероблюється, утворюються орієнтовані конгломерати витягнутих сферолітів структури. На прикладі було показано методику визначення ступеня природного витягування, яка може служити орієнтиром при проектуванні обладнання, призначеного для переробки полімерних відходів. В роботі [191] змодельований процес витягнення полімерного матеріалу сферолітної будови, на



основі чого досліджено зміну фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів у напрямку їх деформації розтягу.

На відміну від розглянутих вище публікацій, у дисертаційній роботі будуємо математичну модель, що описує зміну фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів в поперечному до попереднього витягування напрямку.

Розіб'ємо весь процес руйнування структури полімерного матеріалу на чотири етапи: початковий неорієнтований стан (рис. 2.9 а), орієнтований стан (рис. 2.9 б, в) – орієнтована сферолітна структура і руйнування полімерного матеріалу під дією навантаження в поперечному до орієнтації сферолітів напрямку.

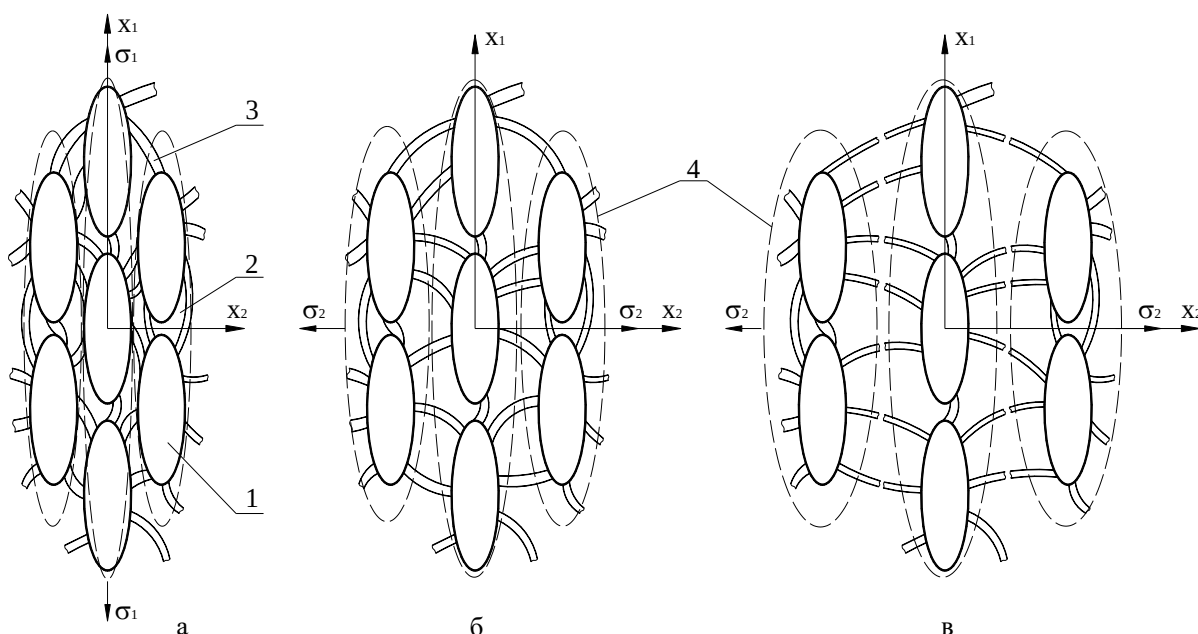


**Рис. 2.9. Модель зміни орієнтованої структури полімеру під час впливу на нього поперечних до орієнтації напружень: 1 – сфероліти; 2 – аморфний простір; 3 – прохідні фібрили; 4 – конгломерати витягнутих сферолітів; а – орієнтований стан (еліпсоїдальна форма); б – поперечний розтяг орієнтованих сферолітів (утворення напружених зв'язків); в – руйнування полімеру на конгломерати витягнутих сферолітів.**

Раніше було встановлено [184, 200], що при значеннях ступеня витягування в межах  $1 \leq \lambda \leq 9 \dots 10$ , зберігається прямий генетичний зв'язок між вихідним сферолітним порядком і орієнтаційним. Зазначені факти є основою для гіпотези про існування зв'язку між деформацією попереднього розтягу і показниками механічних характеристик середовища.

Розглянемо модель руйнування полімерного матеріалу сферолітної будови [200], який спочатку піддається одновісьовій орієнтації зі ступенем витягування  $\lambda$ , а після цього - поперечному до попередньої орієнтації витягуванню. На рис. 2.9 представлена модель руйнування вихідної сферолітної структури полімерного матеріалу при послідовній дії на нього напружень розтягу в двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Припустимо, що зміна форми сферолітів у результаті орієнтаційного витягування відбувається однорідно в напрямку вісі  $x_1$  і при незмінному об'ємі сферолітів [184, 200, 212] ( $\rho_c = \text{const}$ ), а в поперечному до попередньої орієнтації напрямку, тобто в напрямку вісі  $x_2$ , витягнуті сфероліти майже не деформуються, а тільки розтягуються прохідні фібрили (напружені зв'язки) між ними (рис. 2.9), будемо моделювати орієнтаційне витягування як рівномірний стиск або розтяг простору з коефіцієнтом  $\eta$ , чисельно рівним ступеню витягування полімеру:  $\eta = \lambda$ .

Фізико-механічні властивості полімеру орієнтованої структури в напрямку, перпендикулярному до напрямку витягування, визначимо з розгляду двовісового рівномірного розтягу надмолекулярної структури в напрямку вісей  $x_2$  і  $x_3$  напруженнями  $\hat{\sigma}_2 \alpha_2^0 = \hat{\sigma}_3 \alpha_3^0$  (рис. 2.10).

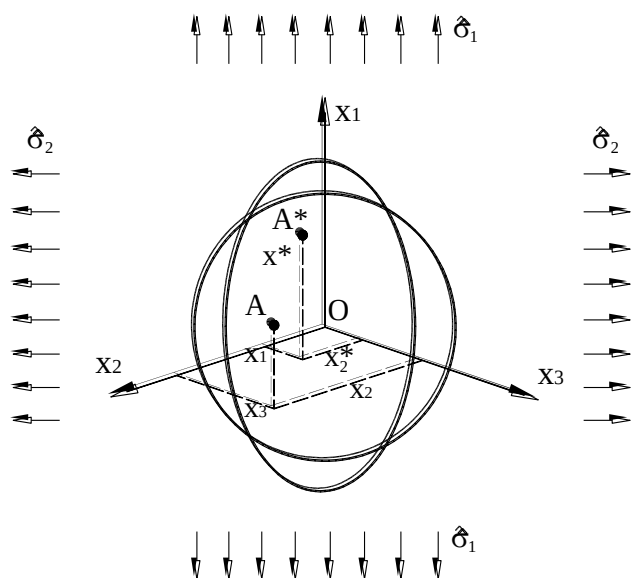


**Рис. 2.10. Модель витягнутого сфероліта**

В'язкопружні постійні орієнтованого полімерного матеріалу будемо визначати, виходячи з позицій мікромеханіки композитних матеріалів [184, 191, 200] із залученням як декартової, так і криволінійної систем координат  $r, \theta, \varphi$ ,

При двовісовому рівномірному розтягу орієнтованої надмолекулярної структури в напрямку вісей  $x_2$  і  $x_3$  в полімерному матеріалі (рис. 2.10)

виникає певний напружений стан:

$$\mathbf{T}^c = (\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 \alpha_1^c + \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2 \alpha_2^c + \mathbf{e}_3 \mathbf{e}_3 \alpha_3^c) \hat{\sigma}_2, \quad (2.79)$$

де  $\alpha_2^c = \alpha_3^c$ ,  $\alpha_1^c$ ,  $\alpha_2^c$ ,  $\alpha_3^c$  – постійні, що характеризують рівень структурних напружень на головних площадках сфероліта;  $\hat{\sigma}_2$  – середні напруження розтягу, які діють перпендикулярно до орієнтації сферолітів, тобто вздовж вісі  $x_2$ .

Тензор напружень (2.79) у витягнутому сфероліті в криволінійних координатах [184] запишеться так:

$$\mathbf{T}^c = (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_r \alpha_r^c + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_\theta \alpha_\theta^c + \mathbf{e}_\varphi \mathbf{e}_\varphi \alpha_\varphi^c + (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_\theta + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_r) \alpha_{r\theta}^c) \hat{\sigma}_2. \quad (2.80)$$

Компоненти тензора напружень витягнутого сфероліта з рівняння (2.80) в криволінійних координатах, використовуючи вирази (2.9) запишемо таким чином:

$$\begin{aligned} \sigma_r^c &= \frac{\hat{\sigma}_2}{4(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \{ \alpha_1^c [(\text{ch} 2r - 1) + \cos 2\theta (\text{ch} 2r - 1)] + \alpha_2^c [(\text{ch} 2r + 1) - \cos 2\theta (\text{ch} 2r + 1)] \}; \\ \sigma_{r\theta}^c &= \frac{\hat{\sigma}_2}{4(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} (\alpha_2^c - \alpha_1^c) \text{sh} 2r \cdot \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (2.81)$$

Компоненти вектора переміщень для витягнутого сфероліта  $\bar{u}^c$  в криволінійних координатах (2.42) будуть виражені таким чином:

$$\begin{aligned} u_r^c &= \frac{\hat{\sigma}_2 r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{4 E_c (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{1/2}} \text{sh} 2r \{ [\alpha_1^c (1 - \nu_c) + \alpha_2^c (1 - 3\nu_c)] + (\alpha_1^c - \alpha_2^c) (1 + \nu_c) \cos 2\theta \}; \\ u_\theta^c &= \frac{\hat{\sigma}_2 r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{4 E_c (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{1/2}} \sin 2\theta \{ (\alpha_2^c - \alpha_1^c) (1 + \nu_c) \text{ch} 2r - [\alpha_1^c (1 - \nu_c) + \alpha_2^c (1 - 3\nu_c)] \}; \end{aligned} \quad (2.82)$$

де  $E_c$  – модуль пружності сфероліта;  $\nu_c$  – коефіцієнт Пуассона сфероліта.

Поле напружень в міжсферолітному просторі виразимо як суму таких полів: поля взаємодії між витягнутими сферолітами, що утворюють надмолекулярну структуру полімеру (гексагональне пакування витягнутих сферолітів – рис. 2.9 б, в), та двох полів, які розсіюються на сферолітах і спадають у міру віддалення від сферолітів. Поле взаємодії між сферолітами у

міжсферолітному просторі, при розтягу напруженнями  $\hat{\sigma}_2 \alpha_2^0$ , виражаємо, з урахуванням [184] таким чином:

$$\mathbf{T}^a = \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 \alpha_2^0 \hat{\sigma}_2 = (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_r \alpha_r^0 + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_\theta \alpha_\theta^0 + \mathbf{e}_\phi \mathbf{e}_\phi \alpha_\phi^0 + (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_\theta + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_r) \alpha_{r\theta}^0) \hat{\sigma}_2. \quad (2.83)$$

Компоненти тензора напружень взаємодії між витягнутими сферолітами для міжсферолітного простору (аморфної фази) при розтягу орієнтованої структури полімеру в напрямку вісі  $x_2$ , з урахуванням [184, 213], можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_r^0 &= \frac{\hat{\sigma}_2}{4(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \alpha_2^0 [(\text{sh} 2r - 1) + \cos 2\theta (\text{ch} 2r - 1)]; \\ \sigma_{r\theta}^0 &= \frac{\hat{\sigma}_2}{4(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \alpha_2^0 \text{sh} 2r \cdot \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (2.84)$$

Компоненти вектора переміщень міжсферолітного простору, які залежать від поля взаємодії між витягнутими сферолітами при розтягу орієнтованої структури полімеру перпендикулярно до напрямку орієнтаційного витягування, тобто в напрямку вісі  $x_2$ , з урахуванням [184], запишемо у такому вигляді:

$$\begin{aligned} u_u^0 &= \frac{\hat{\sigma}_2 r (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{4 E_a (\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta)^{1/2}} \alpha_2^0 [(1 - 3\nu_a) - \nu_a \cos 2\vartheta] \text{sh} 2u; \\ u_\vartheta^0 &= \frac{\hat{\sigma}_2 r (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{4 E_a (\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta)^{1/2}} \alpha_2^0 [(1 + \nu_a) \text{ch} 2u - (1 - 3\nu_a)] \sin 2\vartheta; \\ u_\phi^0 &= 0. \end{aligned} \quad (2.85)$$

де  $E_a$  – в'язкопружний модуль міжсферолітного простору;  $\nu_a$  – коефіцієнт Пуассона міжсферолітного простору.

Прийmemo, що функція, яка задовольняє умову  $\text{div } \bar{\mathbf{u}}^* = 0$ , є переміщенням полімерного середовища у напрямку вісі витягування  $x_1$ . В результаті отримаємо рівняння для компонентів вектора переміщень, що відповідають першому розсіяному полю [184, 200], при розтягу орієнтованого полімеру в напрямку вісей  $x_2$  та  $x_3$ :

$$\begin{aligned}
u_u^* &= \frac{r(\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta}} \frac{(1 + \nu_a)}{4E_a} B \hat{\sigma}_2 \left\{ \left[ 2Q_1(\text{chu}) \text{sh} u - Q_1^{(1)}(\text{chu}) \text{chu} \right] + \left[ 2Q_1(\text{chu}) \text{sh} u + Q_1^{(1)}(\text{chu}) \text{chu} \right] \cos 2\vartheta \right\}, \\
u_\vartheta^* &= -\frac{r(\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta}} \frac{(1 + \nu_a)}{4E_a} B \hat{\sigma}_2 \left\{ \left[ 2Q_1(\text{chu}) \text{chu} + Q_1^{(1)}(\text{chu}) \text{sh} u \right] \sin 2\vartheta \right\}, \\
u_\varphi^* &= 0,
\end{aligned}
\tag{2.86}$$

де  $Q_1(\text{chr})$  та  $Q_1^{(1)}(\text{chr})$  – приєднані функції Лежандра першого та другого ступеня, нульового та першого порядку;  $B$  – постійна, що характеризує рівень напружень першого розсіяного поля, тобто на головних площадках міжсферолітного простору.

Компоненти тензора напружень першого розсіяного поля  $\mathbf{T}_a^*$  в міжсферолітному просторі в криволінійній системі координат  $(\bar{e}_r, \bar{e}_\vartheta, \bar{e}_\varphi)$  на поверхні витягнутого сфероліта при  $u = \text{const}$ , визначаються шляхом розкладання вектора напружень

$$\mathbf{W}_r^* = \frac{E_a}{1 + \nu_a} \left( \frac{1}{H_r} \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial r} + \frac{1}{2} \mathbf{e}_r \times \text{rot } \mathbf{u}^* \right)$$

за ортами криволінійної системи координат з урахуванням виразу (2.86):

$$\begin{aligned}
\sigma_u^* &= \frac{B \hat{\sigma}_2}{4(\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta)} \left\{ \left[ 2Q_1^{(1)}(\text{chu}) \text{sh} u - \frac{dQ_1^{(1)}(\text{chu})}{du} \text{chu} \right] + \left[ 2Q_1^{(1)}(\text{chu}) \text{sh} u + \frac{dQ_1^{(1)}(\text{chu})}{du} \text{chu} \right] \cos 2\vartheta \right\}, \\
\sigma_{u\vartheta}^* &= -\frac{B \hat{\sigma}_2}{4(\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta)} \left[ \frac{3}{2} Q_1^{(1)}(\text{chu}) \text{chu} + \frac{1}{2} \frac{dQ_1^{(1)}(\text{chu})}{du} \text{sh} u + Q_1(\text{chu}) \text{sh} u \right] \sin 2\vartheta.
\end{aligned}
\tag{2.87}$$

Поля напружень і переміщень, у випадку другого розсіяного поля, визначимо таким же способом, як і в попередній задачі, тобто розв'язуючи рівняння Папковича-Нейбера. Таким чином, отримаємо компоненти вектора переміщення в криволінійній системі координат для аморфного середовища (міжсферолітного простору):

$$\begin{aligned}
u_u^{**} &= \frac{r(\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta}} \frac{(1 + v_a)}{4E_a} C \hat{\sigma}_2 \left\{ \left[ (3 - 4v_a) Q_1(\text{ch} u) \text{sh} u - Q_1^{(1)}(\text{ch} u) \text{ch} u + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{dQ_2(\text{ch} u)}{du} \frac{\text{ch}^2 u_0}{2} \right] + \left[ (3 - 4v_a) Q_1(\text{ch} u) \text{sh} u - Q_1^{(1)}(\text{ch} u) \text{ch} u + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{dQ_2(\text{ch} u)}{du} \frac{3\text{ch}^2 u_0}{2} \right] \right\} \cdot \cos 2\vartheta, \\
u_\vartheta^{**} &= -\frac{r(\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta}} \frac{(1 + v_a)}{4E_a} C \hat{\sigma}_2 \left[ (2 - 4v_a) Q_1(\text{ch} u) \text{ch} u + 3Q_2(\text{ch} u) \text{ch}^2 u_0 \right] \sin 2\vartheta.
\end{aligned} \tag{2.88}$$

де  $C$  – постійна, що характеризує рівень напружень другого розсіяного поля в міжсферолітному просторі орієнтованого полімеру.

Компоненти тензора напружень другого розсіяного поля, що діють на поверхні витягнутих сферолітів ( $u = \text{const}$ ), в криволінійній системі координат  $(\bar{e}_r, \bar{e}_\theta, \bar{e}_\varphi)$ , визначимо шляхом розкладання вектора напружень

$$\mathbf{W}_r^{**} = \frac{E_a}{1 + v_a} \left( \frac{1}{H_r} \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial r} + \frac{1}{2} \mathbf{e}_r \times \text{rot} \mathbf{u}^{**} + \frac{\mathbf{e}_r v_a}{1 - 2v_a} \text{div} \mathbf{u}^{**} \right)$$

за ортами даної системи координат з урахуванням виразу (2.88):

$$\begin{aligned}
\sigma_r^{**} &= \frac{C \hat{\sigma}_2}{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta} \left\{ 2 \left[ (1 - v_a) \text{sh} r \cos \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial r} - v_a \text{ch} r \sin \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} \right] - \text{ch} r \cdot \cos \theta \times \right. \\
&\quad \times \left( \frac{\partial^2 B_1^*}{\partial r^2} + \frac{\sin 2\theta}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} - \frac{\text{sh} 2r}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_1^*}{\partial r} \right) - \frac{\partial^2 B_0^*}{\partial r^2} - \frac{\sin 2\theta}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_0^*}{\partial \theta} + \\
&\quad \left. + \frac{\text{sh} 2r}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_0^*}{\partial r} \right\}, \\
\sigma_{r\theta}^{**} &= -\frac{C \hat{\sigma}_2}{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta} \left[ (1 - 2v_a) \left( \text{sh} r \cos \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} - \text{ch} r \sin \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial r} \right) - \right. \\
&\quad - \frac{\partial^2 B_1^*}{\partial r \partial \theta} + \frac{\sin 2\theta}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_1^*}{\partial r} + \frac{\text{sh} 2r}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 B_0^*}{\partial r \partial \theta} + \frac{\sin 2\theta}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_0^*}{\partial r} + \\
&\quad \left. + \frac{\text{sh} 2r}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_0^*}{\partial \theta} \right],
\end{aligned} \tag{2.89}$$

$$\text{де } B_0^* = 0,5r_c^2(\lambda^2 - \lambda^{-1}) \cdot C, \quad B_1^* = 0,5r_c(\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} C,$$

Поля переміщень та напружень в аморфному середовищі (міжсферолітному просторі) визначаються як сума полів взаємодії між витягнутими сферолітами (2.84) та (2.85), першого розсіяного поля (2.86) та (2.87) і другого розсіяного поля (2.88) та (2.89):

$$u_r^a = u_r^0 + u_r^* + u_r^{**}, \quad u_\theta^a = u_\theta^0 + u_\theta^* + u_\theta^{**}. \quad (2.90)$$

$$\sigma_r^a = \sigma_r^0 + \sigma_r^* + \sigma_r^{**}, \quad \sigma_{r\theta}^a = \sigma_{r\theta}^0 + \sigma_{r\theta}^* + \sigma_{r\theta}^{**}. \quad (2.91)$$

Невідомі постійні  $\alpha_2^0$ ,  $\alpha_1^c$ ,  $\alpha_2^c$ ,  $B$ ,  $C$ , що входять у рівняння (2.81)-(2.91) визначаємо з граничних умов, якими є умови ідеального контакту поверхонь витягнутих сферолітів і міжсферолітного простору (аморфної фази), що виражається умовою неперервності полів напружень та переміщень у вигляді:

$$u_r^c = u_r^a, \quad u_\theta^c = u_\theta^a, \quad \sigma_r^c = \sigma_r^a, \quad \sigma_{r\theta}^c = \sigma_{r\theta}^a. \quad (2.92)$$

Задовольняючи умову ідеального контакту (2.92), тобто прирівнюючи коефіцієнти при поліномах Лежандра, отримаємо вирази для невідомих постійних через напруження взаємодії між витягнутими сферолітами, що лишилося невідомим:

$$\begin{aligned} \alpha_1^c &= 2\alpha_2^0 \frac{E_c \{ [\beta_1 \gamma_3 - \gamma_4 (\beta_2 - \beta_1)] + 2v_a [\gamma_4 (\beta_4 - \beta_2 + 5\beta_3) - 3\beta_4 \gamma_3] \} + E_a (1 - 3v_c) \beta_4 \gamma_3}{E_c (1 + v_a) (\beta_1 \gamma_2 - 2\beta_2 \gamma_1) + 2E_a (1 - 2v_c) (\beta_4 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_4)}, \\ \alpha_2^c &= \alpha_2^0 \frac{E_c \{ [\gamma_1 (\beta_3 - \beta_1) - \beta_1 \gamma_3] + v_a [\gamma_4 (3\beta_1 \gamma_3 - 3\gamma_1 \beta_3 - \beta_1 \gamma_1)] \} + E_a (1 - v_c) (\beta_4 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_4)}{E_c (1 + v_a) (\beta_1 \gamma_2 - 2\beta_2 \gamma_1) + 2E_a (1 - 2v_c) (\beta_4 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_4)}, \\ B &= \alpha_2^0 \frac{E_c \{ (1 + v_a) \beta_1 + 2(1 - 3v_a) \beta_3 \} - 4E_a (1 - 2v_c) \beta_4}{E_c (1 + v_a) (\beta_1 \gamma_2 - 2\beta_2 \gamma_1) + 2E_a (1 - 2v_c) (\beta_4 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_4)}, \\ C &= 4\alpha_2^0 \frac{E_c (1 + v_a) (\gamma_2 - \gamma_1) + E_a (1 + v_c) (\gamma_4 - \gamma_3)}{E_c (1 + v_a) (\beta_1 \gamma_2 - 2\beta_2 \gamma_1) + 2E_a (1 - 2v_c) (\beta_4 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_4)}, \end{aligned} \quad (2.93)$$

де  $\gamma_1 \dots \gamma_4$  та  $\beta_1 \dots \beta_4$  – функції, що визначаються з таких рівнянь:

$$\begin{aligned}
\gamma_1 &= \frac{2Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0} - \frac{Q_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{\text{sh } r_0}, & \gamma_2 &= \frac{2Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0} + \frac{Q_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{\text{sh } r_0}, \\
\gamma_3 &= \frac{3}{2} \frac{Q_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{\text{sh } r_0} + \frac{Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0} + \frac{1}{2\text{ch } r_0} \frac{dQ_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{dr_0}, & \gamma_4 &= \frac{1}{2\text{ch } r_0} \frac{dQ_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{dr_0}; \\
\beta_1 &= (3 - 4\nu_a) \frac{2Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0} - \frac{Q_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{\text{sh } r_0} + \frac{\text{ch } r_0}{2\text{sh } r_0} \frac{dQ_2(\text{ch } r_0)}{dr_0}, \\
\beta_2 &= (1 - 2\nu_a) \frac{2Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0} + 3Q_2(\text{ch } r_0), \\
\beta_3 &= (1 - 2\nu_a) \left( \frac{Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0} + \frac{Q_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{\text{sh } r_0} \right) - 3 \frac{\text{ch } r_0}{\text{sh } r_0} Q_2^{(1)}(\text{ch } r_0), \\
\beta_4 &= (1 - 2\nu_a) \frac{Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0}.
\end{aligned} \tag{2.94}$$

Підставляючи значення коефіцієнтів  $\alpha_2^0$ ,  $\alpha_1^c$ ,  $\alpha_2^c$ ,  $B$ ,  $C$  з (2.93) та функцій з (2.94) у рівняння (2.81), (2.82) і (2.90), (2.91) отримаємо вирішення задачі орієнтації полімерного середовища сферолітної будови при рівномірному двовісьовому розтягу в напрямку, перпендикулярному до вісі витягування.

Невідоме напруження взаємодії між витягнутими сферолітами визначимо за допомогою методу, описаного в [200]. Перше представлення потенціалу деформації у випадку рівномірного двовісьового розтягу орієнтованого полімерного середовища сферолітної будови запишемо в такому вигляді:

$$2\hat{\sigma}_2 \hat{\varepsilon}_2 = \frac{1}{V} \iint_{(S)} (\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a) r^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0.5} \text{sh } r \sin \theta d\theta d\varphi. \tag{2.95}$$

де  $V = \frac{4}{3} \pi r_c^3 (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{3/2} \text{ch } r \text{sh}^2 r$  – об'єм витягнутого еліпсоїда, обмеженого поверхнею  $S$ .

З рівняння (2.95), з урахуванням виразів (2.84), (2.85), (2.87), (2.89), (2.91), (2.93), (2.94) визначимо напруження взаємодії між витягнутими сферолітами при розтягу орієнтованого полімерного матеріалу в напрямках  $x_2$  та  $x_3$ , що є перпендикулярними до вісі витягування:



$$\alpha_2^0 = \frac{\hat{\sigma}_2}{1 + \frac{2}{3}\chi^2 \left\{ \frac{(1-2\nu_a)(E_c[(1+\nu_a)\beta_1^* + 2(1-3\nu_a)\beta_3^*] - 4E_a(1-2\nu_c)\beta_4^*)}{E_c(1+\nu_a)(\beta_1^* \cdot \gamma_2^* - 2\beta_2^* \cdot \gamma_1^*) + 2E_a(1-2\nu_c)(\beta_4^* \cdot \gamma_2^* - \beta_2^* \cdot \gamma_4^*)} + \right.} \quad (2.96)$$

$$\left. + \frac{(1+\nu_a)(7-5\nu_a)[E_c(1+\nu_a)(\gamma_2^* - \gamma_1^*) + E_a(1+\nu_c)(\gamma_4^* - \gamma_3^*)]}{E_c(1+\nu_a)(\beta_1^* \cdot \gamma_2^* - 2\beta_2^* \cdot \gamma_1^*) + 2E_a(1+\nu_c)(\beta_4^* \cdot \gamma_2^* - \beta_2^* \cdot \gamma_4^*)} \right\},$$

де  $\chi$  – ступень кристалічності;

$$\gamma_1^* = \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4-2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1})}, \quad \gamma_2^* = \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4+2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1}},$$

$$\gamma_3^* = \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4+2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1})}, \quad \gamma_4^* = \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4-2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1})};$$

$$\beta_1^* = \frac{(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})[(\lambda^3-1)(3-4\nu_a) + 3\lambda^3] - 1}{(\lambda^3-1)(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1})},$$

$$\beta_2^* = \frac{(\lambda^3-1)(10-4\nu_a)(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}) + 9\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 18(1+\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda^3-1)(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1})},$$

$$\beta_3^* = \frac{\beta_2^*}{2},$$

$$\beta_4^* = (1-2\nu_a) \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1}},$$

$$\ln a = \ln \frac{\lambda\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda^3-1}}{\lambda\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda^3-1}}. \quad (2.97)$$

Друге представлення потенціалу деформації, згідно з [191], можна записати у вигляді:

$$\hat{\sigma}_2^2 \left( \frac{1-\nu_{23}}{E_2} \right) = \frac{1}{V} \iint_{(S)} (\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a) r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0.5} \text{sh} r \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (2.98)$$

Інтегруючи рівняння (2.98) з урахуванням виразів (2.85), (2.90), (2.93)-(2.97), отримаємо залежності для в'язкопружних постійних  $E_2$  та  $\nu_{23}$  від параметрів витягування і структурних характеристик полімерного матеріалу:

$$\frac{1-\nu_{23}}{E_2} = \frac{1-\nu_a}{E_a} \alpha_2^0 - \frac{1+\nu_a}{2E_a} \left\{ B(\gamma_1^{**} - \gamma_2^{**}) + \frac{C}{2} (\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**}) (\beta_4^{**} \cdot \gamma_2^{**} - \beta_2^{**} \cdot \gamma_4^{**}) \right\}. \quad (2.99)$$

Вираз (2.99) пов'язує між собою дві постійні  $E_2$  та  $\nu_{23}$ . Підставляючи в (2.98) значення переміщень  $u_r^a$  та  $u_\theta^a$  з [191, 214], значення напруження взаємодії між витягнутими сферолітами з (2.96) і розв'язуючи рівняння (2.99) відносно  $E_2$ , знайдемо в'язкопружний модуль  $E_2$  попередньо орієнтованої структури полімеру в перпендикулярному до вісі витягування напрямку  $x_2$ :

$$E_2 = E_a \frac{1 + \frac{2}{3}\chi^2 \left\{ \frac{(1-2\nu_a)(E_c[(1+\nu_a)\beta_1^* + 2(1-3\nu_a)\beta_3^*] - 4E_a(1-2\nu_c)\beta_4^*)}{E_c(1+\nu_a)(\beta_1^* \cdot \gamma_2^* - 2\beta_2^* \cdot \gamma_1^*) + 2E_a(1-2\nu_c)(\beta_4^* \cdot \gamma_2^* - \beta_2^* \cdot \gamma_4^*)} + \right.}{1 - \frac{1}{3}\chi^2 \left\{ \frac{(1+\nu_a)(E_c[(1+\nu_a)\beta_1^{**} + 2(1-3\nu_a)\beta_3^{**}] - 4E_a(1-2\nu_c)\beta_4^{**})}{E_c(1+\nu_a)(\beta_1^{**} \cdot \gamma_2^{**} - 2\beta_2^{**} \cdot \gamma_1^{**}) + 2E_a(1-2\nu_c)(\beta_4^{**} \cdot \gamma_2^{**} - \beta_2^{**} \cdot \gamma_4^{**})} + \right.},$$

$$+ \frac{(1+\nu_a)(7-5\nu_a)[E_c(1+\nu_a)(\gamma_2^* - \gamma_1^*) + E_a(1+\nu_c)(\gamma_4^* - \gamma_3^*)]}{E_c(1+\nu_a)(\beta_1^* \cdot \gamma_2^* - 2\beta_2^* \cdot \gamma_1^*) + 2E_a(1-2\nu_c)(\beta_4^* \cdot \gamma_2^* - \beta_2^* \cdot \gamma_4^*)} \left. \right\} + \frac{(1+\nu_a)(7-5\nu_a)[E_c(1+\nu_a)(\gamma_2^{**} - \gamma_1^{**}) + E_a(1+\nu_c)(\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**})]}{E_c(1+\nu_a)(\beta_1^{**} \cdot \gamma_2^{**} - 2\beta_2^{**} \cdot \gamma_1^{**}) + 2E_a(1-2\nu_c)(\beta_4^{**} \cdot \gamma_2^{**} - \beta_2^{**} \cdot \gamma_4^{**})} \left. \right\} \quad (2.100)$$

Тут  $\gamma_2^{**}$  і  $\beta_1^{**}$  – функції, що визначають зміну характеристик надмолекулярної структури, відповідно до виразу (2.93), від ступеня витягування [200, 213]:

$$\gamma_1^{**} = \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4-2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})}, \quad \gamma_2^{**} = \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4+2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})},$$

$$\gamma_3^{**} = \frac{\gamma_2^{**}}{2}, \quad \gamma_4^{**} = \frac{\gamma_1^{**}}{2};$$

$$\beta_1^{**} = 3-4\nu_a + \frac{\lambda\sqrt{\lambda}(3\lambda^3-1)\ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1}(1+\lambda^3)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}},$$

$$\beta_2^{**} = 3-4\nu_a + \frac{\lambda\sqrt{\lambda}(9\lambda^3-1)\ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1}(5+3\lambda^3)}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})},$$

$$\beta_3^{**} = (1-2\nu_a) \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (1+\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}} - \frac{9\lambda^4\sqrt{\lambda} \ln a + 6\lambda^3(2+\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})},$$

$$\beta_4^{**} = (1-2\nu_a) \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})} - \frac{9\lambda^4\sqrt{\lambda} \ln a + 6\lambda^3(2+\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})}. \quad (2.101)$$

Рівняння (2.100), з урахуванням виразів (2.101), дозволяє прогнозувати фізико-механічні властивості орієнтованих полімерних матеріалів у напрямку, перпендикулярному до вісі витягування, в залежності від фізико-механічних властивостей аморфної ( $E_a, \nu_a$ ) та кристалічної ( $E_c, \nu_c$ ) фаз, а також від ступеня кристалічності  $\chi$  і від величини деформації попереднього розтягу ( $\varepsilon_1 = \lambda - 1$ ).

З рівняння (2.99) і (2.100), з урахуванням (2.101), запишемо вираз для визначення коефіцієнта Пуассона  $\nu_{23}$ :

$$\nu_{23} = 1 - E_2 \left\{ \frac{4(1 - \nu_a)\alpha_2^0 - (1 + \nu_a) \left[ 2B(\gamma_1^{**} - \gamma_2^{**}) + C(\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**}) (\beta_4^{**} \cdot \gamma_2^{**} - \beta_2^{**} \cdot \gamma_4^{**}) \right]}{4E_a} \right\}. \quad (2.102)$$

Розглядаючи фізико-механічні характеристики орієнтованого полімерного матеріалу (рис. 2.10) в напрямку вісі  $x_3$ , ми встановили, що, з точністю до постійних в рівняннях (2.101), в'язкопружний модуль  $E_3 = E_2$ . Таким чином, у процесі витягування в орієнтованому полімері формується трансверсально анізотропний тип в'язкопружної симетрії [178, 212] і виникає площина поперечної ізотропії  $x_2 0 x_3$ .

Вирази (2.100) та (2.102) дозволяють прогнозувати фізико-механічні властивості полімерного матеріалу в залежності від деформації попереднього розтягу (ступеня витягування).

За допомогою отриманої математичної моделі було досліджено вплив ступеня витягування на фізико-механічні властивості полімерів у напрямку, поперечному до витягування.

На рис. 2.11 представлено залежності в'язкопружного модуля поліетилентерефталату (ПЕТФ), поліаміду (ПА) і поліетилену (ПЕ) від ступеня витягування в напрямку, поперечному до витягування.

Вихідні дані для отримання кривих 1, 2, 3 [94, 207-211]:

для ПЕТФ –  $E_c = 8239$  МПа,  $\nu_c = 0,32$ ;  $E_a = 2000$  МПа,  $\nu_a = 0,39$ ,  $\chi = 0,40$ ;

для ПА –  $E_c = 5500$  МПа,  $\nu_c = 0,35$ ,  $E_a = 3400$  МПа,  $\nu_a = 0,39$ ,  $\chi = 0,10$ ;

для ПЕ –  $E_c = 1200$  МПа,  $\nu_c = 0,37$ ,  $E_a = 77$  МПа,  $\nu_a = 0,39$ ,  $\chi = 0,68$ .

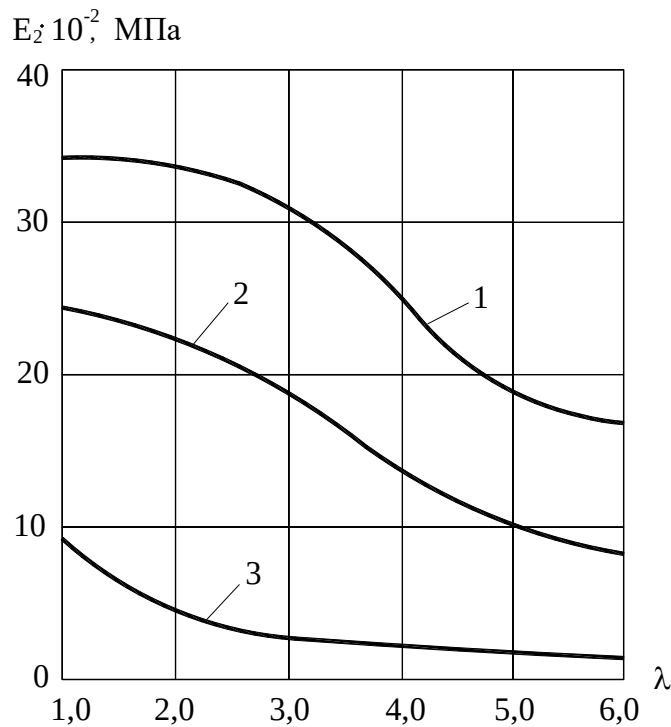


**Рис. 2.11. Залежності в'язкопружного модуля в поперечному до деформації попереднього розтягу напрямку від ступеня витягування:  
1 – ПЕТФ; 2 – ПА; 3 – ПЕ**

Як видно з рис. 2.11, в'язкопружні модулі у поперечному до витягування напрямку зменшуються зі збільшенням деформації попереднього розтягу. Але, після досягнення певного значення ступеня витягування, що є різним для кожного матеріалу (рис. 2.11), подальше його збільшення призведе до несуттєвого зменшення в'язкопружного модуля в поперечному напрямку.

Тому, розтягнувши поліамід на 100 %, поліетилентерефталат на 300 %, а поліетилен на 200 %, можна домогтися мінімального значення в'язкопружного модуля в поперечному напрямку. Надмірне витягування полімерного матеріалу не приведе до суттєвого зменшення в'язкопружного модуля, а тільки збільшить витрати енергії перероблювальним пристроєм.

Розроблена математична модель дозволяє простежити за направленими змінами внутрішньої структури полімерного матеріалу, які приводять до його

руйнування, при різному напружено-деформованому стані, що генерується технологічним обладнанням для переробки полімерних відходів.

За допомогою отриманих у роботі залежностей можна визначити необхідний ступінь витягування полімерного матеріалу, при якому в'язкопружний модуль в поперечному до деформації напрямку найменший, що дозволить розрахувати мінімальні зусилля, які потрібно прикласти до полімеру, щоб почався процес руйнування його структури.

Розрахувавши в'язкопружний модуль при розтягу полімерного матеріалу в поперечному до попереднього витягування напрямку за рівнянням (2.100) та врахувавши вирази (2.96) і (2.38) можна визначити мінімальну поперечну до попередньо орієнтованої структури полімеру деформацію розтягу залежно від ступеня попереднього витягування, при якому почнеться пластичне послаблення і часткове руйнування його структури.

Таким чином, отримані результати можуть бути використані при розробці технологічного обладнання для переробки полімерних відходів, яке дозволить створювати такий напружено-деформований стан у полімерному матеріалі, за якого він буде руйнуватися по границях орієнтованих конгломератів витягнутих сферолітів. Таке руйнування збереже в переробленому полімерному матеріалі фізико-механічні характеристики первинного матеріалу та забезпечить мінімальні витрати енергії.

Результати проведеного дослідження було використано при проектуванні пристрою для переробки полімерних відходів, що створює напружено-деформований стан, потрібний для руйнування структури полімерного матеріалу.

## **2.6. Визначення фізико-механічних властивостей полімеру при впливі напружень зсуву**

В рамках запропонованої в [184, 191] концепції сферолітної будови полімерних матеріалів розглянемо процес руйнування зв'язків між попередньо

орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів при дії на полімер напружень зсуву в поздовжньому та поперечному до попередньої орієнтації напрямках.

У роботах [184, 200, 202] розглянуто процес витягнення і орієнтації сферолітів під дією напружень розтягу в поздовжньому напрямку та часткового руйнування зв'язків між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів під дією напружень стиску.

Напруження розтягу та стиску можна створити в полімерному матеріалі, пропускаючи його між зубчастими валками. Для остаточного руйнування зв'язків між орієнтованими конгломератами сферолітів необхідно після пропускання полімерного матеріалу між зубчастими валками піддати його такому впливу, який приведе до виникнення в матеріалі напружень зсуву в поздовжньому та поперечному до орієнтації витягнутих сферолітів напрямках.

Здійснення процесу переробки полімерних відходів у два етапи дозволяє суттєво скоротити енергоємність цього процесу і зберігати у переробленому полімері механічні властивості, що близькі до оригінальних.

Переробка полімерних відходів здійснюється шляхом руйнування зв'язків між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів, що забезпечується за рахунок зменшення напружень однорідної взаємодії між витягнутими сферолітами. Для інтенсифікації процесу руйнування вказаних зв'язків полімерний матеріал після дії на нього напружень розтягу і стиску піддається впливу напружень зсуву.

Вплив напружень зсуву на орієнтовані конгломерати сферолітів приводить не тільки до їх відносного зсуву, але й до їх повороту, що сприяє руйнуванню тих зв'язків між конгломератами сферолітів, що не були зруйновані їх взаємним зсувом.

У результаті впливу на полімерний матеріал напруженнями розтягу, стиску та зсуву сферолітна структура полімеру руйнується. При цьому полімерний матеріал структурується, тобто складається, із майже не зв'язаних між собою конгломератів витягнутих сферолітів. Далі полімерний матеріал зі

структурованою будовою потрапляє під вплив пристрою, що остаточно його руйнує, відокремлюючи згадані конгломерати один від одного. У зв'язку з тим, що міцність структурованого полімеру набагато менша від міцності самих сферолітів, процес руйнування полімерних відходів відбувається з набагато меншими енерговитратами.

Таким чином, завданням нашого дослідження є отримання аналітичних залежностей, що дозволять визначати фізико-механічні характеристики полімерного матеріалу при поздовжньому та поперечному зсуві. За допомогою отриманих залежностей, знаючи властивості певного полімеру, можна визначати мінімальну деформацію зсуву, яку необхідно створити перероблювальним обладнанням для остаточного руйнування зв'язків між конгломератами витягнутих сферолітів, тобто для остаточного подрібнення полімерів.

### 2.6.1. Фізико-механічні властивості полімеру при поперечному зсуві

Розгляд фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів з орієнтованою структурою у випадку поперечного зсуву під дією напруження  $\sigma_{12}$  дозволяє визначити в'язкопружний модуль зсуву  $G_{12}$  (рис. 2.12 а).

Для визначення фізико-механічних властивостей (в'язкопружного модуля при зсуві) в поперечній до напрямку витягування площині розглянемо випадок поперечного зсуву під дією напруження  $\sigma_{12}$  попередньо орієнтованого полімерного матеріалу.

Під час поперечного зсуву в сфероліті виникає напружений стан, що, згідно з діадним представленням [158, 184, 215], можна записати в такому вигляді:

$$\mathbf{T} = \vec{e}_1 \vec{e}_1 \sigma_1 + \vec{e}_2 \vec{e}_2 \sigma_2 + \vec{e}_3 \vec{e}_3 \sigma_3 + (\vec{e}_1 \vec{e}_2 + \vec{e}_2 \vec{e}_1) \cdot \sigma_{12} + (\vec{e}_2 \vec{e}_3 + \vec{e}_3 \vec{e}_2) \cdot \sigma_{23} + (\vec{e}_3 \vec{e}_1 + \vec{e}_1 \vec{e}_3) \cdot \sigma_{31}, \quad (2.103)$$

де  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$  – одиничні орти декартової системи координат;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – нормальні напруження, що діють на площадках, перпендикулярних до відповідних вісей

системи координат;  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{23}$ ,  $\sigma_{31}$  – тангенціальні (дотичні) напруження, що діють на тих же площадках.

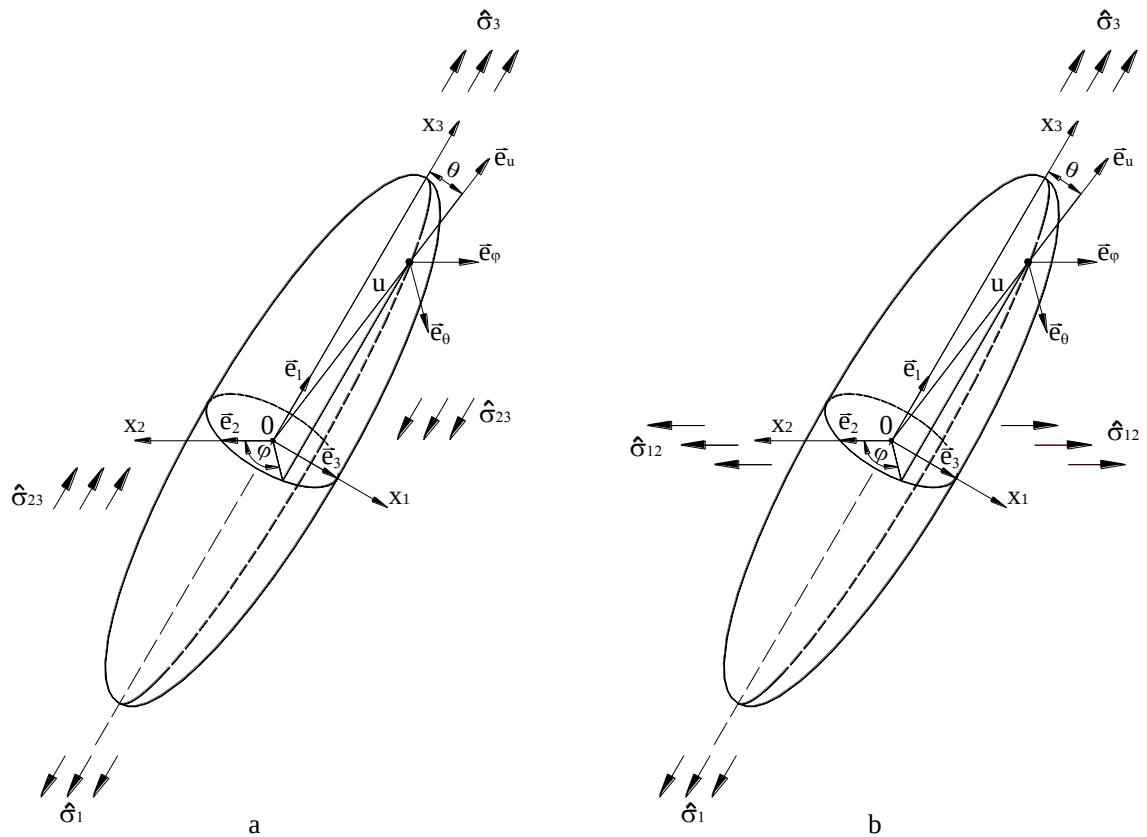


**Рис. 2.12. Вплив напружень зсуву на попередньо витягнутий сфероліт:**

**а – поздовжний зсув в площині первинного розтягу;**

**б – поперечний зсув в площині, перпендикулярній до первинного розтягу**

Зорієнтуємо вісі координат таким чином, щоб на площадках елементарного об'єму, обмеженого еліпсоїдальною поверхнею, нормальні напруження були відсутні. Представимо кожне головне напруження як добуток середнього напруження  $\hat{\sigma}_{12}^0$ , що діє на сфероліт в площині  $x_1 0 x_2$ , та невідомих постійних  $\alpha_{12}^0$ , що характеризують рівень напружень однорідної взаємодії і рівень напружень на головних площадках. Тоді рівняння (2.103) перепишеться таким чином:

$$\mathbf{T}_c = (\vec{e}_1 \vec{e}_2 + \vec{e}_2 \vec{e}_1) \cdot \alpha_{12}^0 \cdot \hat{\sigma}_{12}, \quad (2.104)$$



де  $\hat{\sigma}_{12}$  – середнє напруження поперечного зсуву, що діє на витягнутий сфероліт у площині  $x_1 0 x_2$ ;  $\alpha_{12}^0$  – напруження взаємодії між витягнутими сферолітами, що виникають у результаті зміни напружено-деформованого стану сферолітів.

У сферичних координатах  $r, \theta, \varphi$  тензор напружень (2.104) можна виразити таким чином [158, 215]:

$$\mathbf{T}_c = (\bar{e}_r \bar{e}_r \alpha_r^c + \bar{e}_\theta \bar{e}_\theta \alpha_\theta^c + \bar{e}_\varphi \bar{e}_\varphi \alpha_\varphi^c + (\bar{e}_r \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_r) \cdot \alpha_{r\varphi}^c + (\bar{e}_\theta \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_\theta) \cdot \alpha_{\theta\varphi}^c + (\bar{e}_r \bar{e}_\theta + \bar{e}_\theta \bar{e}_r) \cdot \alpha_{r\theta}^c) \hat{\sigma}_{12}, \quad (2.105)$$

де  $\alpha_i^c$  – невідома постійна, яка визначається з крайових умов, якими є умови ідеальності адгезійної взаємодії витягнутого сфероліта і аморфної фази (міжсферолітного простору), що дозволяє говорити про безперервність полів напружень та переміщень. Крайові умови розглянуто нижче.

Вектор полів переміщень для витягнутих сферолітів, згідно з [158, 184], можна представити в такий спосіб:

$$\mathbf{u}_c = \left( \frac{1+\nu_c}{E_c} \alpha_{12}^c + K \right) x_2 \bar{e}_1 \hat{\sigma}_{12} + \left( \frac{1+\nu_c}{E_c} \alpha_{12}^c - K \right) x_1 \bar{e}_2 \hat{\sigma}_{12}, \quad (2.106)$$

де  $E_c$  – модуль пружності сфероліта;  $\nu_c$  – коефіцієнт Пуассона сфероліта;  $K$  – постійна, що характеризує обертання витягнутого сфероліта навколо вісі  $0x_3$  як твердого тіла;  $\alpha_{12}^c$  – невідома постійна.

Невідомі постійні  $K$  та  $\alpha_{12}^c$  визначаються із розв’язання крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам:

$$u_r^c = u_r^a, \quad u_\theta^c = u_\theta^a, \quad \sigma_r^c = \sigma_r^a, \quad \sigma_{r\theta}^c = \sigma_{r\theta}^a. \quad (2.107)$$

Поле напружень у просторі між витягнутими сферолітами можна виразити через суму полів напружень:

- поля напружень взаємодії між витягнутими сферолітами, що утворюють структуру полімерного матеріалу у вигляді гексагонального пакування;
- соленоїдальне і вихрове поля, які розсіюються на сферолітах.

Поле однорідної взаємодії між витягнутими сферолітами у випадку впливу на полімерний матеріал напружень поперечного зсуву, з урахуванням виразів, отриманих в роботах [158, 184, 191, 200, 201, 215], виразиться таким чином:

$$\mathbf{T}_a^o = (\bar{e}_r \bar{e}_r \alpha_r^o + \bar{e}_\theta \bar{e}_\theta \alpha_\theta^o + \bar{e}_\varphi \bar{e}_\varphi \alpha_\varphi^o + (\bar{e}_r \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_r) \cdot \alpha_{r\varphi}^o + (\bar{e}_\theta \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_\theta) \cdot \alpha_{\theta\varphi}^o + (\bar{e}_r \bar{e}_\theta + \bar{e}_\theta \bar{e}_r) \cdot \alpha_{r\theta}^o) \hat{\sigma}_{12}, \quad (2.108)$$

Поле відносних переміщень витягнутих сферолітів або конгломератів витягнутих сферолітів у випадку однорідної взаємодії через аморфне середовище виразиться таким чином:

$$\mathbf{u}_a^o = \alpha_{12}^o \frac{1+\nu_a}{E_a} (x_1 \bar{e}_2 + x_2 \bar{e}_1) \hat{\sigma}_{12} \quad (2.109)$$

де  $E_a$  – в’язкопружний модуль аморфної фази (міжсферолітного простору);

$\nu_a$  – коефіцієнт Пуассона аморфної фази.

Компоненти вектора відносних переміщень витягнутих сферолітів  $\bar{u}^*$ , у випадку першого розсіяного поля (соленоїдального), можна записати таким чином:

$$\begin{aligned} u_1^* &= \hat{\sigma}_{12} \frac{r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} (1 + \nu_a)}{E_a} \left( \frac{M}{3} + 4N \right) \left( \cos \theta - 2 \frac{1 - \cos \theta}{\sin^2 \theta} \right) \cdot Q_1^{(2)}(\text{ch } r) \cos 2\varphi; \\ u_2^* + i u_3^* &= \hat{\sigma}_{12} \frac{r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} (1 + \nu_a)}{E_a} \left( M \cdot P_1^{(1)}(\cos \theta) \cdot Q_1^{(1)}(\text{ch } r) e^{i\varphi} + \right. \\ &\quad \left. + N \cdot Q_1^{(2)}(\text{ch } r) \frac{1 - 8 \cos \theta + 6 \cos^2 \theta - \cos^4 \theta}{\sin^2 \theta} e^{3i\varphi} \right), \end{aligned} \quad (2.110)$$

де  $P_1(\cos \theta)$  – поліноми Лежандра першого роду першого порядку;  $Q_1^{(1)}(\text{ch } r)$ ,  $Q_1^{(2)}(\text{ch } r)$  – приєднані функції Лежандра другого роду першого ступеня першого і другого порядку відповідно;  $r_c$  – радіус сфероліта до деформації;  $\lambda$  – ступінь попереднього витягування полімерного матеріалу;  $M$ ,  $N$  – невідомі постійні, що визначаються із розв’язання крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (2.107).

Компоненти вектора переміщення  $\vec{u}^{**}$ , у випадку другого розсіяного поля (вихрового), визначаються через функції Папковича-Нейбера у вигляді:

$$u_a^{**} = \hat{\sigma}_{12} \frac{(1 + \nu_a)}{E_a} \{ (3 - 4\nu_a) \vec{e}_3 B_1 - x_3 \cdot \text{grad } B_1 - \text{grad } B_0 \}, \quad (2.111)$$

де

$$\begin{aligned} B_1 &= r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} \left( 2 \frac{1 - \cos \theta}{\sin^2 \theta} - \cos \theta \right) P \cdot Q_1^{(1)}(\text{ch } r) \cos 2\varphi, \\ B_0 &= -\frac{r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1})}{4} P \cdot \text{ch}^2 r \cdot P_2^{(2)}(\cos \theta) Q_2^{(2)}(\text{ch } r) \cos 2\varphi, \end{aligned} \quad (2.112)$$

де  $P$  – невідома постійна, що визначається із розв’язання крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (2.107).

Невідомі постійні  $\alpha_{12}^c$ ,  $K$ ,  $M$ ,  $N$ ,  $P$  виражаються через невідомі напруження взаємодії між витягнутими сферолітами  $\alpha_{12}^o$ . Напруження взаємодії між витягнутими сферолітами  $\alpha_{12}^o$  будемо визначати з першого представлення енергії деформації при поперечному зсуві:

$$\hat{\sigma}_{12} \cdot \hat{\gamma}_{12} = \frac{1}{\theta} \int_{(S_*)} (\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a + \sigma_{r\varphi}^a u_\varphi^a) \cdot h \cdot h_\varphi \cdot d\theta d\varphi, \quad (2.113)$$

де  $S_*$  – приведена поверхня інтегрування, що прирівнюється до поверхні витягнутого сфероліта (до поверхні витягнутого еліпсоїда обертання, софокусного з сферолітом);  $u_r^a$ ,  $u_\theta^a$ ,  $u_\varphi^a$  – функції зміщення, які виражаються з таких рівнянь:

$$\begin{aligned} u_r^a &= \hat{\gamma}_{12} \frac{\text{ch } r_* \cdot \text{sh } r_*}{2(\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta)^{0,5}} \cdot r_c \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} \sin^2 \theta \cdot \sin 2\varphi, \\ u_\theta^a &= \hat{\gamma}_{12} \frac{r_c \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5}}{2(\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta)^{0,5}} \cdot \text{sh}^2 r_* \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \sin 2\varphi, \\ u_\varphi^a &= \hat{\gamma}_{12} \frac{r_c \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5}}{2} \cdot \text{sh } r_* \cdot \sin \theta \cdot \cos 2\varphi, \end{aligned} \quad (2.114)$$

де  $\sigma_r^a$ ,  $\sigma_{r\theta}^a$ ,  $\sigma_{r\varphi}^a$  – однорідні поля напружень, які можуть бути представлені такими виразами:

$$\begin{aligned}
\sigma_r^a &= -\frac{\hat{\sigma}_{12}}{\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta} \cdot \text{ch}^2 r_* \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos 2\varphi, \\
\sigma_{r\theta}^a &= -\frac{\hat{\sigma}_{12}}{4(\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta)} \cdot \text{sh} 2r_* \cdot \sin 2\theta \cdot \cos 2\varphi, \\
\sigma_{r\varphi}^a &= \frac{\hat{\sigma}_{12}}{\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta} \cdot \text{ch} r_* \cdot \sin \theta \cdot \sin 2\varphi,
\end{aligned} \tag{2.115}$$

де  $r_*$  – зміщення на приведений поверхні інтегрування  $S_*$ .

В'язкопружний модуль при поперечному зсуві  $G_{12}$  будемо визначати з другого представлення енергії деформації:

$$\begin{aligned}
\frac{\hat{\sigma}_{12}}{G_{12}} &= \frac{1}{\theta} \int_{(S_*)} \left[ \frac{\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta}{\text{sh} r_* \cdot \sin \theta} \left( -u_r^a \cdot \text{ch}^2 r_* \cdot \sin \theta - u_\theta^a \text{ch} r_* \cdot \text{sh} r_* \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \right) \cdot \cos 2\varphi + \right. \\
&\quad \left. + u_\varphi^a \cdot \text{sh} 2r_* \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi \right] d\theta \cdot d\varphi.
\end{aligned} \tag{2.116}$$

Інтегруючи вираз (2.113) і (2.116), з урахуванням рівнянь (2.109)-(2.112), а також (2.114) і (2.115), опускаючи громіздкі викладки перетворення, отримаємо вираз для в'язкопружного модуля при поперечному зсуві:

$$G_{12} = E_a \frac{G1}{G2}, \tag{2.117}$$

де

$$\begin{aligned}
G1 &= \left\{ E_c(1 + \nu_a) + 2E_a(1 - 2\nu_c) + 2\chi^2 [E_c(1 - 2\nu_a) - E_a(1 - 2\nu_c)] \right\} \left\{ E_c \left[ (1 + \nu_a) \beta_1^{**} + 2(1 - 3\nu_a) \beta_3^{**} \right] - \right. \\
&\quad \left. - 4E_a(1 - 2\nu_c) \beta_4^{**} + (1 + \nu_a)(7 - 5\nu_a) [E_c(1 + \nu_a)(\gamma_2^{**} - \gamma_1^{**}) + E_a(1 + \nu_c)(\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**})] \right\}, \\
G2 &= 4 \left\{ E_c(1 + \nu_a) + 2E_a(1 - 2\nu_c) + 2\chi^2 [E_c(1 - 2\nu_a) - E_a(1 - 2\nu_c)] \right\} \left\{ E_c \left[ (1 + \nu_a) \beta_1^{**} + 2(1 - 3\nu_a) \beta_3^{**} \right] - \right. \\
&\quad \left. - 4E_a(1 - 2\nu_c) \beta_4^{**} + (1 + \nu_a)(7 - 5\nu_a) [E_c(1 + \nu_a)(\gamma_2^{**} - \gamma_1^{**}) + E_a(1 + \nu_c)(\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**})] \right\} - \\
&\quad - \left\{ E_c(1 - 2\nu_a)(1 + \nu_a) + 2E_a(1 - 2\nu_c)(1 - 2\nu_a) + \chi^2 [E_a(1 - 2\nu_c)(1 + \nu_a) - E_c(1 - 2\nu_a)(1 + \nu_a)] \right\} \times \\
&\quad \times \left\{ E_c \left[ (1 + \nu_a) \beta_1^{**} + 2(1 - 3\nu_a) \beta_3^{**} \right] + 2E_a(1 + \nu_c) \beta_4^{**} - (1 + \nu_a)(7 - 5\nu_a) [E_c(1 + \nu_a)(\gamma_2^{**} - \gamma_1^{**}) + \right. \\
&\quad \left. + E_a(1 + \nu_c)(\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**})] \right\},
\end{aligned}$$

де  $\chi$  – ступінь об'ємної кристалічності полімерного матеріалу;  $\gamma_i^{**}$  і  $\beta_i^{**}$  – функції, що визначають зміну параметрів структури полімерного матеріалу залежно від ступеня витягування  $\lambda$  при поперечному зсуві.

$$\begin{aligned}
\gamma_1^{**} &= \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2(1+\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})}, & \gamma_2^{**} &= \frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3-1} - 2\lambda\sqrt{\lambda} \ln a}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})}, \\
\gamma_3^{**} &= \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}(1+\lambda^3)}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})}, & \gamma_4^{**} &= \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a - 2\sqrt{\lambda^3-1}(2-\lambda^3)}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})}; \\
\beta_1^{**} &= 3 - 4\nu_a - \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}(1+\lambda^3)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}} + \gamma_1^{**}, \\
\beta_2^{**} &= 3 - 4\nu_a - \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}(2-\lambda^3)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}} + \gamma_2^{**}, \\
\beta_3^{**} &= -(1-2\nu_a) \frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3-1} + 2\lambda\sqrt{\lambda} \ln a}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}} + \frac{3\lambda^3 \ln a - 2\lambda\sqrt{\lambda^3-1}(2-\lambda^3)}{(\lambda^3-1)[\ln a + 2\lambda\sqrt{\lambda^3-1}]}, \\
\beta_4^{**} &= (1-2\nu_a) \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a - 2\sqrt{\lambda^3-1}(1+\lambda^3)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}}. \tag{2.118}
\end{aligned}$$

Вираз (2.117), з урахуванням виразів (2.118), дозволяє прогнозувати в'язкопружний модуль при поперечному зсуві  $G_{12}$  полімерного матеріалу з попередньо орієнтованою структурою залежно від деформації попереднього розтягу  $\varepsilon_1$ .

Вихідні дані для отримання кривих 1, 2, 3 [94, 207-211]:

для ПЕТФ –  $E_c = 8239$  МПа,  $\nu_c = 0,32$ ;  $E_a = 2000$  МПа,  $\nu_a = 0,39$ ,  $\chi = 0,40$ ;

для ПА –  $E_c = 5500$  МПа,  $\nu_c = 0,35$ ,  $E_a = 3400$  МПа,  $\nu_a = 0,39$ ,  $\chi = 0,10$ ;

для ПЕ –  $E_c = 1200$  МПа,  $\nu_c = 0,37$ ,  $E_a = 77$  МПа,  $\nu_a = 0,39$ ,  $\chi = 0,68$ .

Як видно з рис. 2.13, в'язкопружні модулі при поперечному до попереднього витягування напрямку зсуві для поліетилену, поліаміду і поліетилентерефталату зменшуються зі збільшенням ступеня попереднього витягування. Досягнувши 135 МПа для ПЕТФ, 55 МПа – для ПА і 30 МПа – для ПЕ при деформації попереднього розтягу  $\varepsilon_1=1,5$ , подальше збільшення деформації не приведе до суттєвого зменшення модуля зсуву  $G_{12}$  в поперечному до витягування напрямку.

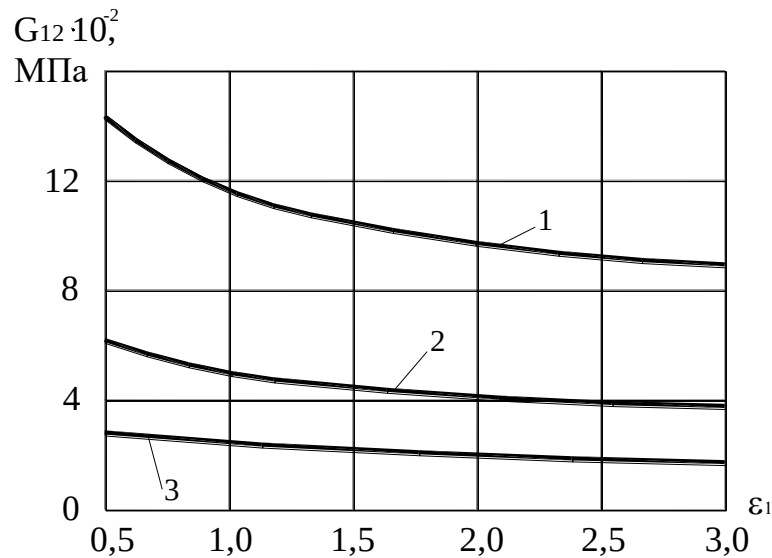


**Рис. 2.13. Залежності в'язкопружного модуля при поперечному зсуві від деформації попереднього розтягу: 1 – ПЕТФ; 2 – ПА; 3 – ПЕ**

Так, розтягнувши поліетилентерефталат на 150 %, поліамід на 120 %, а поліетилен на 100 %, можна досягнути мінімального значення в'язкопружного модуля  $G_{12}$  при поперечному зсуві. Ще більша деформація полімерного матеріалу не приведе до суттєвого зменшення в'язкопружного модуля, а тільки збільшить витрати енергії перероблювальним пристроєм.

Розроблена математична модель дозволяє простежити за направленими змінами внутрішньої структури полімерного матеріалу при складному напружено-деформованому стані, що створюється пристроєм для переробки полімерних відходів легкої промисловості.

### 2.6.2. Фізико-механічні властивості полімеру при поздовжньому зсуві

Прийнятий в роботі [216] трансверсально-ізотропний тип симетрії одновісноорієнтованого полімерного матеріалу передбачає наявність п'яти незалежних в'язкопружних постійних. Для обчислення повного комплексу в'язкопружних постійних попередньо орієнтованого полімерного матеріалу визначимо в'язкопружний модуль  $G_{23}$  при поздовжньому зсуві (рис. 2.12 б).

Тензор напружень сфероліта, аналогічно до рівнянь (2.104) та (2.105), визначимо за такою формулою:

$$\mathbf{T}_c = (\bar{e}_2 \bar{e}_3 + \bar{e}_3 \bar{e}_2) \cdot \alpha_{23}^o \cdot \hat{\sigma}_{23} = (\bar{e}_r \bar{e}_r \alpha_r^c + \bar{e}_\theta \bar{e}_\theta \alpha_\theta^c + (\bar{e}_r \bar{e}_\theta + \bar{e}_\theta \bar{e}_r) \cdot \alpha_{r\theta}^c + (\bar{e}_r \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_r) \cdot \alpha_{r\varphi}^c + (\bar{e}_\theta \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_\theta) \cdot \alpha_{\theta\varphi}^c) \hat{\sigma}_{23}, \quad (2.119)$$

де  $\alpha_r^c$ ,  $\alpha_\theta^c$ ,  $\alpha_{r\theta}^c$ ,  $\alpha_{r\varphi}^c$ ,  $\alpha_{\theta\varphi}^c$  – невідомі постійні, що визначаються таким чином:

$$\begin{aligned} \alpha_r^c &= \frac{\alpha_{23}^c}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \text{sh } 2r \cdot \sin 2\theta \cdot \cos \varphi, \\ \alpha_\theta^c &= \frac{\alpha_{23}^c}{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta} \text{sh } 2r \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi, \\ \alpha_{r\theta}^c &= \frac{\alpha_{23}^c}{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta} (\text{sh}^2 r \cdot \cos^2 \theta - \text{ch}^2 r \cdot \sin^2 \theta) \cdot \cos \varphi, \\ \alpha_{r\varphi}^c &= \frac{\alpha_{23}^c}{(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0,5}} \text{sh } r \cdot \cos 2\theta \cdot \sin \varphi, \\ \alpha_{\theta\varphi}^c &= \frac{\alpha_{23}^c}{(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0,5}} \text{ch } r \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi. \end{aligned} \quad (2.120)$$

Поле переміщень сфероліта вздовж попередньої орієнтації полімерного матеріалу визначимо таким чином:

$$\mathbf{u}_c = (\alpha_{23}^c (1 + \nu_c) / E_c - L) \chi_2 \bar{e}_3 \hat{\sigma}_{23} + (\alpha_{23}^c (1 + \nu_c) / E_c + L) \chi_3 \bar{e}_2 \hat{\sigma}_{23}, \quad (2.121)$$

де  $L$  – постійна, що визначає обертання витягнутого сфероліта як твердого тіла навколо вісі  $0x_1$  (рис. 2.12 б);  $\alpha_{23}^c$  – невідома постійна.

Невідомі постійні  $L$  та  $\alpha_{23}^c$  визначаються із розв'язання крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (2.107) і виражаються через напруження взаємодії між сферолітами  $\alpha_{23}^o$ .

Поля напружень і переміщень у міжсферолітному просторі розкладемо на однорідні і розсіянні складові. Однорідні поля напружень  $\mathbf{T}_a^o$  і переміщень  $\mathbf{u}_a^o$  можна представити в такому вигляді:

$$\mathbf{T}_a^o = (\bar{e}_2 \bar{e}_3 + \bar{e}_3 \bar{e}_2) \cdot \alpha_{23}^o \cdot \hat{\sigma}_{23} = (\bar{e}_r \bar{e}_r \alpha_r^o + \bar{e}_\theta \bar{e}_\theta \alpha_\theta^o + (\bar{e}_r \bar{e}_\theta + \bar{e}_\theta \bar{e}_r) \cdot \alpha_{r\theta}^o + (\bar{e}_r \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_r) \cdot \alpha_{r\varphi}^o + (\bar{e}_\theta \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_\theta) \cdot \alpha_{\theta\varphi}^o) \hat{\sigma}_{23} \quad (2.122)$$

та

$$\mathbf{u}_a^o = \alpha_{23}^o (1 + \nu_a) / E_a (x_2 \vec{e}_3 + x_3 \vec{e}_2) \hat{\sigma}_{23}. \quad (2.123)$$

Перше розсіяне (соленоїдальне) поле переміщень  $\mathbf{u}^*$  відповідно до [184, 191, 201, 215] визначається такими функціями:

$$\begin{aligned} u_1^a &= -\hat{\sigma}_{23} (1 + \nu_a) / E_a \cdot r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} R \cdot Q_1^{(2)}(\text{ch } c) \cdot P_1^{(2)}(\cos \theta) \cdot \cos \varphi, \\ u_2^a &= \hat{\sigma}_{23} (1 + \nu_a) / E_a r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} R \cdot Q_1^{(1)}(\text{ch } c) \cdot P_1^{(1)}(\cos \theta), \\ u_3^a &= 0, \end{aligned} \quad (2.124)$$

де  $R$  – довільна постійна, що визначає рівень соленоїдального поля переміщень. Невідому постійну  $R$  будемо визначати із розв’язання крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (2.107) і виражаються через напруження взаємодії між сферолітами  $\alpha_{23}^o$ .

Визначимо вектор напруження  $\mathbf{W}_r^*$  на площадці з нормаллю  $\vec{e}_r$  через переміщення (2.124), задовольняючи умову  $\text{div } \mathbf{u}^* = 0$ :

$$\mathbf{W}_r^* = \frac{E_a}{1 + \nu_a} \left( \frac{1}{H_r} \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial r} + \frac{1}{2} \mathbf{e}_r \times \text{rot } \mathbf{u}^* \right), \quad (2.125)$$

де  $H_r = \sqrt{r^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)}$  – коефіцієнт Ламе.

Друге розсіяне (вихрове) поле переміщень визначається функціями Папковича-Нейбера у вигляді:

$$u_a^{**} = \hat{\sigma}_{23} (1 + \nu_a) / E_a \{ (3 - 4\nu_a) \vec{e}_1 B_1 - x_1 \cdot \text{grad } B_1 - \text{grad } B_0 \}, \quad (2.126)$$

де

$$\begin{aligned} B_0 &= -\frac{r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1})}{3} \cdot Z \cdot \text{ch}^2 r \cdot Q_2^{(1)}(\text{ch } r) P_2^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi, \\ B_1 &= r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} \cdot Z \cdot Q_1^{(1)}(\text{ch } r) \cdot P_1^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi, \\ B_2 &= B_3 = 0, \end{aligned} \quad (2.127)$$

де  $Z$  – довільна постійна, що визначає рівень вихрового поля переміщень. Невідому постійну  $Z$  будемо визначати із розв’язання крайових рівнянь, які



відповідають крайовим умовам (2.107) і виражаються через напруження взаємодії між сферолітами  $\alpha_{23}^0$ .

Поле однорідної взаємодії  $\alpha_{23}^0$  визначаємо з використанням першого представлення енергії деформації при поздовжньому зсуві:

$$\hat{\sigma}_{23} \cdot \hat{\gamma}_{23} = \frac{1}{\theta} \int_{(S_*)} (\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a + \sigma_{r\varphi}^a u_\varphi^a) \cdot h \cdot h_\varphi \cdot d\theta d\varphi, \quad (2.128)$$

де  $S_*$  – приведена поверхня інтегрування, що прирівнюється до поверхні витягнутого сфероліта (до поверхні витягнутого еліпсоїда обертання, співфокусного зі сферолітом);  $u_r^a$ ,  $u_\theta^a$ ,  $u_\varphi^a$  – однорідні поля переміщень, які виражаються з таких рівнянь:

$$\begin{aligned} u_r^a &= \hat{\gamma}_{23} \frac{r_c \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5}}{4(\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta)^{0,5}} (\text{ch}^2 r_* + \text{sh}^2 r_*) \cdot \sin 2\theta \cdot \cos \varphi, \\ u_\theta^a &= \hat{\gamma}_{23} \frac{r_c \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5}}{4(\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta)^{0,5}} \text{sh} 2r_* \cdot \cos 2\theta \cdot \cos \varphi, \\ u_\varphi^a &= -\hat{\gamma}_{23} \frac{r_c \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5}}{2} \cdot \text{ch} r_* \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi, \end{aligned} \quad (2.129)$$

де  $\sigma_r^a$ ,  $\sigma_{r\theta}^a$ ,  $\sigma_{r\varphi}^a$  – однорідні поля напружень, які визначаються з таких виразів:

$$\begin{aligned} \sigma_r^a &= \frac{\hat{\sigma}_{23}}{2(\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta)} \cdot \text{sh} 2r_* \cdot \sin 2\theta \cdot \cos \varphi, \\ \sigma_{r\theta}^a &= \frac{\hat{\sigma}_{23}}{\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta} \cdot (\text{sh}^2 r_* \cdot \cos^2 \theta - \text{ch}^2 r_* \cdot \sin^2 \theta) \cdot \cos \varphi, \\ \sigma_{r\varphi}^a &= -\frac{\hat{\sigma}_{23}}{\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta} \cdot \text{sh} r_* \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi, \end{aligned} \quad (2.130)$$

де  $u_*$  – зміщення на приведеній поверхні інтегрування  $S_*$ .

В'язкопружний модуль при поздовжньому зсуві  $G_{23}$  визначимо з другого представлення енергії деформації:

$$\frac{\hat{\sigma}_{23}}{G_{23}} = \frac{1}{\theta} \int_{(S_*)} (\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a + \sigma_{r\varphi}^a u_\varphi^a) \cdot h \cdot h_\varphi \cdot d\theta d\varphi, \quad (2.131)$$

Інтегруючи вирази (2.128) і (2.131), з урахуванням рівнянь (2.123), (2.124), (2.126), (2.127), а також (2.129) і (2.130), опускаючи громіздкі викладки перетворення, отримаємо вираз для в'язкопружного модуля при поздовжньому зсуві:

$$G_{23} = E_a G1/G2, \quad (2.132)$$

де

$$\begin{aligned} G1 = & \left\{ E_c(1+v_a) + 2E_a(1-2v_c) + 2\chi^2[E_c(1-2v_a) - E_a(1-2v_c)] \right\} \left\{ [E_c(1+v_a) + 2E_a(1-2v_c)] \times \right. \\ & \times \left\{ 3[E_a(1+v_c)\beta_1^{**} + E_c(1+v_a)\beta_3^{**}] + 2\chi^2(1+v_a)[E_c(1+v_a) - E_a(1+v_c)](\beta_2^{**} - \beta_4^{**}) + \right. \\ & \left. \left. + 2\chi^2(1-2v_a)[E_c(1-2v_a) - E_a(1-2v_c)][E_a(1+v_c)\beta_1^{**} + E_c(1+v_a)\beta_3^{**}] \right\} \right\}, \\ G2 = & 3 \left\{ E_c(1+v_a) + 2E_a(1-2v_c) + 2\chi^2[E_c(1-2v_a) - E_a(1-2v_c)] \right\} \left\{ E_c[(1+v_a) + 2E_a(1-2v_c)] \times \right. \\ & \times \left\{ 3[E_a(1+v_c)\beta_1^{**} + E_c(1+v_a)\beta_3^{**}] + 4\chi^2(1+v_a)\beta_4^{**}[E_c(1+v_a) - E_a(1+v_c)] \right\} - \\ & - \chi^2(1+v_a)[E_c(1-2v_a) - E_a(1-2v_c)][E_a(1+v_c)\beta_1^{**} + E_c(1+v_a)\beta_3^{**}] - \{ E_c(1-2v_a)(1+v_a) + \\ & + 2E_a(1-2v_c)(1-2v_a) + \chi^2[E_a(1-2v_c)(1+v_a) - E_c(1-2v_a)(1+v_c)] \} [E_c(1+v_a) + \\ & + 2E_a(1-2v_c)] \left\{ 3[E_a(1+v_c)\beta_1^{**} + E_c(1+v_a)\beta_3^{**}] + 2\chi^2(1+v_a)(\beta_1^{**}\gamma_2^{**} - \beta_2^{**}\gamma_1^{**})[E_c(1+v_a) - \right. \\ & \left. - E_a(1+v_c)] \right\} + 2\chi^2(1-2v_a)[E_c(1-2v_a) - E_a(1-2v_c)][E_a(1+v_c)\beta_1^{**} + E_c(1+v_a)\beta_3^{**}] \left\{ \right\}, \end{aligned}$$

де  $\chi$  – ступінь об'ємної кристалічності полімерного матеріалу;  $\gamma_i^{**}$  і  $\beta_i^{**}$  – функції, що визначають зміну параметрів структури полімерного матеріалу залежно від ступеня витягування  $\lambda$  при поздовжньому зсуві.

$$\begin{aligned} \gamma_1^{**} &= \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})}, & \gamma_2^{**} &= \frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3 - 1} - 2(\lambda + 1)\sqrt{\lambda} \ln a}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})}, \\ \beta_1^{**} &= 3 - 4v_a - \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})}, \\ \beta_2^{**} &= 3 - 4v_a - \frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3 - 1} - 2(\lambda + 1)\sqrt{\lambda} \ln a}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}, \\ \beta_3^{**} &= -(1 - 2v_a) \frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3 - 1} + 2(\lambda + 1)\sqrt{\lambda} \ln a}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}} + \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda(1 + \lambda^3)}{(\lambda^3 - 1)[\ln a + 2\lambda\sqrt{\lambda^3 - 1}]}, \\ \beta_4^{**} &= (1 - 2v_a) \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a - 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}. \end{aligned} \quad (2.133)$$

Рівняння (2.132) та (2.133) визначають поведінку поздовжнього модуля зсуву  $G_{23}$  попередньо орієнтованої надмолекулярної структури полімерного матеріалу сферолітної будови залежно від ступеня витягування матеріалу  $\lambda$  та його фізико-механічних властивостей.

Розрахувавши в'язкопружний модуль при поперечному (2.117) та поздовжньому (2.132) зсуві та врахувавши вирази (2.96) і (2.38), можна визначити мінімальні значення деформації при поперечному і поздовжньому зсуві, які необхідно створити перероблювальному обладнанню для руйнування орієнтованої структури полімерного матеріалу.

Отримані аналітичні залежності дозволяють перейти до проектування технологічного устаткування і визначення конструктивно-технологічних параметрів пристроїв і процесів переробки полімерних матеріалів з урахуванням їх структури.

Напруження зсуву в полімерному матеріалі можна створити, пропускаючи його між валками, виготовленими за профілем Рело, що забезпечить поперечну та поздовжню до попередньої орієнтації сферолітів деформацію зсуву. Тому в майбутньому буде розглянуто схему навантаження полімерного матеріалу, на основі якої буде отримано аналітичні залежності, що пов'язують основні технологічні та конструктивні параметри перероблювального пристрою з валками, виготовленими за профілем Рело, з напружено-деформованим станом у полімерному матеріалі.

## **2.7. Модель зміни фізико-механічних властивостей полімеру під впливом підвищених температур**

Механічні властивості полімерних матеріалів залежать від орієнтації надмолекулярних структур, їх форми і розмірів та ступеня наповнення ними аморфного середовища.

Раніше в нашій роботі, в підрозділах 2.3-2.6, ми розглядали руйнування полімерних матеріалів під впливом механічного поля – на першому етапі

переробки полімерний матеріал піддавався впливу напружень розтягу і стиску, на другому етапі його піддавали впливу напружень стиску та зсуву. В результаті дії на полімерний матеріал напружень розтягу і стиску його надмолекулярні структурні елементи – сфероліти - витягувалися і орієнтувалися вздовж дії розтягуючих напружень, тобто утворювалися так звані орієнтовані конгломерати витягнутих сферолітів. Наступний за цим одночасний вплив напружень стиску та зсуву приводив до руйнування зв'язків між конгломератами витягнутих сферолітів.

Впливаючи на полімерний матеріал напруженнями розтягу, ми отримували в ньому структуру орієнтованих та витягнутих сферолітів. При дії на орієнтовану структуру полімерного матеріалу напруженнями стиску деякі зв'язки між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів були зруйновані, а деякі стали напруженими. Теплові флуктації, тобто локальні різкі зростання внутрішньої енергії, що виникають при одночасній дії на полімерний матеріал напружень стиску та зсуву, викликають розрив напружених зв'язків [217]. Ймовірність розриву визначається коефіцієнтом:

$$K = -(U_a - \gamma\sigma)/kT, \quad (2.134)$$

де  $U_a$  – енергія активації ;  $\gamma\sigma$  – частина роботи, яку виконують зовнішні сили при розриві середовища об'ємом  $\gamma$ ;  $\sigma$  – напруження, що створюється зовнішніми силами;  $T$  – температура середовища об'ємом  $\gamma$ .

Значення коефіцієнта  $K$  залежить від температури і прикладеного напруження зсуву. Чим вища температура, тим більша ймовірність розриву напружених зв'язків. При порівняно невисоких температурах розривові напружених зв'язків сприяє прикладене навантаження, яке створює напруження  $\sigma$ , що зменшує енергію активації  $U_a$  на  $\gamma\sigma$ .

Чим сильнішими на першому етапі переробки полімерного матеріалу були напружені зв'язки між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів, тим ймовірніше руйнування цих зв'язків на другому етапі. Отже, ступінь напруження зв'язків між конгломератами, яке створюється на першому етапі переробки, відіграє вирішальну роль у процесі руйнування полімерного матеріалу.

В результаті переробки полімеру на першому етапі його структура перетворюється на середовище орієнтованих конгломератів витягнутих сферолітів, що зв'язані між собою аморфними ділянками, так званими прохідними макромолекулами. Це було доведено за допомогою рентгенівської дифракції під малими кутами [217]. Саме на цих ділянках відбувається руйнування полімерного матеріалу на орієнтовані конгломерати витягнутих сферолітів. Руйнування відбувається тільки під навантаженням і не відновлюється після його зняття.

При підвищених температурах руйнування напружених зв'язків між конгломератами сферолітів відбувається при менших навантаженнях, а з одночасним підвищенням температури і збільшенням навантаження швидкість руйнування цих зв'язків суттєво зростає. Це пояснюється тим, що при нагріванні полімерного матеріалу в результаті різних значень теплового розширення сферолітів і аморфної фази в аморфному середовищі виникають напруження, які сприяють розриву прохідних макромолекул.

Руйнування полімерів в основному визначається тепловими флуктуаціями, зовнішні сили зумовлюють лише спрямованість процесу. Збільшення температури викликає в аморфному середовищі між сферолітами та їх конгломератами різке зростання внутрішньої енергії, що сприяє появі певного напруження, а вплив від зовнішнього навантаження спрямовує ці напруження в потрібному напрямку, тим самим збільшуючи ефект механічного впливу.

Розглянемо поведінку полімерного матеріалу сферолітної будови в полі впливу підвищених температур  $T$  (рис. 2.14). Визначимо коефіцієнт об'ємного розширення полімерного матеріалу. Систему координат і модель будови сфероліту приймаємо у відповідності з рис. 2.7. За вихіді величини приймаємо пружні постійні сфероліта  $E_c$ ,  $\nu_c$ , в'язкопружні постійні аморфної матриці  $E_a$ ,  $\nu_a$ , ступінь кристалічності  $\chi$ , тип решітки (упакування)  $\mu$ , показник зв'язаності структури полімерного матеріалу  $\xi$ , температурні коефіцієнти об'ємного розширення сферолітів  $\alpha_c$  і аморфної матриці  $\alpha_a$ .

Під дією температури сфероліт і аморфне середовище полімеру деформуються (рис. 2.14). Відносні деформації сфероліту  $\varepsilon_c$  і аморфної фази  $\varepsilon_a$  в результаті впливу температури визначимо з таких виразів:

$$\varepsilon_c = \alpha_c \cdot \Delta T, \quad \varepsilon_a = \alpha_a \cdot \Delta T, \quad (2.135)$$

де  $\Delta T$  – величина зміни температури,  $^{\circ}\text{C}$ .

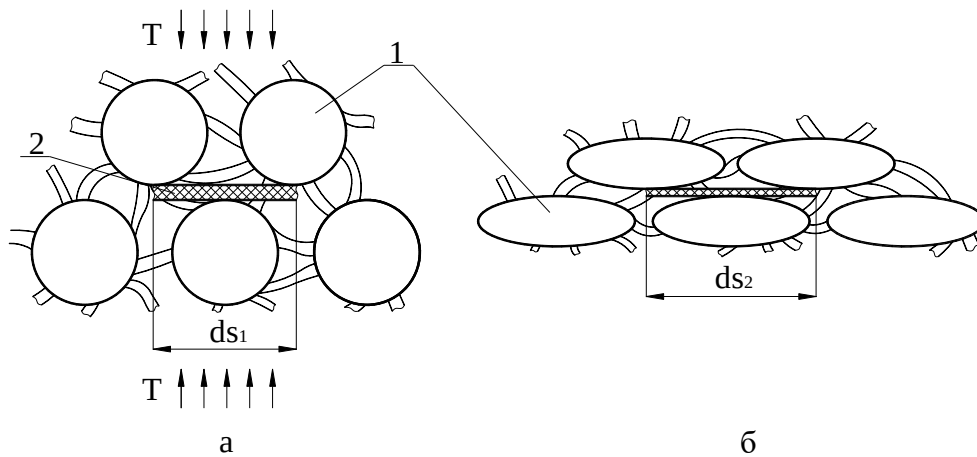


**Рис. 2.14. Модель зміни структури полімеру під впливом температури:**  
**а – структура до впливу температури; б – структура після впливу**  
**температури; 1 – сфероліт; 2 – елемент аморфного середовища**

При нагріванні полімерного матеріалу за рахунок різних значень коефіцієнтів теплового розширення сферолітів  $\alpha_c$  і аморфної матриці  $\alpha_a$  в аморфному середовищі виникають напруження взаємодії між сферолітами  $Q$ , які будемо визначати з рівняння (2.34) з урахуванням виразів (2.135).

$$Q = \frac{E_a \cdot (\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{1 + \frac{2}{3} \chi^2 \left( \frac{(1 - 2\nu_a)(E_c(1 - 2\nu_a) - E_a(1 - 2\nu_c))}{E_c(1 + \nu_a) + 2E_a(1 - 2\nu_c)} + \frac{(7 - 5\nu_a)(1 + \nu_a)(E_c(1 + \nu_a) - E_a(1 + \nu_c))}{E_c(1 + \nu_a)(8 - 10\nu_a) + E_a(7 - 5\nu_a)(1 + \nu_c)} \right)}. \quad (2.136)$$

Підставляючи в (2.36) значення напружень однорідної взаємодії  $Q$  з (2.136) і розв'язуючи вираз (2.36), опускаючи громіздкі перетворення, аналогічні до описаних у підрозділі 2.4, отримаємо вирази для компонентів вектора переміщень  $\vec{u}$  і тензора напружень  $\vec{T}_\sigma$  для сфероліта та аморфного середовища.

Для сфероліта:

- компоненти вектора переміщень:

$$u_r^c = \alpha_a \Delta T + \frac{2(1-\chi^2) \cdot E_a(1-2\nu_c)(\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c) + 2\chi^2[E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c)]}, \quad (2.137)$$

$$u_\phi^c = u_\theta^c = 0.$$

- компоненти тензора напружень:

$$\sigma_r^c = \sigma_\phi^c = \sigma_\theta^c = \frac{2(1-\chi^2) \cdot E_a E_c(1-2\nu_c)(\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{E_c(1+\nu_a) + 2 \cdot [\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + (1-\chi^2) E_a(1-2\nu_c)]}, \quad (2.138)$$

$$\sigma_{r\theta}^c = 0.$$

Для аморфного середовища:

- компоненти вектора переміщень:

$$u_r^a = \frac{(1+\nu_c)(1-\chi^2) \cdot (\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{9(1-\nu_a) \{E_c(1+\nu_a) + 2 \cdot [\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + (1-\chi^2) E_a(1-2\nu_c)]\}} \times \\ \times \{2(1+2\nu_a)[E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)] + [E_a(1-2\nu_c) - E_c(1-2\nu_a)]\} + \\ + \Delta T \cdot \left[ \left( \alpha_a - \frac{2(1-2\nu_a)}{3(1-\nu_a)} (\alpha_a - \alpha_c) \right) - \frac{1+\nu_a}{3(1-\nu_a)} (\alpha_a - \alpha_c) \right], \quad (2.139)$$

$$u_\phi^a = u_\theta^a = 0.$$

- компоненти тензора напружень:

$$\sigma_r^a = \frac{E_a(1+\nu_c)(1-\chi^2) \cdot (\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{9(1-\nu_a) \{E_c(1+\nu_a) + 2 \cdot [\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + (1-\chi^2) E_a(1-2\nu_c)]\}} \times \\ \times \{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c) + 4[E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c)]\}, \\ \sigma_\theta^a = \sigma_\phi^a = \frac{2E_a(1+\nu_c)(1-\chi^2) \cdot (\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{9(1-\nu_a) \{E_c(1+\nu_a) + 2 \cdot [\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + (1-\chi^2) E_a(1-2\nu_c)]\}} \times \\ \times \{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c) - [E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c)]\} - \\ - \frac{4E_a(\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{3(1-\nu_a)}, \quad (2.140)$$

$$\sigma_{r\theta}^a = 0.$$

Отримані вирішення задовольняють умову ідеальної адгезійної взаємодії [184]:

$$u_\theta^a = u_\theta^c; u_r^a = u_r^c; \sigma_r^a = \sigma_r^c; \sigma_\theta^a = \sigma_\theta^c; \sigma_{r\theta}^a = \sigma_{r\theta}^c \quad (2.141)$$

і визначають структурні напруження, що виникають у надмолекулярних структурних елементах полімерного матеріалу сферолітної будови при нагріванні.

Замінюючи сфероліт сферою рівновеликого об'єму, та прирівнюючи до нуля середні напруження на її поверхні, виражаючи потенціал деформації  $U$  через поверхневий інтеграл:

$$U = \frac{1}{2V} \sum_{k=1} \int_{V_k} \sigma_{ik} \varepsilon_{ik} dV = \frac{Q}{2V} \sum_{S_0} \int \sigma_{in} u_i df_n, \quad (2.142)$$

де  $Q$  – напруження взаємодії між сферолітами, що виникає в аморфному середовищі;  $df_n$  – елемент з нормаллю  $n$  до поверхні, що обмежує об'єм  $V$ ;  $\sigma_{in}$ ,  $u_i$  – компоненти тензора напруження  $\mathbf{T}_\sigma$  і вектора переміщень  $\mathbf{u}$ , що діють на поверхні  $S_0$ , та обчислюючи цей інтеграл, отримаємо вираз для коефіцієнта теплового розширення полімерного матеріалу сферолітної будови:

$$\alpha = \alpha_a - (\alpha_a - \alpha_c) \frac{3E_c(1-\nu_c) \cdot \chi^2}{E_c(1+\nu_a) + 2 \cdot [\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + (1-\chi^2) E_a(1-2\nu_c)]}. \quad (2.143)$$

Рівняння (2.143) дозволяє прогнозувати теплофізичні властивості полімерних матеріалів сферолітної будови в залежності від особливостей їх внутрішньої будови.

Підставляючи в рівняння (2.142) значення переміщень і значення напруження взаємодії між сферолітами з виразу (2.136), інтегруючи і вирішуючи його відносно в'язкопружного модуля аморфної фази  $E_a$ , отримаємо залежність в'язкопружного модуля полімерного матеріалу від його температури та деформації розтягу (витягування).

$$E = E_a \frac{\frac{(1+\nu_c)(1-\chi^2) \cdot (\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{9(1-\nu_a) \{E_c(1+\nu_a) + 2 \cdot [\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + (1-\chi^2) E_a(1-2\nu_c)]\}} \times \\ \times \{2(1+2\nu_a)[E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)] + [E_a(1-2\nu_c) - E_c(1-2\nu_a)]\} + \\ + \Delta T \cdot \left[ \left( \alpha_a - \frac{2(1-2\nu_a)}{3(1-\nu_a)} (\alpha_a - \alpha_c) \right) - \frac{1+\nu_a}{3(1-\nu_a)} (\alpha_a - \alpha_c) \right]}{\alpha_a \Delta T + \frac{2(1-\chi^2) \cdot E_a(1-2\nu_c)(\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c) + 2\chi^2[E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c)]}}. \quad (2.144)$$

Рівняння (2.144) дозволяє прогнозувати фізико-механічні характеристики полімерного матеріалу від його температури (рис. 2.15).



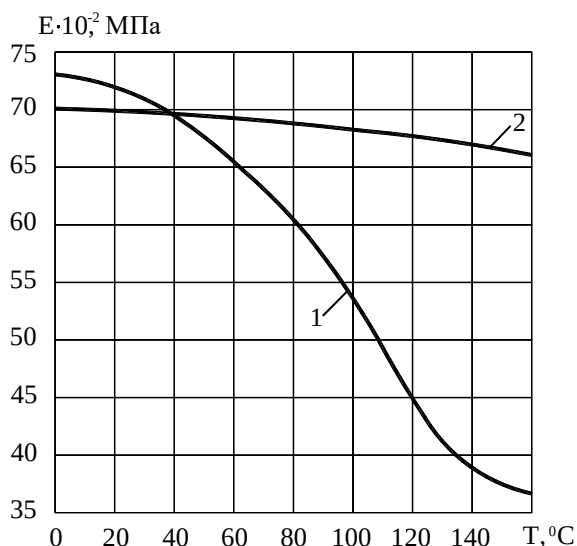


**Рис. 2.15. Залежності в'язкопружного модуля  $E$  полімеру від температури:**  
**1 – поліетилентерефталат (ПЕТФ); 2 – поліамід (ПА)**

З рис. 2.15 видно, що залежність в'язкопружного модуля від температури для поліетилентерефталату є нелінійною, а для поліаміду – майже лінійною. Це вказує на те, що в поліетилентерефталаті перед впливом на нього температури або навантажень розтягу ступінь напруження зв'язків між сферолітами або їх конгломератами є значно більшим, ніж в поліаміді.

Виходячи з цього, представляє інтерес дослідження залежності в'язкопружного модуля полімерів від температури нагрівання після їх орієнтаційного витягування.

## **2.8. Експериментальні дослідження впливу деформації попереднього розтягу та температури на фізико-механічні характеристики полімеру**

Для перевірки результатів теоретичних досліджень впливу температури і деформації попереднього розтягу полімерного матеріалу на його фізико-механічні властивості нами було проведено експериментальні випробування попередньо розтягнутих полімерних зразків [218].

Для визначення параметрів дослідження ми проаналізували апріорну інформацію [194-199, 217], на основі чого за контрольовані параметри було вибрано

такі фізико-механічні характеристики полімерного матеріалу, як в'язкопружні модулі при розтягу та зсуві. За фактори, якими варіювали, було прийнято деформацію попереднього розтягу  $\varepsilon_1$  та температуру нагрівання полімеру  $T$ .

Вибір матеріалу зразків здійснювався, виходячи з номенклатури полімерів, які набули широкого застосування в легкій промисловості. Для проведення експериментальних досліджень було вибрано такі матеріали та їх марки: поліпропілен (ПП), марка: 1365 S; поліетилен (ПЕ), марка: 20108-075. Як заготовки для поліетиленових та поліпропіленових зразків ми використовували готові поліетиленові та поліпропіленові листи, товщиною 2 мм. За допомогою спеціально виготовлених на пресі ПВГ-8-0 різаків із заготовок вирубали зразки, які мали розміри та форму, відповідні до вимог випробування.

### **2.8.1. Експериментальні дослідження впливу деформації попереднього розтягу та температури на в'язкопружний модуль полімеру при поперечному розтягу**

Для проведення випробувань впливу деформації розтягу і температури на в'язкопружний модуль полімерних зразків необхідно, щоб експериментальний пристрій дозволяв визначати тривалу міцність матеріалу. Можливість дослідження саме тривалої міцності на розрив полімерного зразка дозволяє визначити його в'язкопружний модуль.

Пристрій, на якому вимірювався в'язкопружний модуль попередньо розтягнутого полімерного зразка, наведено на рис. А.1 ( додатку А). Цей пристрій дозволяє досліджувати розтяг полімерного зразка в широкому температурному діапазоні – від 20°C до 300°C [24, 219]. Установка пройшла необхідну метрологічну атестацію.

Як контрольовані параметри було вибрано в'язкопружний модуль  $E_1$  в напрямку попереднього витягування полімерного зразка і в'язкопружний модуль  $E_2$  в поперечному до витягування напрямку. Вибір цих параметрів пояснюється

тим, що в'язкопружний модуль в поперечному напрямку до орієнтованої структури полімеру значно менший за в'язкопружний модуль неорієнтованого полімеру, а в напрямку орієнтації структури – навпаки, значно більший за в'язкопружний модуль неорієнтованого полімеру.

Визначивши в'язкопружний модуль в поперечному до орієнтованої структури полімеру напрямку, можна оптимізувати навантаження попереднього витягування і наступного поперечного до нього розтягу, що дозволить проектувати пристрої для переробки полімерних відходів на частинки з орієнтованою структурою, які витрачатимуть мінімум енергії на процес руйнування полімеру. При цьому частинки переробленого полімеру будуть мати підвищені фізико-механічні властивості і можуть бути використані як армувальні елементи при литті під тиском нових виробів легкої промисловості.

За основні фактори, які будемо варіювати, обрано такі:  $X_1$  – деформація розтягу,  $\varepsilon_1$ ;  $X_2$  – температура нагрівання полімерного зразка,  $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

Вибір діапазону варіювання основних факторів здійснювався на основі даних, отриманих нами із попередніх експериментальних досліджень та з аналізу апріорної інформації. Полімерні матеріали, з яких виготовлено зразки для випробування, та характеристика їх властивостей наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Основні характеристики полімерів, з яких виготовлено зразки [94, 207-211]

| Властивість \ Полімер                        | ПЕВП,<br>20108-075 | ПП,<br>1365 S      |
|----------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| 1. Коефіцієнт температурного розширення, /K  | $13 \cdot 10^{-5}$ | $10 \cdot 10^{-5}$ |
| 2. Щільність, г/см <sup>3</sup>              | 0,95               | 0,90               |
| 3. Відносне подовження при розриві, %        | 500                | 400                |
| 4. Температура склування, $^{\circ}\text{C}$ | -60                | -8                 |
| 5. Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$ | 140                | 150                |
| 6. Границя міцності при розтягу, МПа         | 25                 | 35                 |
| 7. Модуль пружності при розтягу, МПа         | 720                | 1050               |

Вихідна довжина, ширина і товщина всіх полімерних зразків є однаковими і становлять, відповідно, 45 мм, 8 мм і 2 мм. Деформація розтягу  $\varepsilon_1$  зразків із поліетилену та поліпропілену варіювалась в межах від 0 до 3. Верхня границя інтервалу вибиралася із діапазону ефективних значень деформацій розтягу, в межах якого спостерігається максимальна деформація даного полімерного матеріалу. В результаті попередніх експериментальних досліджень встановлено, що граничне значення деформацій розтягу знаходиться в межах від 85 % до 95 % від значення руйнівної деформації.

Температуру нагрівання  $T$  зразків з поліетилену та поліпропілену варіювали в межах від 28 °С до 112 °С. Нижня границя температурного інтервалу визначалась температурою склування даного полімерного матеріалу. Якщо температура склування нижче за 0 °С, то як нижня границя вибиралась температура, що була близькою до температури навколишнього середовища в день проведення експерименту, тобто 28 °С. Як верхня границя температурного інтервалу вибиралась температура, що є близькою до температури плавлення [217], тобто знаходиться в межах від 75 % до 80 % від температури плавлення полімерного матеріалу, який випробовується.

Експериментальне дослідження впливу деформації розтягу та температури на в'язкопружний модуль полімерного зразка в поперечному та поздовжньому до витягування напрямку проводилося за факторним планом другого порядку Бокса. Для отримання точної моделі параметра оптимізації, відповідно до [220], використовувався алгебраїчний поліном другого порядку

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2, \quad (2.145).$$

де  $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{11}, b_{22}$  – коефіцієнти регресії;  $x_1, x_2$  – змінні фактори, відповідно, деформація розтягу  $\varepsilon_1$  та температура полімерного зразка  $T$ .

При кодуванні значень  $X_1, X_2$  верхній рівень позначають +1, нижній -1, а нульовий 0. Кодування фактора  $X_i$  визначається виразом [221]:

$$x_i = (X_i - X_{0i}) / \varepsilon_i \quad (2.146).$$

де  $i$  – номер фактора;  $X_i$  – натуральне значення  $i$ -го фактора;  $X_{0i}$  – натуральне значення нульового рівня  $i$ -го фактора;  $\varepsilon_i$  – інтервал зміни  $i$ -го фактора.

Експериментальні дослідження в'язкопружних модулів  $E_1$  та  $E_2$  зразків при різних значеннях деформації розтягу та температури проводилися на рівнях варіювання та з інтервалами, які наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

## Рівні та інтервали зміни факторів

| Позн. | Фактори                         | Рівні варіювання |     |     |     |         | Інтервал варіювання |
|-------|---------------------------------|------------------|-----|-----|-----|---------|---------------------|
|       |                                 | – 1,414          | – 1 | 0   | + 1 | + 1,414 |                     |
| X1    | Витягування                     | 1                | 1,5 | 2,5 | 3,5 | 4       | 1                   |
| X2    | Температура, $^{\circ}\text{C}$ | 28               | 40  | 70  | 100 | 112     | 30                  |

Матрицю плану для композиційного ротатабельного планування другого порядку наведено в табл. Б.1 (додаток Б). Після реалізації робочої матриці, при чотирьох паралельних дослідах, отримано значення в'язкопружних модулів у двох перпендикулярних напрямках для зразків, виготовлених із поліпропілену та поліетилену (додаток Б, табл. Б.2-Б.5).

Для аналізу результатів дослідження визначалася дисперсія помилки кожного досліду [218, 221]:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n_n - 1), \quad (2.147)$$

де  $n_n$  – кількість спостережень;  $y_i$  – значення параметра оптимізації для окремого спостереження;  $\bar{y}$  – середнє значення параметра.

Отримані значення дисперсій наведено у табл. Б.2-Б.5 (додаток Б). Аналіз результатів дослідів показав, що при випробуванні поліпропіленових зразків на розтяг поперек витягування в деяких дослідах дисперсія помітно вища, ніж в інших дослідах ( $s^2 = 1,83$ ), а при випробуванні поліпропіленових зразків на розтяг вздовж витягування в одинадцятому досліді дисперсія помітно вища, ніж в інших дослідах ( $s_{11}^2 = 3,10$ ) У зв'язку з цим виникла необхідність перевірки однорідності дисперсій. Перевірка проводилася з урахуванням критерію Кохрена.

$$G_{розр} = s_{\max}^2 / \sum_{i=1}^N s_i^2, \quad (2.148)$$

де  $N$  – число дослідів.

Підставляючи значення дисперсій у формулу (2.148), отримали такі результати випробування поліпропіленових зразків на розтяг: поперек витягування –  $G_{розр} = 1,83/18,44 = 0,10$ ; вздовж витягування: –  $G_{розр} = 3,10/27,23 = 0,12$ .

Розрахункове значення критерію менше за табличне ( $0,16 < 0,32$  та  $0,12 < 0,32$ ), тому з 95%-ою надійною ймовірністю можна стверджувати, що всі дисперсії помилок однорідні [220].

Аналогічно міркуємо відносно результатів вимірювання для зразків, виготовлених із поліетилену: поперек витягування –  $G_{розр} = 1,26/8,98 = 0,14$ ; вздовж витягування –  $G_{розр} = 1,83/12,43 = 0,15$ .

Порівнюючи розрахований критерій Кохрена для результатів випробування зразків з поліетилену з його табличним значенням ( $0,14 < 0,32$  та  $0,15 < 0,32$ ), можна стверджувати з 95%-ою надійною ймовірністю, що всі дисперсії помилок однорідні [220].

Коефіцієнти рівняння регресії отримано за допомогою матричного методу [218, 221]. Розраховані значення коефіцієнтів регресії наведено у табл. Б.6 (додаток Б). Підставляючи значення коефіцієнтів у рівняння (2.145), отримаємо рівняння регресії.

Для поліпропіленового зразка, розтягнутого поперек до попереднього витягування:

$$y_{\text{пп}}^2(x_1, x_2) = 836,41 - 160,57 \cdot x_1 - 52,41 \cdot x_2 + 15,19 \cdot x_1 \cdot x_2 + 27,42 \cdot x_1^2 + 0,68 \cdot x_2^2. \quad (2.149)$$

Для поліпропіленового зразка, розтягнутого вздовж попереднього витягування:

$$y_{\text{пп}}^1(x_1, x_2) = 1298,81 + 243,98 \cdot x_1 - 102,91 \cdot x_2 - 21,38 \cdot x_1 \cdot x_2 + 68,49 \cdot x_1^2 - 97,59 \cdot x_2^2. \quad (2.150)$$

Для поліетиленового зразка, розтягнутого поперек до попереднього витягування:

$$y_{\text{пе}}^2(x_1, x_2) = 469,07 - 112,90 \cdot x_1 - 100,94 \cdot x_2 + 44,88 \cdot x_1 \cdot x_2 - 10,04 \cdot x_1^2 + 26,39 \cdot x_2^2. \quad (2.151)$$

Для поліетиленового зразка, розтягнутого вздовж попереднього витягування:

$$y_{\text{пе}}^1(x_1, x_2) = 849,44 + 85,49 \cdot x_1 - 12,24 \cdot x_2 - 53,94 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2,87 \cdot x_1^2 - 30,81 \cdot x_2^2. \quad (2.152)$$

З метою оцінки значущості коефіцієнтів регресії визначено довірчі інтервали [218, 220]:

$$\Delta b_0 = \pm 0,894 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; \Delta b_i = \pm 0,707 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; \Delta b_{ii} = \pm 0,759 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; \Delta b_{ij} = \pm s_{\{\bar{y}\}}, \quad (2.153)$$

де  $s_{\{\bar{y}\}}^2$  – помилка середнього значення паралельних вимірів, яку визначено відповідно до [218, 220].

Для поліпропіленових зразків, розтягнутих поперек до напрямку попереднього витягування, помилка середнього значення паралельних вимірів дорівнює:

$$s_{\{\bar{y}\}}^2 = s_{\{y\}}^2 / n_n = \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{n_n} (y_{u,i} - \bar{y}_u)^2 / \left( n_n \sum_{i=1}^N (n-1) \right) = 2,17/4 = 0,543.$$

Для поліпропіленових зразків, розтягнутих вздовж напрямку попереднього витягування, помилка середнього значення паралельних вимірів дорівнює:

$$s_{\{\bar{y}\}}^2 = s_{\{y\}}^2 / n_n = 4,764/4 = 1,191.$$

Для поліетиленових зразків, розтягнутих поперек до напрямку попереднього витягування, помилка середнього значення паралельних вимірів дорівнює:

$$s_{\{\bar{y}\}}^2 = s_{\{y\}}^2 / n_n = 0,513/4 = 0,128.$$

Для поліетиленових зразків, розтягнутих вздовж напрямку попереднього витягування, помилка середнього значення паралельних вимірів дорівнює:

$$s_{\{\bar{y}\}}^2 = s_{\{y\}}^2 / n_n = 1,03/4 = 0,258.$$

Після підстановки помилки середнього значення паралельних вимірів у рівняння (2.153) були отримані довірчі інтервали коефіцієнтів регресії.

Для поліпропіленових зразків, розтягнутих поперек до напрямку попереднього витягування, довірчі інтервали коефіцієнтів регресії дорівнюють:

$$\Delta b_0 = \pm 0,659; \Delta b_1 = \Delta b_2 = \pm 0,521; \Delta b_{11} = \Delta b_{22} = \pm 0,559; \Delta b_{12} = \pm 0,737.$$

Для поліпропіленових зразків, розтягнутих вздовж напрямку попереднього витягування, довірчі інтервали коефіцієнтів регресії дорівнюють:

$$\Delta b_0 = \pm 0,975; \Delta b_1 = \Delta b_2 = \pm 0,771; \Delta b_{11} = \Delta b_{22} = \pm 0,827; \Delta b_{12} = \pm 1,091.$$

Для поліетиленових зразків, розтягнутих поперек до напрямку попереднього витягування, довірчі інтервали коефіцієнтів регресії дорівнюють:

$$\Delta b_0 = \pm 0,441; \Delta b_1 = \Delta b_2 = \pm 0,349; \Delta b_{11} = \Delta b_{22} = \pm 0,074; \Delta b_{12} = \pm 0,494.$$

Для поліетиленових зразків, розтягнутих вздовж напрямку попереднього витягування, довірчі інтервали коефіцієнтів регресії дорівнюють:

$$\Delta b_0 = \pm 0,454; \Delta b_1 = \Delta b_2 = \pm 0,359; \Delta b_{11} = \Delta b_{22} = \pm 0,385; \Delta b_{12} = \pm 0,508.$$

Порівняння абсолютної величини коефіцієнтів і відповідних довірчих інтервалів показало, що всі коефіцієнти статистично значимі, тому рівняння регресії (2.149)-(2.152) не спрощуються.

Адекватність отриманого рівняння регресії реальним процесом перевірялася за допомогою критерію Фішера [220]:

$$\Phi = s_{ad}^2 / s_{\{y\}}^2, \quad (2.154)$$

де  $s_{ad}^2$  – залишкова дисперсія (або дисперсія адекватності).

Згідно з [218, 220], залишкова дисперсія визначається з рівняння:

$$s_{ad}^2 = \sum_{u=1}^n n \cdot (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2 / (n - k - (n_0 - 1)), \quad (2.155)$$

де  $\hat{y}_u$  – розрахункове значення параметра оптимізації;  $k = 6$  – число коефіцієнтів рівняння;  $n_0 = 5$  – число повторень нульового дослідження.

Підставивши значення (додаток Б, табл. Б.2-Б.5) в рівняння (2.155), отримаємо дисперсію адекватності для результатів випробування полімерних



зразків. Для результатів випробування поліпропіленового зразка, розтягнутого поперек до напрямку попереднього витягування, дисперсія адекватності дорівнює:

$$s_{ad}^2 = 45,62 / (13 - 6 - (5 - 1)) = 15,21,$$

а розрахункове значення критерію Фішера:

$$\Phi_{розр} = 15,21 / 2,17 = 7,01.$$

Для результатів випробування поліпропіленового зразка, розтягнутого вздовж напрямку попереднього витягування, дисперсія адекватності дорівнює:

$$s_{ad}^2 = 74,38 / (13 - 6 - (5 - 1)) = 24,79,$$

а розрахункове значення критерію Фішера:

$$\Phi_{розр} = 24,79 / 4,76 = 5,20.$$

Для результатів випробування поліетиленового зразка, розтягнутого поперек до напрямку попереднього витягування, дисперсія адекватності дорівнює:

$$s_{ad}^2 = 10,02 / (13 - 6 - (5 - 1)) = 3,34,$$

а розрахункове значення критерію Фішера:

$$\Phi_{розр} = 3,34 / 0,51 = 6,55.$$

Для результатів випробування поліетиленового зразка, розтягнутого вздовж напрямку попереднього витягування, дисперсія адекватності дорівнює:

$$s_{ad}^2 = 23,83 / (13 - 6 - (5 - 1)) = 7,94,$$

а розрахункове значення критерію Фішера:

$$\Phi_{розр} = 7,94 / 1,03 = 7,71.$$

Порівнюючи знайдений критерій Фішера з табличним ( $7,01 < 9,10$  та  $5,20 < 9,10$  – при випробуванні поліпропіленових зразків;  $6,55 < 9,10$  та  $7,71 < 9,10$  – при випробуванні поліетиленових зразків), при вибраній надійній ймовірності, можна стверджувати, що рівняння регресії (2.149)-(2.152) є адекватними з 95%-ою надійною ймовірністю [221].

Для одержання натуральних рівнянь підставимо значення кодованого фактора  $X$ , згідно з виразом (2.146), у рівняння (2.149)-(2.152) і одержимо функції залежності в'язкопружного модуля зразків з поліпропілену і поліетилену

в поперечному та повздовжньому до попереднього витягування напрямках від температури  $T$  і деформації розтягу  $\varepsilon_1$ .

Функції залежності в'язкопружного модуля зразків з поліпропілену:

– поперек до напрямку попереднього витягування

$$E_2^{\text{пп}} = 836,41 - 160,57 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) - 1,75 \cdot (T - 70) + 0,5 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) \cdot (T - 70) + 27,42 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5)^2, \quad (2.156)$$

– вздовж напрямку попереднього витягування

$$E_1^{\text{пп}} = 1298,81 + 243,98 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) - 3,45 \cdot (T - 70) - 0,72 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) \cdot (T - 70) + 68,49 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5)^2 - 0,12 \cdot (T - 70)^2. \quad (2.157)$$

Функції залежності в'язкопружного модуля зразків із поліетилену:

– поперек до напрямку попереднього витягування

$$E_2^{\text{пе}} = 469,07 - 112,90 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) - 3,36 \cdot (T - 70) + 1,5 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) \cdot (T - 70) - 10,04 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5)^2 + 0,03 \cdot (T - 70)^2, \quad (2.158)$$

– вздовж напрямку попереднього витягування

$$E_1^{\text{пе}} = 849,44 + 85,49 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) - 0,4 \cdot (T - 70) - 1,8 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) \cdot (T - 70) + 23,87 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5)^2 - 0,03 \cdot (T - 70)^2. \quad (2.159)$$

Отримані рівняння дозволяють описати зміну в'язкопружного модуля орієнтованої структури полімерного матеріалу поперек до напрямку орієнтації та вздовж орієнтації, залежно від деформації попереднього розтягу та температури матеріалу. Ці залежності можна використовувати під час розрахунку конструктивних та технологічних параметрів обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості.

На рис. 2.16-2.19 зображені графіки залежності в'язкопружного модуля полімерних матеріалів (поліпропілену і поліетилену) вздовж та поперек орієнтації їх структури від деформації попереднього розтягу  $\varepsilon_1$  та температури  $T$ . Наведені на рисунках функціональні залежності являють собою результати аналітичних та експериментальних досліджень.

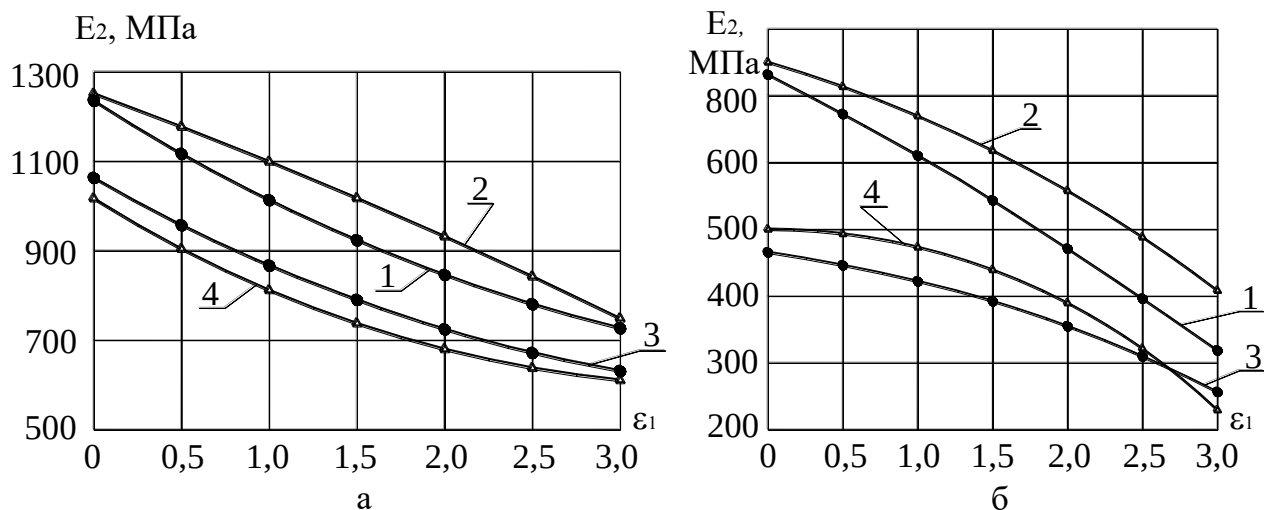


**Рис. 2.16.** Залежності в'язкопружного модуля поліпропіленового (а) та поліетиленового (б) зразків поперек напрямку деформації попереднього розтягу від цієї деформації: 1, 2 – температура нагрівання  $T=50^{\circ}\text{C}$ ; 3, 4 – температура нагрівання  $T=100^{\circ}\text{C}$ ;  $\bullet$  – апроксимація експериментальних даних;  $\blacktriangle$  – аналітичні залежності

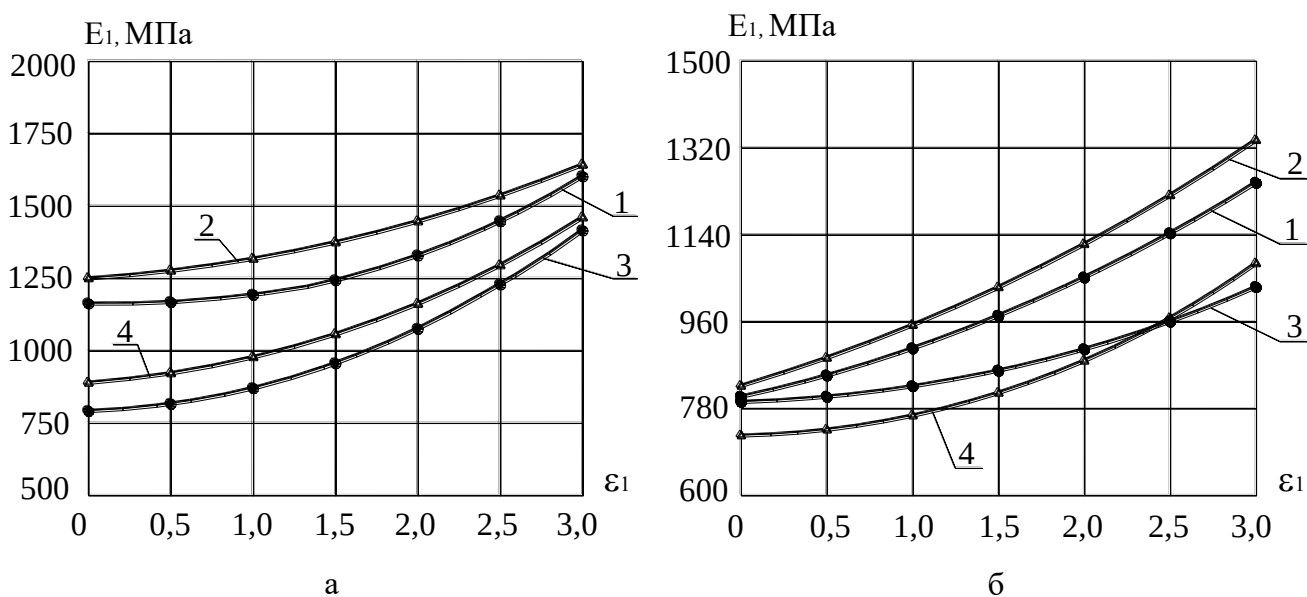


**Рис. 2.17.** Залежності в'язкопружного модуля поліпропіленового (а) та поліетиленового (б) зразків вздовж напрямку деформації попереднього розтягу від цієї деформації: 1, 2 – температура нагрівання  $T=50^{\circ}\text{C}$ ; 3, 4 – температура нагрівання  $T=100^{\circ}\text{C}$ ;  $\bullet$  – апроксимація експериментальних даних;  $\blacktriangle$  – аналітичні залежності

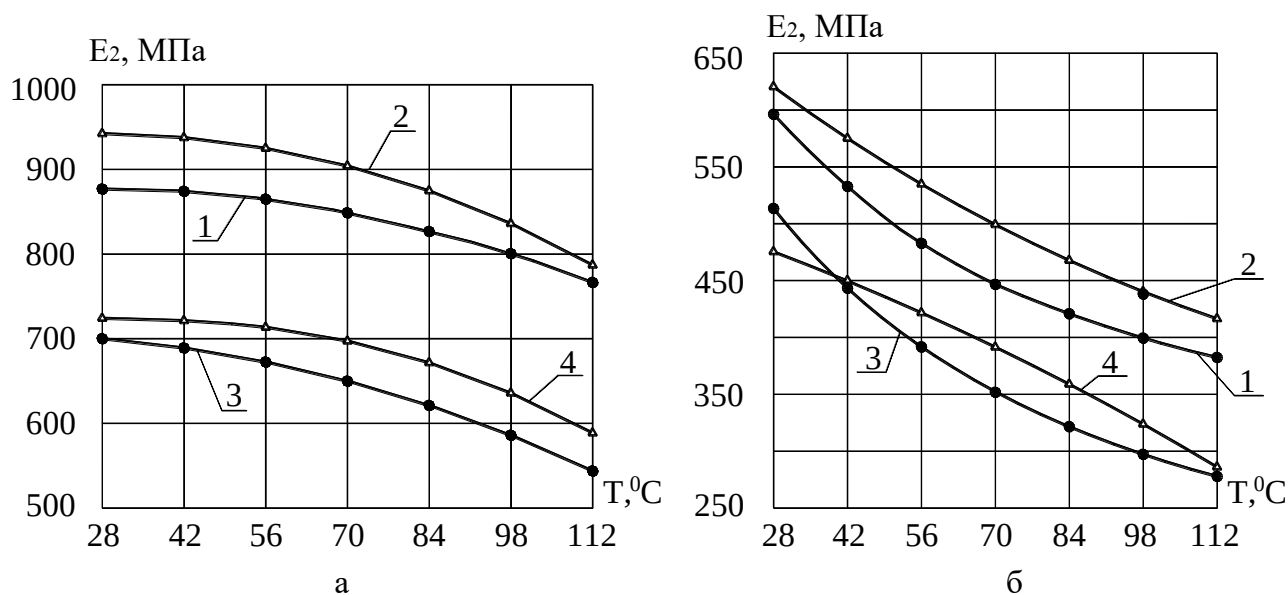


**Рис. 2.18. Залежності в'язкопружного модуля поліпропіленового (а) та поліетиленового (б) зразків поперек напрямку деформації попереднього розтягу від температури: 1, 2 – попередня деформація розтягу  $\varepsilon_1=1,5$ ; 3, 4 –  $\varepsilon_1=3,0$ ;  $\bullet$  – апроксимація експериментальних даних;  $\triangle$  – аналітичні залежності**

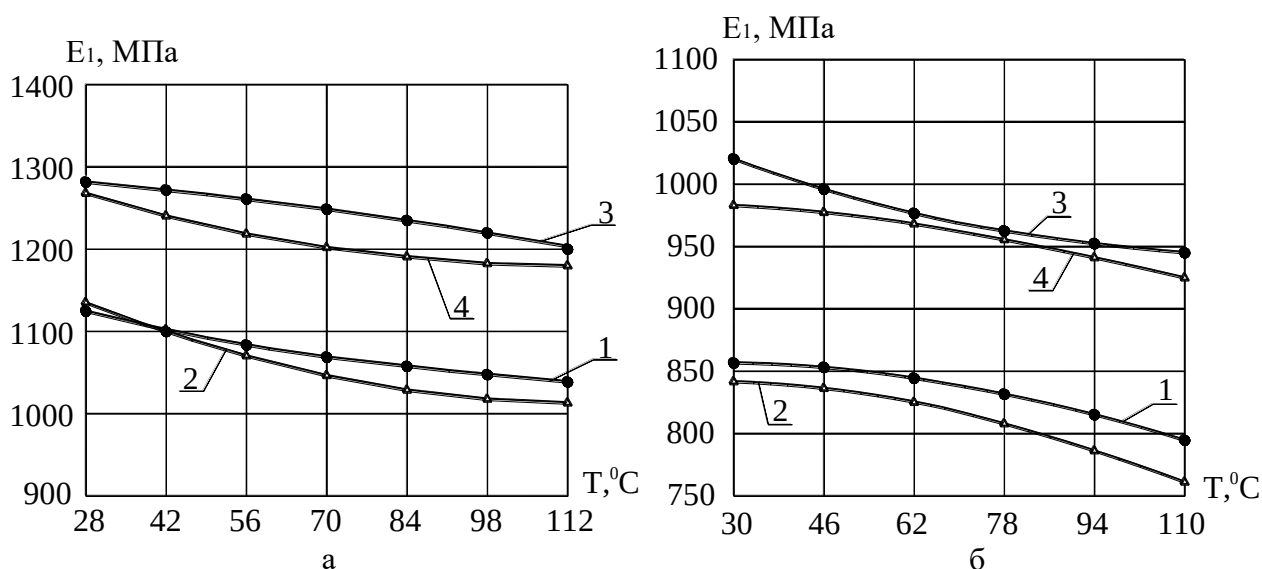


**Рис. 2.19. Залежності в'язкопружного модуля поліпропіленового (а) та поліетиленового (б) зразків вздовж напрямку деформації попереднього розтягу від температури: 1, 2 – попередня деформація розтягу  $\varepsilon_1=1,5$ ; 3, 4 –  $\varepsilon_1=3,0$ ;  $\bullet$  – апроксимація експериментальних даних;  $\triangle$  – аналітичні залежності**

З рис. 2.16 і 2.17 видно, що збільшення деформації попереднього розтягу зменшує в'язкопружний модуль полімерних матеріалів в поперечному до цієї деформації напрямку і збільшує модуль в поздовжньому напрямку. Це пояснюється тим, що в результаті розтягування полімерного матеріалу його структура в поперечному напрямку стає подібною до шаруватої двофазної структури [180], де кожен елементарний шар утворений орієнтованими кристалічними областями (сферолітами), а міжшаровий простір представляє собою аморфну фазу, що утворена прохідними макромолекулами та фібрилами. Внаслідок прикладення напружень, перпендикулярно до згаданих площин, в полімерному матеріалі виникають більші деформації, ніж в поздовжньому до цих площин напрямку, але при цьому руйнівні напруження менші.

Збільшення температури (рис. 2.18 і 2.19) послаблює зв'язки, як в кристалічній, так і в аморфній фазах, в результаті чого в'язкопружний модуль нагрітого полімеру зменшується. При цьому вплив температури суттєвіший при поперечній до попереднього розтягу деформації полімеру.

З представлених графіків (рис. 2.16-2.19) видно, що отримані аналітичні вирази та регресійні залежності, які описують формування фізико-механічних характеристик полімеру, залежно від деформації попереднього розтягу та температури, задовільно узгоджуються (відносне відхилення експериментальних значень від теоретичних не перевищує 14%). Цей факт підтверджує правомірність використання математичної моделі для дослідження зміни фізико-механічних характеристик під дією напружень розтягу та стиску.

### **2.8.2. Експериментальні дослідження впливу деформації попереднього розтягу та температури на в'язкопружний модуль полімеру при поперечному зсуві**

Вимірювальний пристрій призначений для визначення в'язкопружного модуля полімерних матеріалів при зсуві методом вільних коливань [24, 222] наведено на рис. В.1 (додаток В). Дослідження, що виконувалися на цьому

пристрої, полягали у вимірюванні періоду вільних коливань і декременту згасання маятника без полімерного зразка та зі зразком при впливі температур з діапазону від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $200^{\circ}\text{C}$  [223]. Далі, за виміряними значеннями періоду коливань та декременту згасання, ми визначали в'язкопружний модуль полімерних матеріалів при зсуві [224] за таким рівнянням:

$$G = 4\pi^2 I \cdot F^* \cdot \left[ \left( 1 - \delta_2^2 / 4\pi^2 \right) \cdot T_2^{-2} - T_1^{-2} \right], \quad (2.160)$$

де  $I$  – момент інерції маятника,  $\text{кг} \cdot \text{м}$ ;  $F^*$  – фактор форми зразка;  $T_1$  – період коливання маятника без полімерного зразка, с;  $T_2$  – період коливань маятника з полімерним зразком, с;  $\delta_2$  – декремент згасання маятника з полімерним зразком.

Фактор форми полімерного зразка  $F^*$  залежить від його форми і розмірів. Так, для полімерних зразків призматичної форми фактор форми визначається таким чином:

$$F^* = 3 \cdot l / [a \cdot h^3 (1 - 0,63 \cdot h/a)], \quad (2.161)$$

де  $l$ ,  $a$ ,  $h$  – відповідно, довжина, ширина та товщина зразків, м.

Описаний вимірювальний пристрій дозволяє змінювати момент інерції вільних коливань в діапазоні від  $10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}$  до  $10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}$ . Для цього використовуються торсіони різної жорсткості і набір вантажів різної ваги.

Як досліджувані параметри були вибрані в'язкопружні модулі при поздовжньому  $G_{23}$  і поперечному  $G_{12}$  зсуві до напрямку попередньої деформації полімерного зразка. Полімерні матеріали, з яких виготовлені зразки для випробування, та характеристика їх властивостей наведені в таблиці 2.1.

Експериментальні дослідження впливу деформації попереднього розтягу та температури на в'язкопружний модуль зсуву полімерного зразка в поперечному та поздовжньому до витягування напрямку проводилися за факторним планом другого порядку Бокса.

Експериментальні дослідження в'язкопружних модулів зсуву  $G_{12}$  та  $G_{23}$  полімерного зразка при різних значеннях деформації попереднього розтягу та температури проводилися на рівнях варіювання та з інтервалами, які наведені в табл. 2.2. В кожному досліді проводили чотири паралельних виміри.

Матриця плану для композиційного ротатбельного планування другого порядку наведена в табл. Г.1 (додаток Г). Після реалізації робочої матриці, при чотирьох паралельних дослідах, ми отримали значення в'язкопружного модуля зсуву поліпропіленових та поліетиленових зразків (додаток Г, табл. Г. 2-Г 5).

Аналіз результатів досліджень здійснювався за допомогою критерію Кохрена аналогічно до [218]. Порівнюючи розрахований критерій Кохрена для результатів випробування зразків з поліетилену та поліпропілену з його табличним значенням ( $0,21 < 0,32$  та  $0,10 < 0,32$ ), можна стверджувати з 95%-ою надійною ймовірністю, що всі дисперсії помилок однорідні [220].

Коефіцієнти рівняння регресії ми отримали за допомогою матричного методу [220]. Розраховані значення коефіцієнтів регресії наведені у табл. Г.6 (додаток Г). Підставляючи значення коефіцієнтів у (2.145), отримуємо рівняння регресії:

– для поліпропіленових зразків, що випробовувалися на поперечний зсув:

$$y^2_{\text{пп}}(x_1, x_2) = 779,54 - 377,43 \cdot x_1 - 300,05 \cdot x_2 + 114,29 \cdot x_1 \cdot x_2 - 52,55 \cdot x_1^2 + 77,62 \cdot x_2^2, \quad (2.162)$$

– для поліпропіленових зразків, що випробовувалися на поздовжній зсув:

$$y^1_{\text{пп}}(x_1, x_2) = 980,12 - 262,64 \cdot x_1 - 240,51 \cdot x_2 + 115,76 \cdot x_1 \cdot x_2 - 16,66 \cdot x_1^2 + 66,02 \cdot x_2^2, \quad (2.163)$$

– для поліетиленових зразків, що випробовувалися на поперечний зсув:

$$y^2_{\text{пе}}(x_1, x_2) = 399,34 - 176,92 \cdot x_1 - 137,47 \cdot x_2 + 49,60 \cdot x_1 \cdot x_2 - 26,89 \cdot x_1^2 + 32,62 \cdot x_2^2, \quad (2.164)$$

– для поліетиленових зразків, що випробовувалися на поздовжній зсув:

$$y^1_{\text{пе}}(x_1, x_2) = 490,99 - 118,57 \cdot x_1 - 107,07 \cdot x_2 + 50,45 \cdot x_1 \cdot x_2 - 8,25 \cdot x_1^2 + 28,13 \cdot x_2^2. \quad (2.165)$$

Перевірка значущості коефіцієнтів рівняння регресії проводилася аналогічно до [218]. Порівняння абсолютної величини коефіцієнтів і відповідних довірчих інтервалів показало, що всі коефіцієнти статистично значимі, і тому рівняння регресії (2.162)-(2.165) не спрощуються.

Адекватність отриманого рівняння регресії реальним процесом перевірялася за допомогою критерію Фішера (2.154). Порівнюючи знайдений критерій Фішера з табличним ( $8,04 < 9,10$  та  $7,93 < 9,10$  – при випробуванні поліпропіленових зразків;  $8,01 < 9,10$  та  $8,47 < 9,10$  – при випробуванні поліетиленових зразків), при вибраній надійній ймовірності, можна стверджувати, що рівняння регресії (2.162)-(2.165) є адекватними з 95%-ою надійною ймовірністю [221].

Для одержання натуральних рівнянь підставимо значення кодованого фактора  $X$ , згідно з виразом (2.146), у рівняння (2.162)-(2.165) і одержимо функції залежності в'язкопружного модуля для зразків з поліпропілену і поліетилену при поперечному та поздовжньому зсуві від температури  $T$  і деформації попереднього розтягу  $\varepsilon_1$ .

Функції залежності в'язкопружного модуля зсуву для зразків з поліпропілену:

– поперек до напрямку попереднього розтягу

$$G_{12}^{\text{пп}} = 779,54 - 377,43 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) - 10 \cdot (T - 70) + 3,8 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) \cdot (T - 70) - 52,55 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5)^2 + 0,1 \cdot (T - 70)^2, \quad (2.166)$$

– вздовж напрямку попереднього розтягу

$$G_{23}^{\text{пп}} = 980,12 - 262,64 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) - 8,02 \cdot (T - 70) + 3,86 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) \cdot (T - 70) - 16,66 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5)^2 + 0,07 \cdot (T - 70)^2. \quad (2.167)$$

Функції залежності в'язкопружного модуля зсуву для зразків з поліетилену:

– поперек до напрямку попереднього розтягу

$$G_{12}^{\text{пе}} = 399,34 - 176,92 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) - 4,58 \cdot (T - 70) + 1,65 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) \cdot (T - 70) - 26,89 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5)^2 + 0,04 \cdot (T - 70)^2, \quad (2.168)$$

– вздовж напрямку попереднього розтягу

$$G_{23}^{\text{пе}} = 490,99 - 118,57 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) - 3,57 \cdot (T - 70) + 1,68 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) \cdot (T - 70) - 8,25 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5)^2 + 0,03 \cdot (T - 70)^2. \quad (2.169)$$

Отримані рівняння дозволяють описати зміну в'язкопружного модуля зсуву орієнтованої структури полімерного матеріалу залежно від деформації попереднього розтягу та температури матеріалу. Ці залежності можна використовувати під час розрахунку конструктивних та технологічних параметрів обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості. На рис. 2.20-2.23 зображені графіки залежності в'язкопружного модуля поліпропілену і поліетилену при поздовжньому та поперечному зсуві від деформації попереднього розтягу  $\varepsilon_1$  та температури  $T$ .



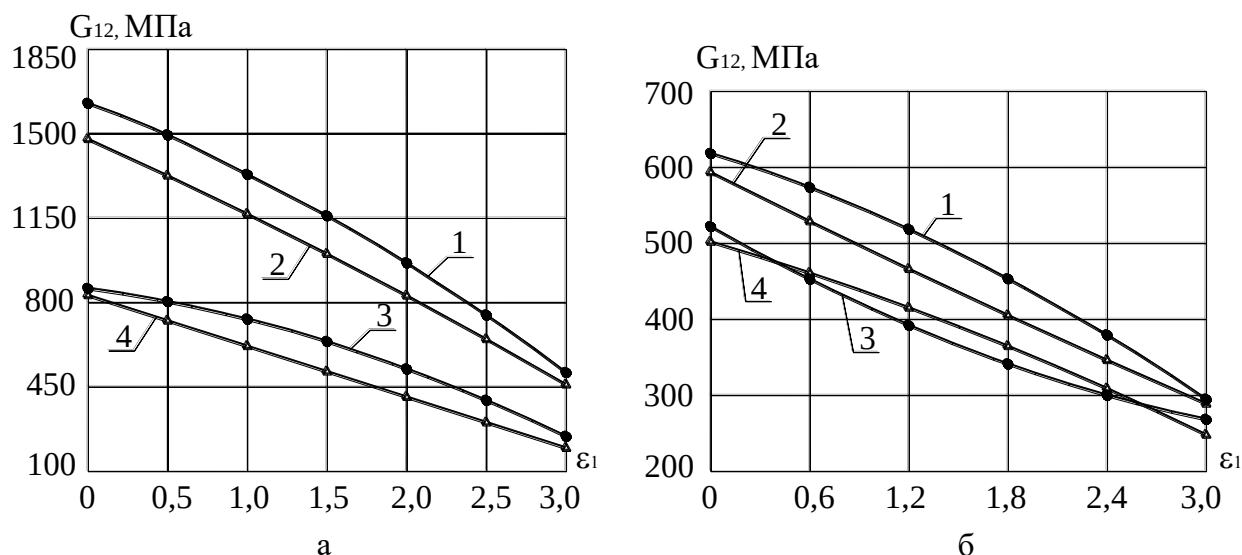


**Рис. 2.20.** Залежності в'язкопружного модуля зсуву поліпропіленового (а) та поліетиленового (б) зразків поперек напрямку деформації попереднього розтягу від цієї деформації: 1, 2 – температура нагрівання  $T=50^\circ\text{C}$ ; 3, 4 – температура нагрівання  $T=100^\circ\text{C}$ ;  $\bullet$  – апроксимація експериментальних даних;  $\triangle$  – аналітичні залежності

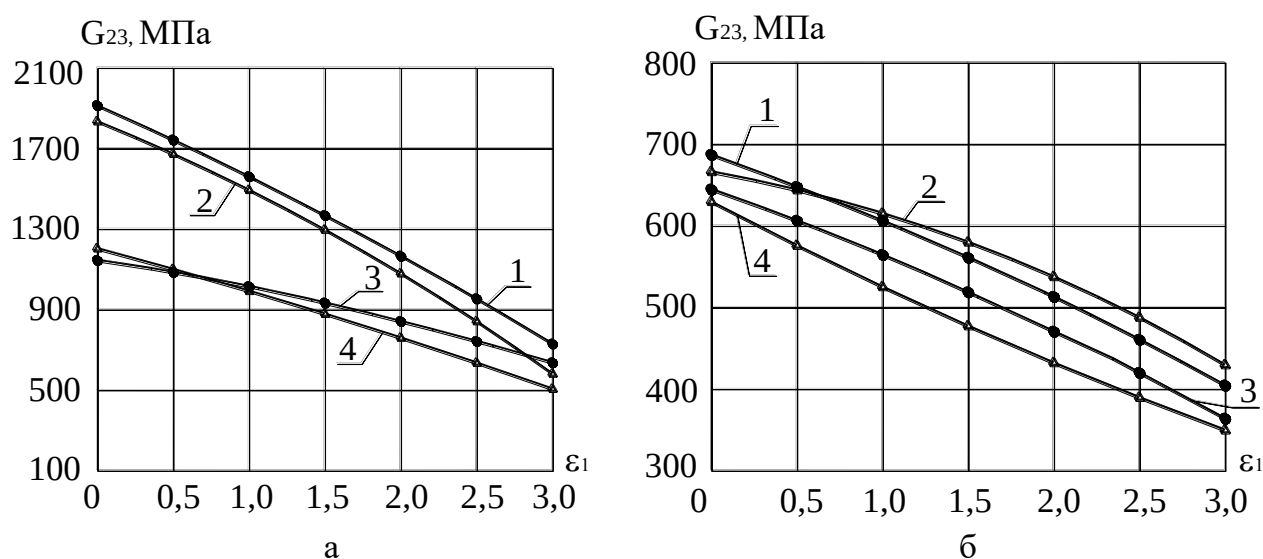


**Рис. 2.21.** Залежності в'язкопружного модуля зсуву поліпропіленового (а) та поліетиленового (б) зразків вздовж напрямку деформації попереднього розтягу від цієї деформації: 1, 2 – температура нагрівання  $T=50^\circ\text{C}$ ; 3, 4 – температура нагрівання  $T=100^\circ\text{C}$ ;  $\bullet$  – апроксимація експериментальних даних;  $\triangle$  – аналітичні залежності

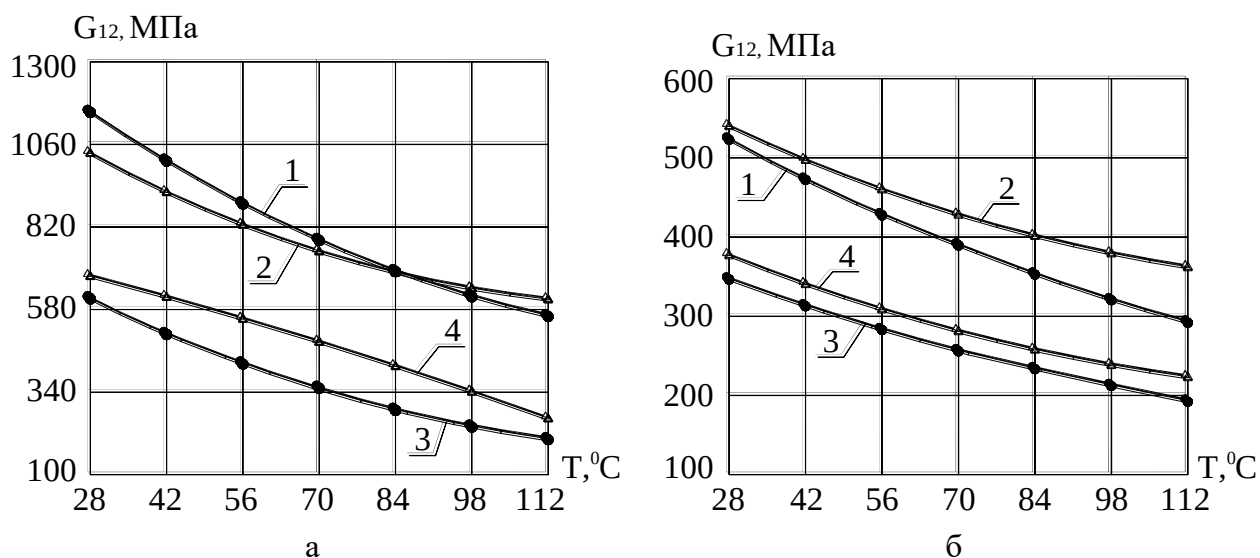


**Рис. 2.22.** Залежності в'язкопружного модуля зсуву поліпропіленового (а) та поліетиленового (б) зразків поперек напрямку деформації попереднього розтягу від температури: 1, 2 – попередня деформація розтягу  $\varepsilon_1=1,5$ ; 3, 4 –  $\varepsilon_1=3,0$ ;  $\bullet$  – апроксимація експериментальних даних;  $\triangle$  – аналітичні залежності

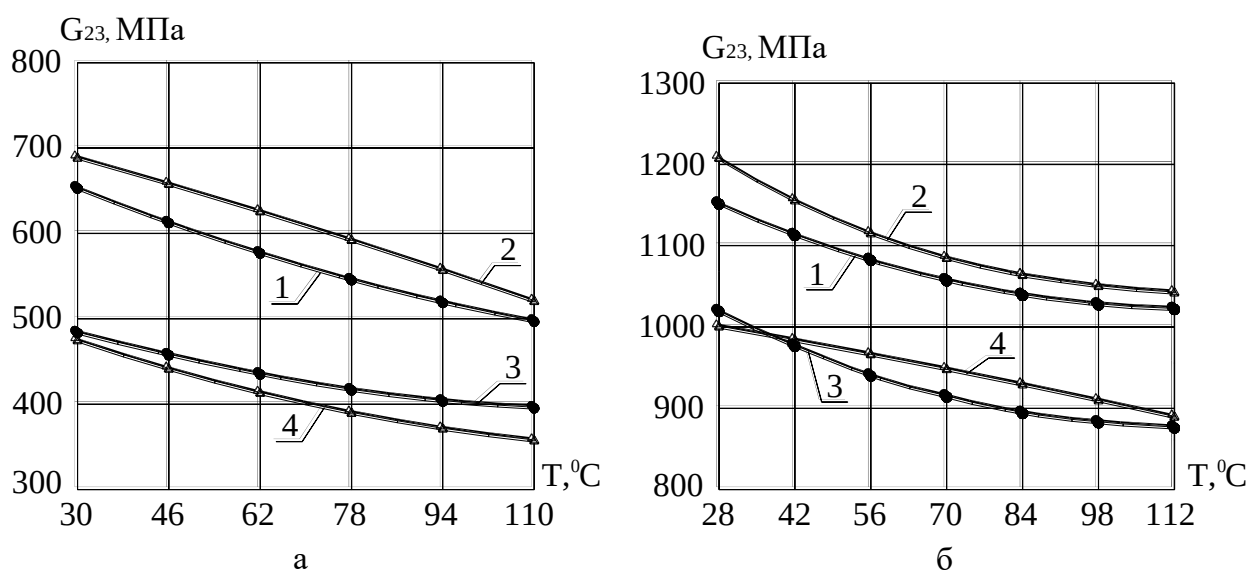


**Рис. 2.23.** Залежності в'язкопружного модуля зсуву поліпропіленового (а) та поліетиленового (б) зразків вздовж напрямку деформації попереднього розтягу від температури: 1, 2 – попередня деформація розтягу  $\varepsilon_1=1,5$ ; 3, 4 –  $\varepsilon_1=3,0$ ;  $\bullet$  – апроксимація експериментальних даних;  $\triangle$  – аналітичні залежності

З рис. 3.20 і 3.21 видно, що із збільшенням деформації попереднього розтягу поліпропілену та поліетилену в'язкопружний модуль зсуву зменшується вздовж і поперек попередньої деформації розтягу, при цьому діапазони зміни модуля різні, а швидкості – майже однакові. Цей факт підтверджує коректність прийнятої моделі орієнтованого полімеру [180], що представляє собою шарувате двофазне середовище, кожен шар якого має площину поперечної ізотропії, і тому, під час дії напружень зсуву вздовж і поперек деформації попереднього розтягу відносні переміщення елементарних шарів полімеру в поперечному напрямку більші, ніж в поздовжньому.

Збільшення температури полімеру (рис. 2.22 і 2.23) зменшує сили зв'язків, що перешкоджають відносному переміщенню шарів полімерного матеріалу, в результаті чого знижується опір змінні форми полімеру, тобто зменшується в'язкопружний модуль зсуву.

З представлених графіків (рис. 2.20-2.23) видно, що отримані аналітичні вирази та регресійні залежності, які описують формування фізико-механічних характеристик полімеру залежно від попередньої деформації розтягу та температури, задовільно узгоджуються (відносне відхилення не перевищує 16%), що підтверджує коректність використання розробленої структурної моделі полімеру для опису зміни його фізико-механічних властивостей.

## **Висновки до розділу 2**

1. Отримала розвиток структурна модель полімерного матеріалу, за допомогою якої можна описати зміну фізико-механічних характеристик полімеру в результаті впливу на нього механічного  $\sigma$  та теплового  $T$  полів, що створюються робочими органами перероблювального обладнання.

2. На основі структурної моделі полімеру вперше розроблено методи визначення фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів, за допомогою яких можна розрахувати значення в'язкопружного модуля при розтягу та зсуві залежно від деформації попереднього розтягу матеріалу, а це, в свою чергу, дає можливість розраховувати мінімальні зусилля, які потрібно

прикласти перероблювальному обладнанню до полімерних відходів для створення в них граничних деформацій розтягу та зсуву, що передують максимальній орієнтації структури матеріалу та його подальшому руйнуванню.

3. Вперше отримана модель зміни фізико-механічних властивостей полімеру при впливі підвищених температур, на основі якої запропоновано метод визначення в'язкопружного модуля при розтягу залежно від температури полімерного матеріалу, що дозволяє визначати ефективні режими роботи технологічного обладнання для переробки полімерних відходів.

4. Вперше отримані аналітичні та регресійні залежності, що описують зміну фізико-механічних характеристик полімеру залежно від попередньої деформації розтягу та температури, відносне відхилення яких не перевищує 16%, що підтверджує коректність використання розробленої структурної моделі полімеру для опису зміни його фізико-механічних властивостей під впливом робочих органів перероблювального обладнання.

5. Вперше експериментально визначено діапазони граничної деформації попереднього розтягу і температури нагріву полімерного матеріалу, в межах яких забезпечується найбільш суттєве зниження в'язкопружного модуля, а, отже, й міцності, в поперечному до попереднього розтягу напрямку. Так, для отримання мінімального в'язкопружного модуля в напрямку, поперечному до попереднього розтягу полімеру, необхідно забезпечити нагрів матеріалу до 78%...85% від температури плавлення полімеру і одночасно розтягнути його до значення руйнівної деформації для певного полімерного матеріалу, при чому швидкість розтягу має бути такою, при якій структура полімеру встигне максимально орієнтуватися. Для поліетиленової та поліпропіленової плівок, товщиною 1 мм, швидкість попередньої деформації має становити від  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м/с до  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м/с.

### РОЗДІЛ 3

## МОДЕЛЬ ЗМІНИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОЛІМЕРУ ПІД ВПЛИВОМ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ОБЛАДНАННЯ

### 3.1. Загальні положення

Згідно до розробленої в попередніх розділах концепції проектування обладнання для переробки полімерних відходів, яка враховує зміну надмолекулярної структури полімерного матеріалу та анізотропію його властивостей при створенні у ньому складного напружено-деформованого стану, визначимо схему переробки полімерних відходів (рис. 3.1).

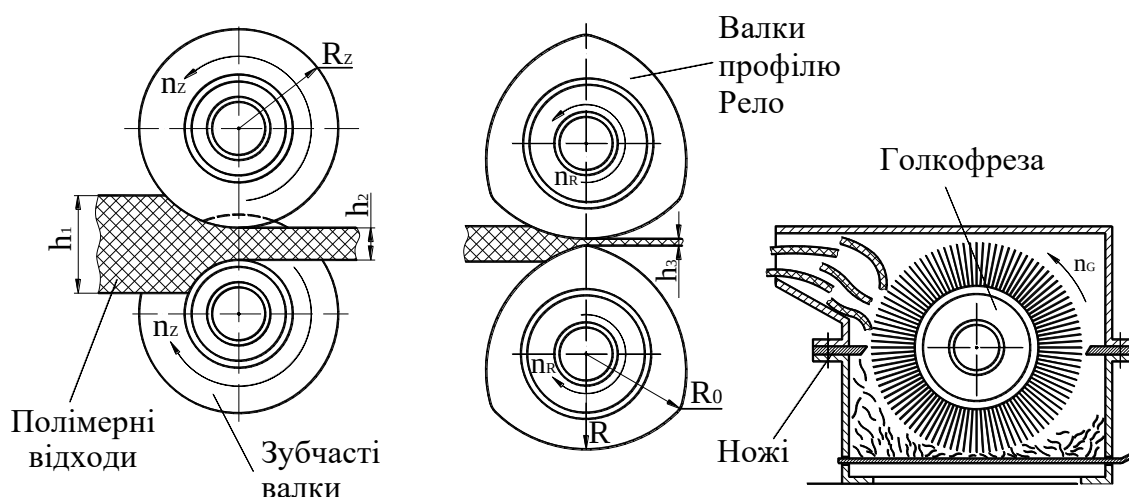


**Рис. 3.1. Схема перетворення полімерних відходів на частинки:**  
**а – вузол зубчастих валків; б – вузол валків з криволінійною поверхнею;**  
**в – вузол голкофрези**

Як видно з рис. 3.1, на першому етапі полімерні відходи обробляються на зубчастих валках, де вони розтягуються та стискаються і, як наслідок, – отримання орієнтованої структури з поперечними розривами, що утворюються на вершинах зубців; на другому етапі полімерні відходи з орієнтованою структурою обробляються на пристрої із валками профілю Рело, де вони піддаються деформаціям стиску та зсуву, внаслідок цього, в аморфній області між орієнтованими конгломератами кристалітів (сферолітів) полімеру

виникають магістральні розриви; на третьому етапі переробки полімерні відходи піддаються впливу голкофрези, де під дією голок у вершинах магістральних розривів виникають напруження, що значно перевищують середні значення напружень, через що розрив швидко збільшується і проходить через весь переріз зразка, що остаточно руйнує його на частинки з анізотропною структурою.

Для визначення раціональних конструктивних параметрів перероблювальних пристроїв та технологічних режимів їх роботи розглянемо процеси деформації полімерного матеріалу у цих пристроях (рис. 3.2). У пристрої із зубчастими валками матеріал спочатку витягується, а потім стискається, що дозволяє створити і зафіксувати в матеріалі орієнтовану надмолекулярну структуру. Після чого орієнтований полімерний матеріал потрапляє в пристрій із валками Рело, де він піддається деформаціям стиску і зсуву.

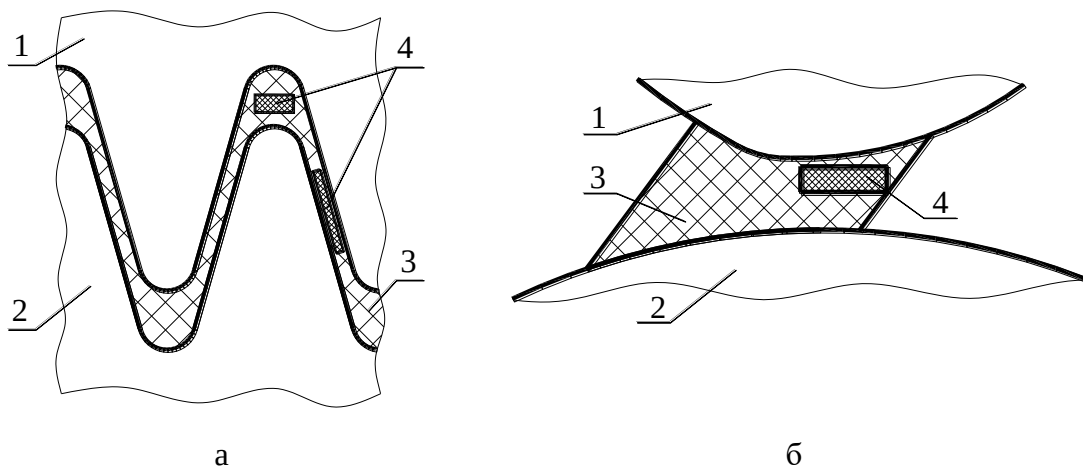


**Рис. 3.2. Схема деформації полімеру між зубчастими валками (а) і валками профілю Рело (б): 1, 2 – верхній і нижній валки; 3 – полімерні відходи; 4 – нескінченно малий об'єм полімеру**

Специфіка полімерів обмежує застосування методів з опору матеріалів для визначення міцності і тому постає необхідність внесення до них суттєвих коректив. В основу теорії міцності та деформування полімерних матеріалів необхідно покласти отримані з дослідів закономірності щодо впливу фактора часу, температури, анізотропії тощо.

Полімерам, що є пружно-в'язко-пластичними матеріалами, властива нестабільність структури в часі та при зміні температури. Їхня міцність і деформація змінюються в часі при постійно діючих, ступінчатих та змінних навантаженнях. Під впливом навантаження в полімерному матеріалі виникають миттєві пружні деформації, деформації, що розвиваються в часі (в'язкопружні) і пластичні деформації. В роботі розглядається два типи деформацій, що створюються перероблювальним обладнанням в полімерному матеріалі: в'язкопружний та пластичний. За зовнішнім результатом вони ідентичні – в обох випадках відбувається зміщення надмолекулярних структур, макромолекул або їх ланцюгів, але за сутністю ці деформації різні. В процесі в'язкопружного деформування зміщення зумовлюється тепловими флуктаціями і здійснюється поступово, по мірі вивільнення місця. Тому в'язкопружна деформація не пов'язана з порушенням цілісності та початкової структури полімеру і для її розвитку вимагається лише час. В'язкопружні деформації незворотні як і пластичні, але вони не руйнують структуру полімеру, тому в'язкопружні властивості полімеру після в'язкої деформації не змінюються, а при зміні знака зусилля або підвищення температури в'язкопружна деформація може бути зведена до нуля.

Пластичні деформації не зникають після повного розвантаження протягом необмежено великого періоду часу. Величина і швидкість розвитку в часі пластичної деформації залежать від величини і часу дії навантаження. Зростання цих деформацій пояснюється прогресуючим в часі виникненням і розвитком місцевих руйнувань.

### **3.2. Визначення в'язкопружної деформації полімерного матеріалу**

Результати досліджень механічних релаксаційних явищ в полімерах в широкому температурно-часовому інтервалі кількісно співставляються на підставі двох основних методів опису їх поведінки. Ці методи інтерпретації в'язкопружного напружено-деформаційного стану полімерного матеріалу ґрунтуються на двох підходах, що визначаються співвідношеннями між

напруженнями і деформаціями. Перший підхід [108] полягає у використанні функцій повзучості та релаксації у вигляді інтегралів Стільтьєса [225]:

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t-\tau) \cdot \left[ \frac{d\varepsilon_{kl}(\tau)}{d\tau} \right] \cdot d\tau, \quad \varepsilon(t) = \int_0^t J(t-\tau) \cdot \left[ \frac{d\sigma_{kl}(\tau)}{d\tau} \right] \cdot d\tau, \quad (3.1)$$

де  $\tau$  – час релаксації;  $E, J$  – відповідно, функції релаксації і повзучості.

Другий підхід полягає у використанні в співвідношеннях між напруженнями і деформаціями ядер повзучості і релаксації у вигляді інтегралів Рімана [226]:

$$\sigma(t) = E \left[ \varepsilon(t) - \int_0^t R(t-\tau) \cdot \varepsilon(\tau) \cdot d\tau \right], \quad \varepsilon(t) = \frac{1}{E} \left[ \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau) \cdot \sigma(\tau) \cdot d\tau \right], \quad (3.2)$$

де  $R(t-\tau) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \exp[-b_i(t-\tau)]$  – експонентне ядро релаксації;

$K(t-\tau) = \sum_{i=1}^n c_i \exp[-a_i(t-\tau)]$  – експонентне ядро повзучості.

Методики визначення параметрів експонентних ядер у рівняннях (3.2) засновані на різних наближених методах [227-229]. Недоліком експонентних ядер є те, що вони дають кінцеву швидкість деформації в початковий період навантаження. Крім того, для опису деформації реальних полімерів необхідна велика кількість параметрів полімерного матеріалу. Тому, при моделюванні деформації полімеру будемо використовувати рівняння (3.1).

Представимо інтеграли Стільтьєса (3.1) в тензорній формі:

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t E_{ijkl}(t-\tau) \cdot \left[ \frac{d\varepsilon_{kl}(\tau)}{d\tau} \right] \cdot d\tau, \quad \varepsilon_{ij}(t) = \int_0^t J_{ijkl}(t-\tau) \cdot \left[ \frac{d\sigma_{kl}(\tau)}{d\tau} \right] \cdot d\tau, \quad (3.3)$$

де  $\tau$  – час релаксації;  $E_{ijkl}, J_{ijkl}$  – відповідно, функції релаксації і повзучості, які утворюють тензори четвертого порядку.

При  $-\infty < t < 0$  тензори  $E_{ijkl}, J_{ijkl}$  дорівнюють нулю, тобто,  $E_{ijkl}(t) = J_{ijkl}(t) = 0$ , і кожен елемент цих тензорів має обмежену варіацію в будь-якому замкнутому підінтервалі з області  $-\infty < t < \infty$ .

Напруження, що виникають у полімерному матеріалі в процесі його обробки (рис. 3.3), визначимо з виразу узагальненого закону Гука [230, 231] таким чином:



$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (3.4)$$

де  $\sigma_{ij}$  і  $\varepsilon_{kl}$  – відповідно, тензори напруження і деформацій другого рангу;  $C_{ijkl}$  – тензор коефіцієнтів четвертого рангу, що описують в'язкопружні властивості полімерних матеріалів.

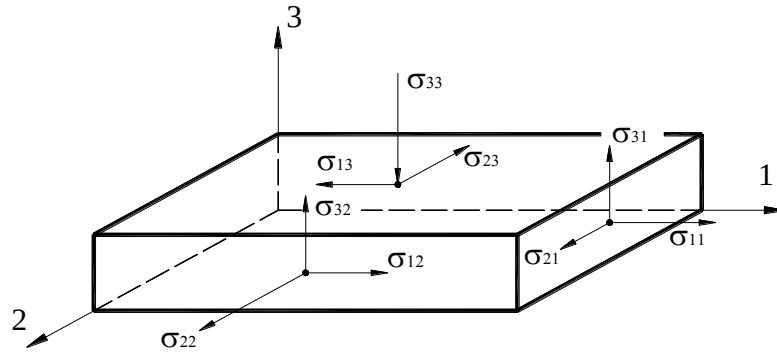


**Рис. 3.3. В'язкопружна деформація нескінченно малого об'єму полімеру**

Два однакові індекси позначатимуть нормальні напруження, а два різні індекси – дотичні напруження. Тут цифра 1 позначає вісь  $x$  або повернену вісь  $x'$ , цифра 2 – вісь  $y$  або повернену вісь  $y'$ , цифра 3 – вісь  $z$  або повернену вісь  $z'$ :

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Якщо  $k = l$ , то  $\varepsilon_{kl}$  представляють відносні деформації (подовження або укорочення), а якщо  $k \neq l$ , то  $\varepsilon_{kl}$  представляють відносні деформації зсуву. При цьому слід мати на увазі, що у формулі (3.4) підсумовування проводиться за індексами, що зустрічаються двічі в правій частині формули, тобто за індексами  $k$  і  $l$ . Для обчислення всього напруженого стану анізотропного тіла в загальному випадку буде потрібно  $3^4 = 81$  значення релаксаційних постійних. Проте, симетричність тензорів  $\sigma_{ij}$  і  $\varepsilon_{kl}$  дозволяє зменшити кількість незалежних компонент до 36.

Вирішуючи рівняння (3.4) відносно деформації  $\varepsilon_{kl}$ , отримаємо вираз закону Гука у в'язкопружній постановці:

$$\varepsilon_{kl} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{ij}, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (3.6)$$

де  $S_{ijkl} = 1/C_{ijkl} = C_{ijkl}^{-1}$  – тензор податливостей (або тензор коефіцієнтів, що описують в'язкопружні властивості полімерів).

При цьому, згідно до [230], величину в'язкопружного потенціалу можна представити у вигляді квадратичної функції напруження:

$$U = 0,5 \cdot S_{ijkl} \cdot \sigma_{ij} \cdot \sigma_{kl}. \quad (3.7)$$

У роботах [230-233] показано, що величина в'язкопружного потенціалу  $U$  різна для різних напружених станів, але постійна (інваріантна) для кожного даного напруженого стану і не залежить від повороту вісей координат. Умова інваріантності величини в'язкопружного потенціалу від повороту координатних вісей для конкретного виду напруженого стану лежить в основі визначення релаксаційних властивостей полімерних матеріалів. При цьому, в процесі формування полімерних матеріалів згідно до структурної моделі, що представлена в роботі [180], можливе чергування кристалічних і аморфних областей, що мають різні фізико-механічні властивості і різні типи симетрії цих властивостей. Для опису в'язкопружних властивостей полімерних матеріалів необхідно мати в своєму розпорядженні рівняння, що встановлюють взаємозв'язок їх релаксаційних властивостей з типами їх анізотропії, тобто з типами їх структурної симетрії [180, 216]. Для отримання основних визначальних співвідношень, що зв'язують різні типи структурної анізотропії полімерних матеріалів, розглянемо тензор в'язкопружних постійних  $C_{ijkl}$  в компактнішому вигляді, при умові введення таких скорочених позначень для напружень і деформацій:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \sigma_1, & \varepsilon_{11} &= \varepsilon_1; \\ \sigma_{22} &= \sigma_2, & \varepsilon_{22} &= \varepsilon_2; \\ \sigma_{33} &= \sigma_3, & \varepsilon_{33} &= \varepsilon_3; \\ \sigma_{23} &= \sigma_4, & \varepsilon_{23} &= \varepsilon_4; \\ \sigma_{13} &= \sigma_5, & \varepsilon_{13} &= \varepsilon_5; \\ \sigma_{12} &= \sigma_6, & \varepsilon_{12} &= \varepsilon_6. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Виконуючи заміну компонентів тензорів напружень та деформацій в рівнянні (3.4), враховуючи їх симетричність, отримаємо:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad \text{або} \quad (3.9)$$

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j, \quad (i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

Згідно до [231], матриця  $C_{ij}$  є симетричною відносно головної діагоналі. Це означає, що в рівнянні (3.9) коефіцієнти, що розташовані над головною діагоналлю і під нею, будуть попарно рівними між собою. В результаті лишиться 21 коефіцієнт, що розрізняється між собою:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}. \quad (3.10)$$

Нехай полімер має по відношенню до своїх в'язкопружних властивостей вісь симетрії другого порядку [231]. Це означає, що після кожного повороту системи координат на  $180^\circ$  навколо вісі симетрії значення в'язкопружних постійних у нерухомій і рухомій системі координат мають співпадати. Це дає рівність нулю таких компонентів матриці  $C_{ij}$ :

$$C_{14} = C_{24} = C_{34} = C_{15} = C_{25} = C_{35} = C_{46} = C_{56} = 0. \quad (3.11)$$

Підставляючи рівняння (3.11) в рівняння (3.10) та припускаючи, що полімер представляє собою трансверсально ізотропний матеріал [216], отримаємо матрицю постійних  $C_{ij}$  в такому вигляді:

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} = C_{13} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} = C_{33} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} \end{pmatrix}. \quad (3.12)$$

Використання співвідношень (3.2), (3.3), (3.12) при практичних розрахунках пов'язане із значними експериментальними труднощами при визначенні компонент  $C_{ij}$  з прямих фізико-механічних експериментів. Через це в практичних розрахунках будемо використовувати такі постійні, методи визначення яких відомі та детально викладені у роботах [234, 235]. Для цього перепишемо рівняння (3.6) в такому вигляді:

$$\varepsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, 4, 5, 6, \quad (3.13)$$

де матриця податливостей  $S_{ij}$  визначається таким чином:

$$S_{ij} = C_{ij}^T / |C_{ij}|,$$

де  $C_{ij}^T$  – транспонована матриця, елементами якої є алгебраїчні доповнення матриці  $C_{ij}$ ,  $|C_{ij}|$  – визначник матриці.

З умови симетрії  $C_{ij} = C_{ji}$  витікає симетрія  $S_{ij} = S_{ji}$ .

Розглянемо випадок, коли  $\sigma_1$  – єдине діюче напруження, тоді  $\varepsilon_1$ , згідно з (3.13), можна виразити таким чином:

$$\varepsilon_1 = S_{11} \cdot \sigma_1 = \frac{\sigma_1}{E_{11}}. \quad (3.14)$$

Якщо діє тільки напруження  $\sigma_2$ , то:

$$\varepsilon_2 = S_{22} \cdot \sigma_2 = \frac{\sigma_2}{E_{22}}, \quad (3.15)$$

а якщо діє тільки напруження  $\sigma_3$ , то:

$$\varepsilon_3 = S_{33} \cdot \sigma_3 = \frac{\sigma_3}{E_{33}}. \quad (3.16)$$

Деформації в перпендикулярних напрямках можна зв'язати такою залежністю [235]:

$$\varepsilon_1 = -\nu_{21} \cdot \varepsilon_2. \quad (3.17)$$

Підставляючи рівняння (3.15) в (3.17) можна отримати:

$$\varepsilon_1 = -\nu_{21} \frac{\sigma_2}{E_{22}}, \quad (3.18)$$

де  $E_{ij}$  – в'язкопружні модулі;  $\nu_{ij}$  – коефіцієнти Пуассона (перший індекс показує напрямок прикладеного навантаження, а другий – напрямок зміни поперечних розмірів).

Для загального випадку нормального навантаження маємо:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E_{11}} - \nu_{21} \frac{\sigma_2}{E_{22}} - \nu_{31} \frac{\sigma_3}{E_{33}}, \\ \varepsilon_2 &= -\nu_{12} \frac{\sigma_1}{E_{11}} + \frac{\sigma_2}{E_{22}} - \nu_{32} \frac{\sigma_3}{E_{33}}, \\ \varepsilon_3 &= -\nu_{13} \frac{\sigma_1}{E_{11}} - \nu_{23} \frac{\sigma_2}{E_{22}} + \frac{\sigma_3}{E_{33}}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Для загального випадку дотичного навантаження маємо:

$$\varepsilon_4 = \frac{\sigma_4}{G_{23}}, \quad \varepsilon_5 = \frac{\sigma_5}{G_{13}}, \quad \varepsilon_6 = \frac{\sigma_6}{G_{12}}. \quad (3.20)$$

Отже, враховуючи рівняння (3.19) та (3.20), запишемо матрицю податливостей  $S_{ij}$  через в'язкопружні постійні в розгорненому вигляді для трансверсального ізотропного полімерного матеріалу:

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{21}/E_{22} & -\nu_{31}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & -\nu_{32}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_{11} & -\nu_{23}/E_{22} & 1/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{pmatrix}. \quad (3.21)$$

Підставивши формулу (3.21) в (3.13) з врахуванням (3.12), отримаємо

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{21}/E_{22} & -\nu_{21}/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & -\nu_{32}/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_{11} & -\nu_{23}/E_{22} & 1/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}. \quad (3.22)$$

Отримана система із шести рівнянь встановлює взаємозв'язок між основними в'язкопружними параметрами полімерного матеріалу і може вважатися моделлю ізотропного орієнтованого полімеру.

Із властивості симетрії матеріалу  $[S_{ij}] = [S_{ji}]$  та з рівняння (3.22) витікає співвідношення:

$$\nu_{ij}E_j = \nu_{ji}E_i. \quad (3.23)$$

Тут підсумовування за індексами, що повторюються, не проводиться.

Деформація полімерних відходів у валкових пристроях відбувається тоді, коли полімерний матеріал знаходиться в умовах плоского напруженого стану. В цьому випадку маємо  $\sigma_3 = \sigma_{33} = 0$ ;  $\sigma_4 = \sigma_{23} = 0$ ;  $\sigma_5 = \sigma_{13} = 0$  [236, 237], і, підставляючи ці умови в рівняння (3.23), отримаємо:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{21}/E_{22} & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}. \quad (3.24)$$

З системи (3.24) видно, що для опису поведінки полімеру при створенні в ньому складного напружено-деформованого стану необхідно мати значення чотирьох незалежних в'язкопружних констант.

З рівняння (3.24) може бути отримане зворотне співвідношення:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{21}/E_{22} & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}. \quad (3.25)$$

Обернену матрицю визначимо, використовуючи відому формулу перетворення  $C = S^{-1} = 1/|S| \cdot S_*^T$ , де  $|S|$  – визначник вихідної матриці  $S$ ;  $S_*^T$  –

транспонована матриця алгебраїчних доповнень відповідних елементів матриці  $S$ . В результаті отримаємо:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{E_{11}}{1-\nu_{21}\nu_{12}} & \frac{\nu_{21}E_{11}}{1-\nu_{21}\nu_{12}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_{22}}{1-\nu_{21}\nu_{12}} & \frac{E_{22}}{1-\nu_{21}\nu_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad \text{або} \quad \sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j, \quad (i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6). \quad (3.26)$$

Взаємозв'язок між в'язкопружними компонентами з рівняння (3.26) і константами  $C_{ij}$  [236] легко встановити, якщо припустити, що напруження  $\sigma_3$  дорівнює нулю [238]. В результаті отримаємо таку систему рівнянь:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}} & C_{12} - \frac{C_{13} \cdot C_{23}}{C_{33}} & 0 \\ C_{12} - \frac{C_{13} \cdot C_{23}}{C_{33}} & C_{22} - \frac{C_{23}^2}{C_{33}} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}. \quad (3.27)$$

Введемо такі позначення:  $Q_{11} = C_{11} - C_{13}^2 / C_{33}$ ;  $Q_{12} = Q_{21} = C_{12} - C_{13}C_{23} / C_{33}$ ;  $Q_{22} = C_{22} - C_{23}^2 / C_{33}$ ;  $Q_{66} = C_{66}$ .

Тоді система рівнянь (3.27) буде мати такий вигляд:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}. \quad (3.28)$$

В процесі деформування полімерного матеріалу між зубчастими валками і валками профілю Рело полімерні відходи будуть повертатися на різні кути в площині обробки. У цьому випадку виникає задача визначення релаксаційних характеристик полімерного матеріалу у напрямку дії визначеної системи сил [226].

Отже, для полімерного матеріалу, який повернений відносно вісі системи координат, що є перпендикулярною площині симетрії, закон перетворення тензора  $C_{ijkl}$  в узагальненому законі Гука [230, 231, 236] та у в'язкопружній постановці буде мати такий вигляд [238]:

$$C'_{ijkl} = a_{im} a_{jn} a_{ko} a_{lp} C_{mnop} \quad (3.29)$$

Прийmemo 1', 2', 3' (або  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ) – нові вісі системи координат 1, 2, 3 (або  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), поверненої відносно осі 3 (або  $z$ ), тоді, відповідно до [238], можна записати:

$$\begin{aligned} C'_{11} &= m^4 C_{11} + 2m^2 n^2 \cdot (C_{12} + 2C_{66}) + 4mn \cdot (m^2 C_{16} + n^2 C_{26}) + n^4 C_{22}, \\ C'_{12} &= m^2 n^2 \cdot (C_{11} + C_{22} - 4C_{66}) - 2mn \cdot (m^2 - n^2) \cdot (C_{16} - C_{26}) + (m^4 + n^4) \cdot C_{12}, \\ C'_{13} &= m^2 C_{13} + n^2 C_{23} + 2mn C_{36}, \\ C'_{16} &= m^2 \cdot (m^2 - 3n^2) \cdot C_{16} - mn \cdot (m^2 C_{11} - n^2 C_{22} - (m^2 - n^2) \cdot (C_{12} + 2C_{66})) + n^2 \cdot (3m^2 - n^2) \cdot C_{26}, \\ C'_{22} &= n^4 C_{11} + 2m^2 n^2 \cdot (C_{12} + 2C_{66}) - 4mn \cdot (m^2 C_{26} + n^2 C_{16}) + m^4 C_{22}, \\ C'_{23} &= n^2 C_{13} + m^2 C_{23} - 2mn C_{36}, \\ C'_{26} &= m^2 \cdot (m^2 - 3n^2) \cdot C_{26} - mn \cdot (n^2 C_{11} - m^2 C_{22} + (m^2 - n^2) \cdot (C_{12} + 2C_{66})) + n^2 \cdot (3m^2 - n^2) \cdot C_{16}, \\ C'_{33} &= C_{33}, \\ C'_{36} &= (m^2 - n^2) \cdot C_{36} + mn \cdot (C_{23} - C_{13}), \\ C'_{44} &= m^2 C_{44} - 2mn C_{45} + n^2 C_{55}, \\ C'_{45} &= (m^2 - n^2) \cdot C_{45} + mn \cdot (C_{44} - C_{55}), \\ C'_{55} &= m^2 C_{55} + 2mn C_{45} + n^2 C_{44}, \\ C'_{66} &= m^2 n^2 \cdot (C_{11} + C_{22} - 2C_{12}) + 2mn \cdot (m^2 - n^2) \cdot (C_{22} - C_{16}) + (m^2 - n^2)^2 \cdot C_{66}, \end{aligned} \quad (3.30)$$

де  $n = \sin \theta$ ,  $m = \cos \theta$ ,  $\theta$  – кут повороту.

Отримаємо формули перетворення для співвідношення напруження-деформація при тому ж плоскому напруженому стані. Для ортотропного полімерного матеріалу, що володіє тільки однією площиною симетрії, яка співпадає з площиною 1, 2 (або  $x$ ,  $y$ ) системи координат, співвідношення напруження-деформація (3.6) можна узагальнити таким чином:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}, \quad (3.31)$$

де

$$Q_{ij} = C_{ij} - C_{i3} C_{j3} / C_{33}. \quad (3.32)$$

Наявність компонент  $Q_{16} = Q_{61}$ ,  $Q_{26} = Q_{62}$  в (3.32) відображає взаємодію між нормальними та дотичними напруженнями і деформаціями. Компоненти  $Q_{ij}$  та



$C_{ij}$  при повороті системи координат підпорядковуються одному і тому ж закону перетворення (3.29) як компоненти тензора четвертого рангу. Відповідно до [153, 238], рівняння (3.30) можна записати в досить компактній формі.

Увівши такі позначення:

$$\begin{aligned} m^4 &= \frac{1}{8}(3 + 4\cos 2\theta + \cos 4\theta), & m^3 n &= \frac{1}{8}(2\sin 2\theta + \sin 4\theta), \\ m^2 n^2 &= \frac{1}{8}(1 - \cos 4\theta), & mn^3 &= \frac{1}{8}(2\sin 2\theta - \sin 4\theta), \\ n^4 &= \frac{1}{8}(3 - 4\cos 2\theta + \cos 4\theta), \end{aligned} \quad (3.33)$$

і підставляючи їх в (3.31), з урахуванням (3.30), компоненти  $Q_{ij}$  перетворюються до такого вигляду:

$$\begin{pmatrix} Q'_{11} \\ Q'_{22} \\ Q'_{12} \\ Q'_{66} \\ 2Q'_{16} \\ 2Q'_{26} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1 & U_2 & 2U_6 & U_3 & U_7 \\ U_1 & -U_2 & -2U_6 & U_3 & U_7 \\ U_4 & 0 & 0 & -U_3 & -U_7 \\ U_5 & 0 & 0 & -U_3 & -U_7 \\ 0 & 2U_6 & -U_2 & 2U_7 & -2U_3 \\ 0 & 2U_6 & -U_2 & -2U_7 & 2U_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \\ \cos 4\theta \\ \sin 4\theta \end{pmatrix}, \quad (3.34)$$

де

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{1}{8}(3Q_{11} + 3Q_{22} + 2Q_{12} + 4Q_{66}), & U_2 &= \frac{1}{2}(Q_{11} - Q_{22}), \\ U_3 &= \frac{1}{8}(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 4Q_{66}), & U_4 &= \frac{1}{8}(Q_{11} + Q_{22} + 6Q_{12} - 4Q_{66}), \\ U_5 &= \frac{1}{8}(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} + 4Q_{66}), & U_6 &= \frac{1}{2}(Q_{16} + Q_{26}), & U_7 &= \frac{1}{2}(Q_{16} - Q_{26}). \end{aligned} \quad (3.35)$$

Безпосередньо з системи рівнянь (3.35) впливають такі інваріантні властивості:

$$\begin{aligned} Q'_{11} + Q'_{22} + 2Q'_{12} &= Q_{11} + Q_{22} + 2Q_{12}, \\ Q'_{66} - Q'_{12} &= Q_{66} - Q_{12}. \end{aligned} \quad (3.36)$$

Вище змодельований напружено-деформований стан, що створюється в полімерному матеріалі при впливі на нього зубчастими валками. В результаті

структура полімерного матеріалу орієнтується і, залежно від прикладеного навантаження, може бути зруйнована на вершинах зубців.

Далі орієнтований полімерний матеріал потрапляє в простір між валками профілю Рело, де він піддається впливу напружень стиску та зсуву. Припустимо, що орієнтований полімерний матеріал під впливом напружень зсуву розшаровується вздовж площини зсуву. Уявімо, що полімерний матеріал з орієнтованою структурою представляє собою утворення з регулярною послідовністю ортотропних шарів.

Для того, щоб відшарувати один шар від іншого, необхідно створити такий напружений стан в полімерному матеріалі, в результаті якого, під дією напруження зсуву, один шар полімеру буде переміщатися відносно іншого, руйнуючи, тим самим, адгезійні зв'язки між шарами.

Розглянемо створення такого плоского напруженого стану, який призведе до зсуву одного шару відносно іншого. Рівнодіючі напружень для такого напруженого стану в полімерному матеріалі записуються, відповідно до [236-238], у такому вигляді:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}, \quad (3.37)$$

де

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k h_k, \quad (3.38)$$

де  $h_k$  – товщина  $k$ -го шару полімерного матеріалу.

Розглянемо для прикладу член  $B_{11}$ . Перепишемо рівняння (3.38) у такому вигляді:

$$B'_{11} = \sum_{k=1}^n (Q'_{11})_k h_k \quad (3.39)$$

і визначимо значення в'язкопружної константи  $B'_{11}$  в напрямку  $i$ . Прийmemo, що вісі координатної системи 1, 2 співпадають з головними напрямками ортотропії даного шару. Таким чином, з рівняння (3.34) випливає:

$$(Q'_{11})_k = U_1 + U_2 \cos 2\alpha + U_3 \cos 4\alpha, \quad (3.40)$$

де  $\alpha$  – кут між напрямком орієнтованої структури полімеру і напрямком його подачі в простір між валками профілю Рело. Позначимо загальну товщину полімерного матеріалу через  $h_2$ . Припустимо, що всі шари полімеру будуть однакові за товщиною, яка визначається за такою формулою:

$$h_k = \frac{h_2}{n}. \quad (3.41)$$

З рівнянь (3.39) та (3.40) з урахуванням (3.41), отримаємо:

$$B'_{11} = \frac{h_2}{n} \left( U_1 + U_2 \sum_{k=1}^n \cos 2\alpha + U_3 \sum_{k=1}^n \cos 4\alpha \right). \quad (3.42)$$

Нехай будь-який напрямок деформації полімерного матеріалу буде повернутий на кут  $\varphi$  відносно попередньої орієнтації. Тоді в'язкопружні та інші властивості полімерного матеріалу в напрямку, поверненому щодо напрямку орієнтації на кут  $\varphi$ , можна виразити з рівняння (3.42):

$$B''_{11} = \frac{h_2}{n} \left( U_1 + U_2 \sum_{k=1}^n \cos 2(\alpha - \varphi) + U_3 \sum_{k=1}^n \cos 4(\alpha - \varphi) \right). \quad (3.43)$$

Використовуючи тригонометричні тотожності отримаємо:

$$B''_{11} = \frac{h_2}{n} \left( U_1 + U_2 \cos 2\varphi \sum_{k=1}^n \cos 2\alpha + U_3 \sin 2\varphi \sum_{k=1}^n \sin 2\alpha + U_3 \left( \cos 4\varphi \sum_{k=1}^n \cos 4\alpha + \sin 4\varphi \sum_{k=1}^n \sin 4\alpha \right) \right). \quad (3.44)$$

Аналогічно можна отримати вирази для повного комплексу в'язкопружних постійних полімерного матеріалу, необхідних для визначення технологічної деформації, що призведе до його розшаровування.

З рівняння (3.37) може бути отримане зворотне співвідношення:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{16} \\ L_{21} & L_{22} & L_{26} \\ L_{61} & L_{62} & L_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}, \quad (3.45)$$

де  $L_{11} \dots L_{66}$  – податливості полімерного матеріалу,  $L = B^{-1} = 1/|B| \cdot B_*^T$ , де  $|B|$  – визначник вихідної матриці  $B$ ;  $B_*^T$  – транспонована матриця алгебраїчних доповнень відповідних елементів матриці  $B$ .

При вирішенні задачі у разі зсуву полімерного матеріалу вздовж трьох паралельних площин можна, використовуючи викладений вище метод, визначати технологічні деформації зсуву, які необхідно створити технологічним обладнанням, для забезпечення розшарування орієнтованого полімерного матеріалу. Полімерним матеріалом, що піддається напруженням зсуву, будемо вважати такий матеріал, в якому шари, переміщуючись один відносно іншого, знаходяться в умовах плоского напруженого стану.

Для того, щоб забезпечити розшарування полімерного матеріалу, необхідно між шарами створити такі нормальні напруження  $\sigma_{2k}$  і напруження зсуву  $\sigma_{6k}$ , щоб вони перевищили допустимі напруження, що створюються силами в'язку між шарами.

З рівняння (3.24), враховуючи введені в роботах [180, 216] позначення, визначимо деформації в орієнтованому полімерному матеріалі, на який діють напруження стиску і зсуву:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \sigma_2 \frac{\nu_{21}}{E_2}; \quad \varepsilon_2 = -\sigma_1 \frac{\nu_{12}}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2}; \quad \gamma_{12} = \frac{\sigma_{12}}{G_{12}}. \quad (3.46)$$

Так як зовнішнє навантаження, що приводить до відокремлення шарів, задане, то нормальні напруження в напрямку 1:  $\sigma_1$  і напрямку 2:  $\sigma_2$  та напруження зсуву  $\sigma_{12}$  мають бути еквівалентними середньому нормальному або тангенціальному напруженню.

В результаті деяких перетворень системи (3.46), з урахуванням рівності напружень і деформацій в шарах, отримаємо:

$$A_{11}\sigma_1 = \frac{2}{h_2} \left( \frac{\hat{\sigma}}{E_{11b}} \right), \quad A_{22}\sigma_2 = -\frac{2}{h_2} \left( \nu_{12} \frac{\hat{\sigma}}{E_1} \right), \quad A_{33}\sigma_{12} = \frac{4}{h_2} \left( \frac{\sigma_{12}}{G_{12}} \right). \quad (3.47)$$

де  $A_{11} = 4/E_1 h_2$ ;  $A_{22} = 4/E_2 h_2$ ;  $A_{33} = 4/G_{12} h_2$ ;  $A_{12} = A_{21} = -4\nu_{12}/E_1 h_2$ ;  
 $\hat{\sigma} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$  – еквівалентне напруження розтягу.

Вирішуючи рівняння (3.47) відносно нормальних напружень  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$ , отримаємо

$$\sigma_1 = -\frac{4\hat{\sigma}}{E_1 h_2} \left( \frac{A_{22} + \nu_{12} A_{12}}{A_{11} A_{22} + A_{12}^2} \right), \sigma_2 = -\frac{4\hat{\sigma}}{E_2 h_2} \left( \frac{A_{12} + \nu_{12} A_{11}}{A_{11} A_{22} - A_{12}^2} \right), \sigma_{12} = \frac{4\sigma_{12}}{h_2 G_{12} A_{33}}. \quad (3.48)$$

У випадку дослідження плоского напруженого стану полімерного матеріалу при дії на нього зубчастих валків і валків профілю Рело з рівняння (3.24), враховуючи рівняння (3.48) та (3.47), отримаємо вирази для визначення деформації всього матеріалу і окремих шарів в напрямках дії технологічного навантаження:

$$\varepsilon_1 = \frac{\hat{\sigma}}{E_1^2 h_2} \cdot \frac{\frac{1}{E_2 h_2} - \frac{\nu_{12}^2}{E_1 h_2}}{\frac{1}{E_1 E_2 h_2^2} - \left( \frac{\nu_{12}}{E_{11} h_2} \right)^2}, \varepsilon_2 = \frac{\hat{\sigma}}{E_1^2 h_2} \cdot \frac{\frac{\nu_{12}^2}{E_1 h_2} - \frac{\nu_{12}^2}{E_2 h_2}}{\frac{1}{E_1 E_2 h_2^2} - \left( \frac{\nu_{12}}{E_{11} h_2} \right)^2}, \varepsilon_{12} = \frac{\sigma_{12}}{G_{12}}. \quad (3.49)$$

Релаксаційні модулі полімерного матеріалу  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$  та коефіцієнт Пуассона  $\nu_{12}$  визначаються за рівняннями (2.37), (2.40), (2.78), (2.100), (2.117) та (2.132), отриманими в розділі 2.

Отже, представлений вище метод дає можливість визначати в'язкопружну деформацію полімерного матеріалу, в якому створюється складний напружено-деформований стан. Вирази для визначення деформацій полімерного матеріалу можна використовувати для розрахунку дотичних і нормальних навантажень, які мають забезпечуватися зусиллям, що створюватиме обладнання для переробки полімерних відходів, під дією яких буде відбуватися руйнування полімерного матеріалу:

$$\sigma_1^{(1)} = \varepsilon_1 \cdot E_1^2 h_2 \cdot \frac{\frac{1}{E_1 E_2 h_2^2} - \left( \frac{\nu_{12}}{E_{11} h_2} \right)^2}{\frac{1}{E_2 h_2} - \frac{\nu_{12}^2}{E_1 h_2}}; \sigma_1^{(2)} = \varepsilon_2 \cdot E_1^2 h_2 \cdot \frac{\frac{1}{E_1 E_2 h_2^2} - \left( \frac{\nu_{12}}{E_{11} h_2} \right)^2}{\frac{\nu_{12}^2}{E_1 h_2} - \frac{\nu_{12}^2}{E_2 h_2}}; \sigma_1^{(12)} = \varepsilon_{12} \cdot G_{12}. \quad (3.50)$$

За допомогою рівнянь (3.50) можна розрахувати значення напружень, які забезпечують необхідні для максимальної орієнтації полімеру та подальшого його руйнування деформації, що можуть бути використані при визначенні конструктивних параметрів робочих органів перероблювального обладнання та технологічних режимів процесу переробки полімерних відходів, а саме: радіусу і довжини валків; міжвалкової відстані; кроку, висоти і кута профілю зубців; ексцентриситету валків профілю Рело; шорсткості бічних поверхонь зубців і поверхонь валків профілю Рело та швидкості обертання валків.

### 3.3. Модель пластичної деформації полімерного матеріалу

При моделювання процесу деформації полімерного матеріалу між валками в умовах стиску і зсуву будемо рахувати, що тіло однорідне та трансверсально ізотропне (рис. 3.4). В будь-якому перерізі  $y = const$  буде мати місце однаковий напружено-деформований стан. Компоненти напруження будуть залежати від  $x$  та  $z$ , причому  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{zy}$  дорівнюють нулю через відсутність в тих площинах деформацій зсуву.

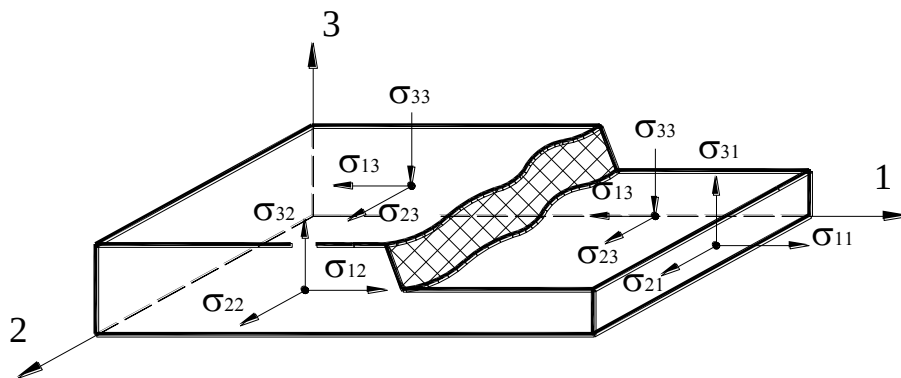


Рис. 3.4. Пластична деформація нескінченно малого об'єму полімеру

На відміну від теорії пружності, де наведені достатні умови для вирішення плоских задач, в теорії пластичності необхідно вводити додаткові спрощення.

Перше спрощення – будемо використовувати схему тільки пластичного тіла. Звичайно, дане припущення вносить певну похибку, але вирішення пружно-

пластичної задачі є досить складним завданням і для нашого випадку, де мають місце пластичні деформації, достатньо концепції пластичного тіла.

Задача деформації полімерного матеріалу між валками профілю Рело передбачає, що пластична деформація локалізована поблизу контактних площин. Технологічні задачі такого типу відносяться до задач пластичного усталеного руху з великими деформаціями [233]. Крім того, мета наших досліджень передбачає знаходження граничних напружень зсуву, що, в свою чергу, дозволяє використовувати вибрану раніше концепцію пластичного тіла.

Для моделювання процесу пластичної деформації полімерного матеріалу скористаємося відомими з теорії пружності формулами [182, 233]. Рівняння руху матеріалу під впливом напружено-деформованого стану в тензорній формі запишемо таким чином:

$$\sigma_{nm} + \rho \cdot F_n = \rho \cdot \frac{\partial u_n}{\partial t}, \quad (3.51)$$

з якого отримаємо рівняння рівноваги:

$$\sigma_{nm} + \rho \cdot F_n = 0, \quad (3.52)$$

де  $\sigma_{nm}$  – компоненти тензора напруження, Па;  $u_n$  – компоненти вектора швидкості, м/с, які розраховуються за таким рівнянням:  $u_n = dx_n/dt$ ;  $\rho$  – щільність полімерного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $F$  – масові сили, Н.

Додамо умову нерозривності:

$$\partial \rho / \partial t + \rho \cdot u_n = 0. \quad (3.53)$$

Припустимо, що полімерний матеріал, який оброблюється між валками, є симетричним стосовно парності тангенціальних напружень:  $\sigma_{nm} = \sigma_{mn}$ .

Задамо також деформації та швидкості їх зміни співвідношеннями Коши:

$$\varepsilon_{nm} = 0,5 \cdot (x_n + x_m), \quad (3.54)$$

$$d\varepsilon_{nm} = 0,5 \cdot \left( \frac{\partial}{\partial x_m} dx_n + \frac{\partial}{\partial x_n} dx_m \right). \quad (3.55)$$

Для дослідження чисто пластичної деформації полімерного матеріалу між валками в умовах стиску і зсуву будемо використовувати моделі пластичності

[239, 240], відповідно до яких швидкість деформації в процесі обробки матеріалу будемо знаходити як суму швидкостей вискоеластичної та пластичної деформацій:

$$d\varepsilon_{nm} = d\varepsilon_{nm}^e + d\varepsilon_{nm}^{nl}. \quad (3.56)$$

Будь-яку непружну і невискоеластичну деформацію будемо вважати пластичною незалежно від виникнення.

В процесі пластичної деформації напружено-деформований стан, що виникає в полімерному матеріалі, представимо у такому вигляді:

$$\sigma_{nm} = (\lambda \cdot \xi \cdot \delta_{nm} + 2\mu \cdot e_{nm}^{nl}) \cdot t, \quad (3.57)$$

де  $\lambda$ ,  $\mu$  – коефіцієнти Ламе, Па;  $\sigma_{nm}$  та  $e_{nm}$  – компоненти тензора напружень та тензора швидкості деформацій,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\delta_{nm}$  – символ Кронекера;  $\xi$  – швидкість зміни відносної об'ємної деформації,  $\text{с}^{-1}$ ;  $t$  – час дії валків на полімерний матеріал, с.

Як відомо з [140, 217], добуток коефіцієнтів Ламе на час деформування полімерного матеріалу дорівнює в'язкості:  $\eta_{zc} = \mu \cdot t$ ,  $\eta_{cm} = \lambda \cdot t$ .

Вплив температури на активність руху сегментів ланцюгів макромолекул, а отже на напружено-деформований стан в полімерному матеріалі врахуємо за допомогою рівняння Арреніуса:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{U/(RT)}, \quad (3.58)$$

де  $U$  – енергія активації в'язкої течії, Дж;  $\eta_0$  – постійна, яка може бути визначена з умови  $T > T_{nl}$ , де  $T_{nl}$  – температура плавлення полімеру,  $^{\circ}\text{C}$ .

Запишемо рівняння (3.57) таким чином:

$$\sigma_{nm} = \sigma \cdot \delta_{nm} + s_{nm}, \quad (3.59)$$

де  $\sigma \cdot \delta_{nm}$  – компоненти кульового тензора напружень, що описують зміну об'єму без зміни форми, тобто ущільнення матеріалу, Па;  $s_{nm}$  – компоненти девіатора тензора напружень, що описують зміну форми тіла без зміни його об'єму, Па;  $\sigma$  – гідростатичний тиск, Па;  $\delta_{nm}$  – символ Кронекера.



Таким чином, будемо вважати, що в процесі пластичної деформації полімерного матеріалу між валками відбувається деформація елементарного об'єму матеріалу, на який діє гідростатичний тиск, і деформація зсуву. Згідно з [217, 233, 235], запишемо рівняння, яке пов'язує зміну девіатора напружень і швидкості деформацій в такому вигляді:

$$ds_{nm} = G \cdot (2e_{nm} - 3 \cdot \xi \cdot \delta_{nm}), \quad (3.60)$$

де  $G$  – вязкопружний модуль зсуву, Па.

Можливість обертання елементів середовища як цілого будемо враховувати виразом Яумана [235]:

$$ds_{nm} = s_{nm} - s_{np} \cdot \omega_{mp} - s_{mp} \cdot \omega_{np}, \quad (3.61)$$

де  $\omega_{mp}$  – компоненти тензора відносних швидкостей обертання.

Швидкість зміни всебічного тиску на матеріал визначимо з такого рівняння:

$$d\sigma = -K \cdot \Delta V / V_0, \quad (3.62)$$

де  $V_0$  – об'єм полімерного матеріалу до деформації, м<sup>3</sup>;  $\Delta V$  – зміна об'єму полімеру, м<sup>3</sup>;  $K = E / [3(1 - 2\nu)]$  – модуль об'ємного розширення (стиснення), Па;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона (для нестисливих матеріалів  $\nu = 0,5$ ).

Перепишемо рівняння (3.62) з урахуванням впливу зміни температури:

$$d\sigma = -K \cdot \Delta V / V_0 + \alpha \cdot K \cdot dT, \quad (3.63)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплового розширення, °C<sup>-1</sup>;  $dT$  – зміна температури матеріалу, °C.

Визначимо компоненти тензорів швидкостей відносної деформації та обертання з таких рівнянь:

$$e_{nm} = 0,5 \cdot (u_n + u_m), \quad (3.64)$$

$$\omega_{nm} = 0,5 \cdot (u_n - u_m). \quad (3.65)$$

Розглянемо окремо всебічне стискування полімеру, що приводить до зміни його об'єму (ущільнення), а отже й зміцнення, і пластичну деформацію зсуву при постійному об'ємі (вважаємо, що матеріал нестисливий). Спочатку

змоделюємо процес зміцнення полімеру, що можливий при дії лише гідростатичного тиску на полімер.

Стан середовища, що відповідає пружним напруженням, обмежений поверхнею, при досягненні якої починається пластичне деформування та руйнування полімерного матеріалу. Рівняння поверхні граничного стану запишемо в такий спосіб:

$$f(\sigma_{nm}) = 0. \quad (3.66)$$

Граничну поверхню зручно представляти в системі координат інваріантів тензора напруження – по вісі  $x$  будемо відкладати гідростатичний тиск, а по вісі  $y$  будемо відкладати інтенсивність дотичних напружень, що з'являються в результаті всебічного стиснення елементарного об'єму полімерного матеріалу. З урахуванням сказаного вище та рівняння (3.59), перепишемо вираз (3.66) таким чином:

$$f(\sigma, \tau) = 0, \quad (3.67)$$

де  $\sigma$  – гідростатичний тиск на елементарний об'єм полімерного матеріалу, Па;

$\tau$  – інтенсивність дотичних напружень, Па.

Згідно теорії пластичної течії [233, 235, 241], пластична деформація визначається так (цей зв'язок встановлює теорема Мізеса):

$$d\varepsilon_{nm}^{pl} = d\lambda \frac{\partial g(\sigma_{nm})}{\partial \sigma_{nm}}, \quad (3.68)$$

де  $d\lambda$  – деякий множник;  $\partial g(\sigma_{nm})$  – пластичний потенціал, який можна визначити з такого рівняння [240, 242, 243]:

$$\partial g(\sigma_{nm}) = -\beta_1 \sigma + \kappa \tau, \quad (3.69)$$

де  $\beta_1 = \sin \psi$ ,  $\kappa = \cos \psi$  – параметри;  $\psi$  – кут нахилу поверхні пластичного потенціалу.

Граничну поверхню в області зсувних деформацій на інтервалі тисків  $\sigma_h \leq \sigma \leq \sigma_0$ , згідно з [233], опишемо таким рівнянням:

$$f_1(\sigma, \tau) = \tau - \alpha \cdot \sigma - \beta = 0, \quad (3.70)$$

де  $\tau = \sqrt{0,5 \cdot s_{nm} s_{nm}}$  – інтенсивність тангенціальних напружень, Па;  $\sigma_h$  – тиск, при якому відбувається крихке руйнування (знаходимо з експерименту, шляхом

визначення допустимого напруження під час стиску полімеру при температурі склування), Па;  $\sigma_0$  – тиск, при якому починається ущільнення матеріалу, Па;  $\alpha$ ,  $\beta$  – параметри, які описують поверхню текучості Друкера-Прагера і можуть бути визначені з рівнянь, що наведені нижче.

Якщо конус Друкера-Прагера вписаний в поверхню Кулона-Мора, то:

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}, \quad \beta = \frac{6 \cdot c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}, \quad (3.71)$$

де  $c$  – перетин кривої критерію Кулона-Мора з віссю  $\tau$ , а  $\varphi$  – кут нахилу кривої критерію міцності Кулона-Мора.

Якщо конус Друкера-Прагера описує поверхню Кулона-Мора, то:

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}, \quad \beta = \frac{6 \cdot c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}. \quad (3.72)$$

Граничну поверхню в області зсувних деформацій на інтервалі тисків  $\sigma > \sigma_0$ , згідно до [240], опишемо таким рівнянням:

$$f_2(\sigma, \tau) = (\sigma - \sigma_0)^2 / A^2 + \tau^2 / B^2 - 1 = 0, \quad (3.73)$$

де  $A = \sigma_1 - \sigma_0$ ,  $B = c + \alpha \cdot \sigma_0$  – коефіцієнти внутрішнього тертя полімерного матеріалу.

Так як ми описуємо полімерний матеріал під впливом напружень стиску і зсуву, то можна говорити про в'язке середовище, тоді  $\varphi = \pi/2$  і модель Кулона-Мора перетворюється на модель в'язкого середовища Ренкіна:

$$\alpha = 1/\sqrt{3}, \quad \beta = 0, \quad A = \sigma_1 - \sigma_0, \quad B = \sigma_0/\sqrt{3} \quad (3.74)$$

Тоді рівняння (3.70) та (3.73), з урахуванням виразів (3.74), перепишуться таким чином:

$$f_1(\sigma, \tau) = \tau - \sigma/\sqrt{3} = 0. \quad (3.75)$$

$$f_2(\sigma, \tau) = (\sigma - \sigma_0)^2 / (\sigma_1 - \sigma_0)^2 + 3 \cdot \tau^2 / \sigma_0^2 - 1 = 0. \quad (3.76)$$

Складність моделювання деформації полімерних матеріалів за межами пружності полягає у тому, що поверхні (3.75) або (3.76), при досягненні яких починається розвиватися пластична деформація, змінюються в процесі цієї

деформації. Крім того, під час пластичної деформації змінюється не тільки гранична поверхня, але й співвідношення між приростом зсувної і об'ємної частинами пластичної деформації. Через це моделювання пластичної деформації має передбачати визначення параметрів, які є функціями від накопиченої повної пластичної деформації (об'ємного стискання та зсувного руйнування).

В процесі пластичної деформації відбувається зміцнення полімерного матеріалу в результаті всебічного стиску. Згідно до [240] рівняння, які дозволяють описати зміну поверхні під час пластичної деформації, можна представити таким чином:

$$y(\gamma^{nl}) = y_0 \left[ 1 + h \cdot \left( 2\gamma^{nl} / \gamma^g - (\gamma^{nl} / \gamma^g)^2 \right) \right], \quad (3.77)$$

де  $h = \sigma / (\sigma_1 - \sigma_0)$  – коефіцієнт зміцнення матеріалу;  $2 \cdot \gamma^{nl} / \gamma^g$  – параметр, що враховує зміцнення матеріалу;  $(\gamma^{nl} / \gamma^g)^2$  – параметр, що враховує послаблення матеріалу;  $y(\gamma^{nl})$  – функція, що визначає зміну граничної поверхні в залежності від пластичної деформації зсуву  $\gamma^{nl}$ ;  $y_0$  – значення цієї функції на граничній поверхні, яка відповідає пружним напруженням;  $\gamma^g$  – критична пластична деформація, після досягнення якої починається послаблення матеріалу.

Кожного разу після досягнення критичної деформації необхідно змінювати параметри залежності (3.77), враховуючи той факт, що послаблення відбувається повільніше, чим зміцнення.

Вплив тиску на граничну пластичну деформацію полімерного матеріалу, який матеріал витримує до початку послаблення структури полімерного матеріалу, згідно з [233], визначається з такого рівняння:

$$\gamma^g = \gamma_0^g \cdot (1 + w \cdot \sigma / \sigma^g), \quad (3.78)$$

де  $\gamma_0^g$  – пластична деформація початку пластичного руйнування полімеру при відсутності ущільнення (гідростатичний тиск відсутній, тобто  $\sigma = 0$ );  $w$  та  $\sigma^g$  – критичне дотичне напруження, при якому матеріал починає руйнуватися, Па;  $w$  – параметр, який приймається рівним в межах діапазону від 0,5 до 1,5.

Рівняння (3.78) дозволяє описати перехід від в'язкопружної до пластичної деформації без ущільнення полімерного матеріалу (або у випадку, коли полімер був вже ущільнений, тобто орієнтований).

У зв'язку із низькою міцністю орієнтованих полімерів на розрив  $\sigma_h$  у поперечному до орієнтації напрямку, обмежимо граничну поверхню областю в'язкопружної деформації (3.67). Обмеження граничної поверхні дії руйнівних зсувних напружень згідно з [242, 243] визначимо з такого рівняння:

$$\sigma^g = \sigma^0 / 3 \cdot \left[ \left( \gamma^{nl} / \gamma^g \right)^2 - 1 \right], \quad (3.79)$$

Зміну міцності навантаженого протягом певного часу полімерного тіла визначимо за допомогою функції накопичення пошкоджень [244]

$$P(\sigma_{nm}, t) = \int \frac{(s - s_0)^2}{(s^h)^2 t} dt \quad \text{для } s > s_0, \quad (3.80)$$

де  $s$  – максимальне значення зі всіх компонентів девіатора тензора напружень  $s_{nm}$ ;  $s_0$  – значення напруження, при якому починається зміна форми полімерного тіла;  $t$  – час деформації полімеру.

З рівняння (3.77), використовуючи вираз (3.80), отримаємо рівняння, що описує зміцнення та послаблення полімеру, з врахуванням часу його обробки у валковому пристрої:

$$y(\gamma^{nl}) = y_0 \left[ 1 + h \cdot \left( 2\gamma^{nl} / \gamma^g - \left( \gamma^{nl} / \gamma^g \right)^2 \right) \right] \cdot \left[ 1 - \int \frac{(s - s_0)^2}{(s^h)^2 t} dt \right]. \quad (3.81)$$

Застосування отриманих вище співвідношень дозволяє розв'язувати задачі, що описують складний напружено-деформований стан, та досліджувати розвиток деформації і процесів руйнування за рахунок зниження міцності протягом певного періоду часу при постійному зовнішньому навантаженні.

Слід зауважити, що ущільнення, яке відбувається під час пластичної деформації, впливає на орієнтацію або переорієнтацію надмолекулярної структури полімерного матеріалу, але, в цьому випадку, матеріал буде послаблятися в поперечному до орієнтації напрямку. Вид функцій, що описують

зміцнення і руйнування полімерного матеріалу, підбирається, виходячи із даних відповідних експериментальних досліджень.

Згідно теорії течії матеріалів під дією навантажень [233] пластична деформація розвивається по нормалі до поверхні пластичного потенціалу. У випадку, якщо в рівняння пластичного потенціалу входить перший інваріант напружень (або гідростатичний тиск), то пластична деформація супроводжується зміною об'єму, якщо другий інваріант, то деформація супроводжується зміною форми полімерного тіла при зсуві.

Наведена вище математична модель процесу пластичної деформації полімерного матеріалу між валками перероблювального пристрою була розрахована за допомогою скінченнорізницевого методу [245]. Числове моделювання напружено-деформованого стану здійснювалося послідовними кроками протягом певного періоду часу при зміні навантаження. Для розрахунку навантаження за межами в'язкопружності була застосована процедура миттєвого приведення напружень до поверхні текучості [243, 244]. Приведення напружень здійснювалося з врахуванням часу релаксації.

Згідно схем розрахунків з використанням скінченнорізницевого методу, що наведені в роботах [173-176, 245], всі диференціальні рівняння та граничні умови записуються у скінченних різницях на сітці фіксованих комірок, що покриває область полімерного матеріалу. Час також розбивається на скінченне число інтервалів.

Через громіздкість наведемо тільки основні рівняння, що описують напружено-деформований стан в полімерному матеріалі. Перший етап розрахунків після визначення нових координат точок розрахункової схеми і знаходження повних приростів деформації полягає у попередньому розрахунку напружень за рівняннями теорії пружності. На кожному розрахунковому кроці приріст пластичної деформації буде пропорційним різниці між напруженнями, визначеними за рівняннями теорії пружності, і напруженнями, що відповідають граничній поверхні текучості. Позначимо попередньо розраховані напруження штрихом.

$$s_{nm}^{(k+1)'} = s_{nm}^{(k)} + \Delta s_{nm}^{(k+1)'}, \quad \sigma^{(k+1)'} = \sigma^{(k)} + \Delta \sigma^{(k+1)'}. \quad (3.82)$$

В просторі напружень напружений стан буде представлено у вигляді певної  $A$  точки з координатами  $(\sigma^{(k+1)'}, \tau^{(k+1)'})$ , де  $\tau^{(k+1)'}$  – інтенсивність дотичних напружень (рис. 3.6). Після цього перевіряємо, знаходиться ця точка  $A$  в середині граничної поверхні чи вийшла за її межі. Цим ми визначаємо, чи почав полімерний матеріал під впливом напружено-деформованого стану пластично деформуватися. Перевірка здійснюється підстановкою розрахованих за допомогою рівняння (3.82) значень напружень у вираз (3.70), що визначає граничну поверхню пружної деформації. У випадку, якщо вираз (3.70) після підстановки в нього значень напружень дасть результат, що менший або дорівнює нулю, то можна говорити, що полімерне тіло знаходиться в пружному стані і слід використовувати для розрахунку залежності, що описують пружну деформацію. Після чого знову визначаємо напруження, але вже на іншому інтервалі часу. У випадку, якщо результат, отриманий за рівнянням (3.64) буде більшим за нуль, то це означає, що точка  $A$  знаходиться за межами поверхні, що відповідає пружним деформаціям, а це означає, що полімер перебуває в пластичному стані і відбувається його зміцнення. У цьому випадку використовуємо залежності, що описують пластичне ущільнення полімеру.

Змоделюємо ущільнення полімеру в результаті його деформації в перероблювальному обладнанні.

Розміри полімерних відходів, що деформуються між валками перероблювального обладнання (рис. 3.5), та їх зміна залежать від конструктивних параметрів цього обладнання. Враховуючи рівняння (3.81), при деформації полімеру у валкових пристроях, що розглядаються, запишемо:

$$\xi = 1 - l_2/l_1 \cdot (h_2/h_1), \quad (3.83)$$

де  $l_1$ ,  $l_2$  – довжина, відповідно, до і після деформації полімеру, м;  $h_1$ ,  $h_2$  – товщина, відповідно, до і після деформації полімеру, м.

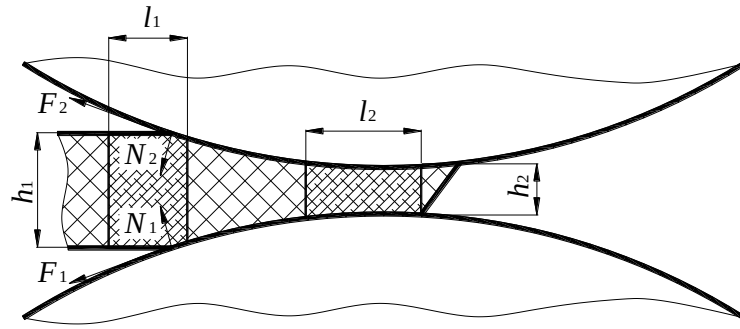


**Рис. 3.5. Деформація полімерного матеріалу між валками обладнання**

Виразивши відносну зміну розмірів певного об'єму полімеру через відносну деформацію стиску, що створюється робочими органами перероблювального обладнання, та підставивши ці вирази в рівняння (3.62) з урахуванням формули (3.83), отримаємо:

$$d\sigma = -K \cdot (1 - (1 + d\varepsilon_2) \cdot (1 - \nu \cdot d\varepsilon_2)), \quad (3.84)$$

де  $\varepsilon_2$  – деформація стиску;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона для певного полімеру.

Враховуючи рівняння (3.82), запишемо рівняння (3.84) в такому вигляді:

$$\sigma^{(k+1)} = -K \cdot (1 - (1 + \varepsilon_2^{(k+1)}) \cdot (1 - \nu \cdot \varepsilon_2^{(k+1)})) + \Delta\sigma^{(k+1)}, \quad (3.85)$$

де  $k$  – номер часового інтервалу, на які, згідно до гіпотези квазістаціонарності, розбивається весь процес деформації полімерного матеріалу [175, 245].

Граничні значення деформації стиску  $\varepsilon_2$  залежать від конструктивних параметрів робочих органів перероблювального обладнання та технологічних режимів процесу переробки полімерних відходів. При моделюванні пластичного ущільнення полімерних відходів для отримання певного діапазону значень максимального тиску, що створюється робочими органами в полімері, приймалися різні граничні значення деформації стиску. Для цього параметри обладнання варіювалися в таких межах: міжвалковий простір – від  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м до  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м; діаметр зубчастих валків та базовий діаметр валків профілю Рело – від 0,05 м до 0,2 м; ексцентриситет валків Рело приймався рівним  $(0,2 \dots 0,5) \cdot R_0$ , де  $R_0$  – базовий радіус валків; швидкість обертання валків – від  $0,001 \text{ с}^{-1}$  до  $0,01 \text{ с}^{-1}$ . Товщина полімерних відходів приймалася рівною від 0,001 м до 0,005 м (рис. 3.6).



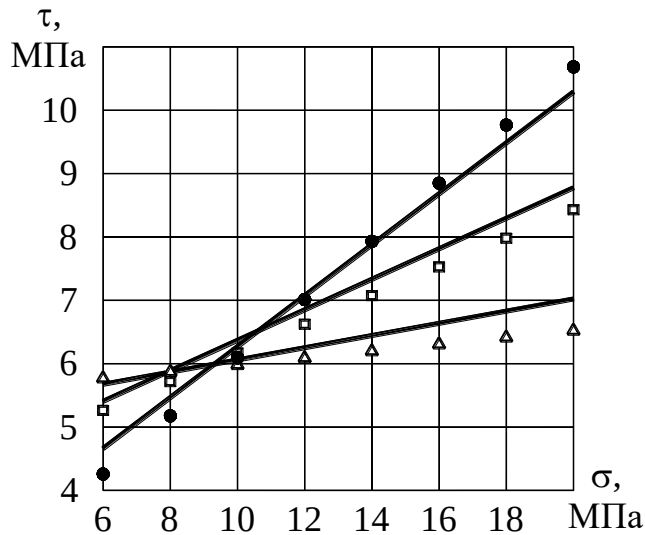


**Рис. 3.6. Залежність інтенсивності дотичних напружень від тиску, що створюється робочим органом в полімері; 1, 2, 3 – граничні поверхні, відповідно, для ПВХ, ПП та ПЕ;  $\Delta, \square, \bullet$  – точки з координатами  $(\sigma^{(k+1)}, \tau^{(k+1)})$ , визначеними числовим методом, відповідно, для ПЕ, ПП та ПВХ**

деформацію, тому ущільнення не відбувається.

У зв'язку з цим в дисертаційній роботі моделюється вплив на полімерний матеріал лише напружень зсуву, що створюються валками профілю Рело, як наслідок форма полімеру змінюється аж до його руйнування, при цьому об'єм лишається незмінним.

Відповідно до інкрементальної теорії пластичності, швидкість пластичної деформації пропорційна девіатору напружень, який є постійним:

$$e_{nm} = d\lambda \cdot s_{nm}, \quad (3.86)$$

де  $d\lambda$  – множник пропорційності в диференціальній формі.

Запишемо рівняння Ламе для плоского в'язкого середовища таким чином:

$$\partial\tau/\partial x = \mu \cdot \nabla^2 u; \quad \partial\tau/\partial y = \mu \cdot \nabla^2 v, \quad (3.87)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Ламе при чистому зсуві;  $u, v$  – компоненти вектора швидкості пластичної деформації, м/с;  $\tau$  – дотичні напруження, що викликають пластичну деформацію, Па.

З рис. 3.6 видно, що для різних полімерних матеріалів інтенсивність дотичних напружень різна і залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу. При цьому для поліпропілену (ПП) і поліетилену (ПЕ) координати точок не виходять за межі граничної поверхні в'язкопружної деформації, для полівінілхлориду (ПВХ) координати точок лежать на межі або трохи перевищують її, що не є значущим фактором. Отже, всебічний тиск, що створюються в полімері робочими органами перероблювального обладнання, викликає лише в'язкопружну

Враховуючи модель Кельвіна для в'язкопружних деформацій полімеру  $\tau = \mu \cdot t \cdot \partial \varepsilon / \partial t$  ( $\varepsilon$  – деформація полімеру), умову незмінності об'єму:

$$D = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y = 0, \quad (3.88)$$

де  $D$  – дивергенція швидкості пластичної деформації, та використовуючи гіпотезу квазістаціонарності, перепишемо рівняння (3.87) таким чином:

$$\partial \tau / \partial x = \eta \cdot \left[ \partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2 \right], \quad \partial \tau / \partial y = \eta \cdot \left[ \partial^2 v / \partial x^2 + \partial^2 v / \partial y^2 \right] \quad (3.89)$$

де  $\eta = \mu \cdot t$  – динамічна в'язкість полімерного матеріалу, Па·с.

Для визначення напруження зсуву  $\tau$  скористаємося рівнянням Пуассона:

$$\nabla^2 \tau = \partial^2 \tau / \partial x^2 + \partial^2 \tau / \partial y^2. \quad (3.90)$$

Диференціюючи перше і друге рівняння системи (3.89), відповідно, по  $x$  і  $y$  та підставляючи їх у рівняння (3.90), враховуючи рівняння (3.88), отримаємо рівняння Лапласа для напруження зсуву:

$$\nabla^2 \tau = -u \cdot \partial D / \partial x - v \cdot \partial D / \partial y + \eta \cdot \nabla^2 D = 0. \quad (3.91)$$

Отже, система рівнянь (3.89), рівняння (3.91) є основними рівняннями для визначення полів швидкості деформації та напружень зсуву. Додамо до них граничні умови в точках дотику полімеру з валками та умову нестисливості (3.88).

Наведена вище математична модель процесу пластичної деформації полімеру між валками перероблювального пристрою була розрахована за допомогою скінченнорізницевого методу, згідно з яким всі диференціальні рівняння та граничні умови записуються у скінченних різницях на сітці фіксованих комірок (рис. 3.7), що покриває область деформованого полімерного матеріалу. У результаті отримали таку систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} u_{i,j} &= 0,25 \cdot \left[ u_{i+1,j} + u_{i-1,j} + u_{i,j+1} + u_{i,j-1} - (\tau_{i+1,j} - \tau_{i,j}) \cdot h_g / \eta_{ij} \right] \\ v_{i,j} &= 0,25 \cdot \left[ v_{i+1,j} + v_{i-1,j} + v_{i,j+1} + v_{i,j-1} - (\tau_{i,j+1} - \tau_{i,j}) \cdot h_v / \eta_{ij} \right] \\ \tau_{i,j} &= 0,25 \cdot (\tau_{i+1,j} + \tau_{i-1,j} + \tau_{i,j+1} + \tau_{i,j-1}) \end{aligned} \right\} \quad (3.92)$$

де  $h$  – розмір комірки, м.

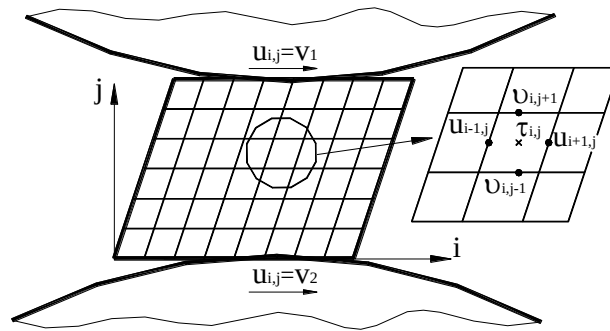


**Рис. 3.7. Сітка фіксованих комірок, що покриває область деформації полімеру між валками перероблювального обладнання**

З рис. 3.7 видно, що з часом горизонтальний розмір комірки  $h_g$  лишається постійним, а вертикальний розмір комірки  $h_v$  змінюється після кожного визначення полів швидкостей деформацій та напружень зсуву. Цю зміну можна врахувати таким чином:

$$h_v = h_g / [\cos(k \cdot \arctg[(v_1 - v_2)/h_2])], \quad (3.93)$$

де  $h_2$  – товщина затиснутого між валками полімерного матеріалу, м.

Вплив температури полімерного матеріалу на напружено-деформований стан, що створюється в ньому перероблювальним обладнанням, враховується рівнянням (3.58). Для визначення розповсюдження тепла в полімерному матеріалі, що передається від валків пристрою, скористаємося виразом, який описує зміну температури в деякому двовимірному просторі, тобто рівнянням теплопровідності [245]:

$$\partial T / \partial t = a^2 \cdot (\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2), \quad (3.94)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропроводності,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $T$  – температура досліджуваного середовища,  $^{\circ}\text{C}$ .

Запишемо рівняння (3.58) та (3.94) у формі скінченних різниць:

$$\begin{aligned} T_{i,j} &= 0,25 \cdot (T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1}) \\ \eta_{ij} &= \eta_0 \cdot \exp(U / RT_{ij}). \end{aligned} \quad (3.95)$$

Отже, наведені вище вирази в скінченнорізницевій постановці утворюють повну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення всіх невідомих

компонентів тензора напружень та деформацій. Для розв'язку таких систем доцільно використовувати ітераційні методи рішення, що враховують спеціальний вигляд таких систем і є зручними для реалізації на ЕОМ [245]. У цій роботі використовується ітераційний метод Лібмана [173, 175, 245] з проведенням послідовних релаксацій.

В результаті числового моделювання отримано розподіл дотичних напружень по площині полімерного зразка (рис. 3.8), які виникають внаслідок його деформації між валками профілю Рело.

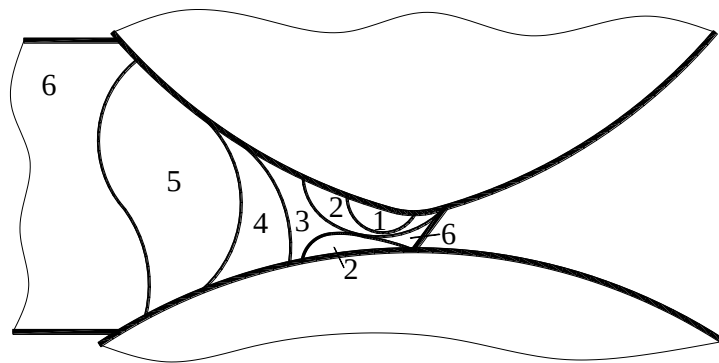


**Рис. 3.8. Розподіл дотичних напружень по площині поліпропіленового зразка внаслідок його деформації між валками профілю Рело:**

**1 – напруження зсуву  $\tau = 1,25$  МПа; 2 –  $\tau = 1,10$  МПа; 3 –  $\tau = 0,86$  МПа;  
4 –  $\tau = 0,62$  МПа; 5 –  $\tau = 0,50$  МПа; 6 –  $\tau = 0,35$  МПа**

З рис. 3.8 видно, що максимальні напруження зсуву виникають в області 1, яка граничить з верхнім валком. Це пояснюється тим, що в зазначеній області створюються максимальні швидкості деформацій. Отже, варіюючи конструктивними параметрами валків та технологічними параметрами перероблювального обладнання можна визначати раціональну конструкцію робочих органів обладнання та ефективні режими їх взаємодії із полімерними відходами.

За результатами числового моделювання отримано графіки, що пов'язують швидкість зсувних деформацій, створюваних робочими органами перероблювального обладнання, з дотичними напруженнями, що виникають в полімерному матеріалі (рис. 3.9, 3.10).

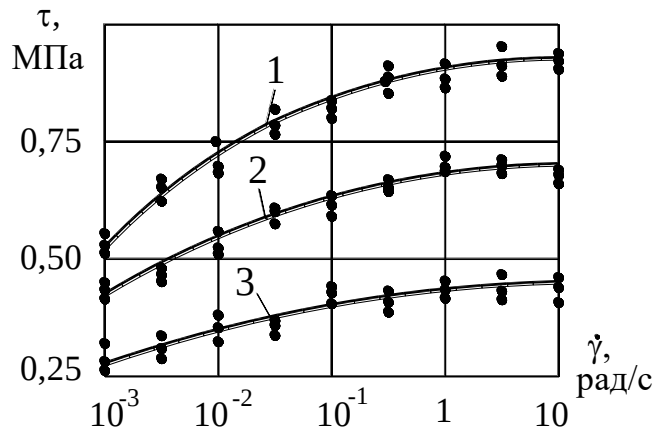


**Рис. 3.9. Залежність зсувного напруження від швидкості деформації поліетилену: 1 – при температурі  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$**

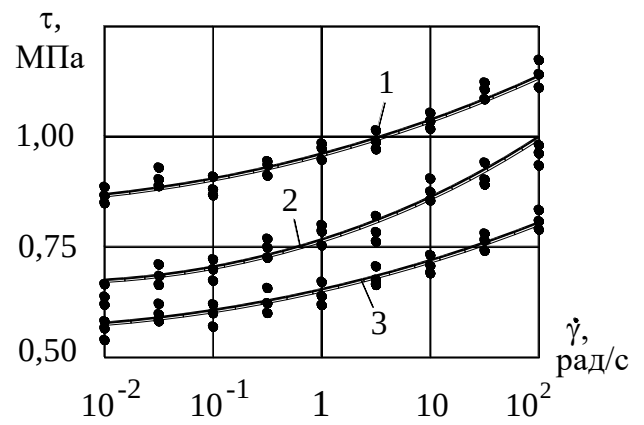


**Рис. 3.10. Залежність зсувного напруження від швидкості деформації поліпропілену: 1 – при тиску, що створюється валками,  $\sigma=5\text{ МПа}$ ; 2 –  $\sigma=3,5\text{ МПа}$ ; 3 –  $\sigma=2\text{ МПа}$**

З рис. 3.9, 3.10 видно, що в результаті збільшення швидкості деформації, яка визначається коловими швидкостями та радіусами валків, збільшується значення максимальних дотичних напружень в матеріалі. Водночас спостерігається суттєвий вплив на величину цих напружень температури матеріалу і тиску, що створюється валками.

#### **3.4. Експериментальні дослідження впливу режимів роботи обладнання на руйнування полімеру**

##### **3.4.1. Експериментальні дослідження впливу попередньої деформації полімеру на міцність в поперечному напрямку**

Випробування було проведено на дослідній установці (рис. Д.1, додаток Д), яка призначена для дослідження матеріалів на розтяг у широкому температурному діапазоні –  $20\ldots 200^{\circ}\text{C}$  [246]. Ця дослідна установка пройшла необхідну метрологічну атестацію.

Основною метою цих експериментальних досліджень є перевірка результатів, отриманих на основі розроблених в розділі 2 математичних моделей руйнування структури полімерного матеріалу на орієнтовані конгломерати витягнутих сферолітів. Тому, велике значення мають навантаження, що приводять до руйнування полімерних зразків у поперечному до попереднього витягування напрямку.

На першому етапі експериментального дослідження на згаданому вище вимірювальному пристрої розтягуємо полімерний зразок, перед тим нагрівши його до певної температури.

На другому етапі випробування знімаємо розтягнутий полімерний зразок, повертаємо його на  $90^0$  за годинниковою стрілкою і знову закріплюємо його в захватах. Після фіксації зразка розтягуємо його при певній температурі доти, доки він не зруйнується. В момент руйнування значення розривного навантаження та деформації реєструється. Визначивши площу перерізу в місці розриву зразка і, знаючи величину навантаження, що привело до розриву зразка, можна визначити напруження, при яких зв'язки між витягнутими конгломератами орієнтованих сферолітів руйнуються.

Навантаження, що діє на полімерний зразок під час його деформації, вимірюється динамометром. Деформація полімерного зразка, що відбувається під дією визначеного навантаження та при певній температурі, вимірюється за допомогою оптико-механічного приладу.

Точність вимірювання і реєстрації кривої навантаження-деформація становить: для навантаження – 1 % від максимального значення навантаження, а для деформації – 0,5 % від максимального значення деформації при заданому масштабі системи реєстрації кривої. Для дослідження впливу температури полімерного матеріалу на його міцність використовувалася термічна камера.

Згадана вище вимірювальна установка дозволяє змінювати в широких межах навантаження розтягу і температуру нагрівання полімерного зразка, що дає можливість дослідити вплив ступеня попереднього витягування та температури полімерного матеріалу на фізико-механічні властивості в

поперечному до попереднього витягування напрямку. Технічна характеристика установки представлена в табл. Д.1 (додаток Д).

Вибір міцності на розрив, як досліджуваного параметра, пояснюється тим, що навантаження, які руйнують полімерні матеріали, прикладені поперек попередньо орієнтованої структури матеріалу, є значно меншими за навантаження, прикладені до неорієнтованого полімеру. Визначення граничних деформацій попереднього розтягу і руйнівних напружень в поперечному до попередньої деформації напрямку дозволить проектувати енергоефективні пристрої для переробки полімерних відходів.

Експериментальні дослідження впливу деформації попереднього розтягу та температури на міцність при розриві полімерного зразка в поперечному до витягування напрямку проводилися за факторним планом другого порядку Бокса. Визначення напруження  $\sigma_2$ , що передусь руйнуванню полімерного зразка при різних значеннях деформації попереднього розтягу та температури проводились на рівнях варіювання та з інтервалами, які наведені в табл. Д.2 (додаток Д). В кожному досліді проводили чотири паралельних виміри.

Полімерні матеріали, з яких виготовлені зразки для випробування, та характеристика їх властивостей наведені в таблиці 2.1 (розділ 2). Вихідні довжина, ширина і товщина всіх полімерних зразків є однаковими і становлять, відповідно, 45 мм, 8 мм і 2 мм.

Матриця плану для композиційного ротатбельного планування другого порядку наведена в табл. Е.1 (додаток Е). Після реалізації робочої матриці, при чотирьох паралельних дослідях, ми отримали значення розривної міцності полімерного зразка в поперечному до попереднього розтягу напрямку для зразків, виготовлених із поліпропілену, поліетилену та полівінілхлориду (додаток Е, табл. Е. 2-Е 4).

Аналіз результатів досліджень здійснювався за допомогою критерію Кохрена аналогічно до [218]. Порівнюючи розрахований критерій Кохрена для результатів випробування зразків з поліетилену, поліпропілену та полівінілхлориду з його табличним значенням ( $0,15 < 0,32$ ,  $0,16 < 0,32$ ,

0,14 < 0,32), можна стверджувати з 95%-ою надійною ймовірністю, що всі дисперсії помилок однорідні [220].

Коефіцієнти рівняння регресії ми отримали за допомогою матричного методу [220]. Розраховані значення коефіцієнтів регресії наведені у табл. Е.5 (додаток Е). Підставляючи значення коефіцієнтів у вираз (2.145), отримаємо такі рівняння регресії:

– для поліпропіленових зразків:

$$y_{\text{пп}}(x_1, x_2) = 18,16 - 4,53 \cdot x_1 - 3,79 \cdot x_2 + 1,94 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,62 \cdot x_1^2 + 0,14 \cdot x_2^2; \quad (3.96)$$

– для поліетиленових зразків:

$$y_{\text{пе}}(x_1, x_2) = 12,95 - 3,23 \cdot x_1 - 2,66 \cdot x_2 + 0,63 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,18 \cdot x_1^2 + 0,83 \cdot x_2^2; \quad (3.97)$$

– для зразків з полівінілхлориду:

$$y_{\text{пвх}}(x_1, x_2) = 5,64 - 0,28 \cdot x_1 - 0,33 \cdot x_2 - 0,03 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,24 \cdot x_1^2 + 0,04 \cdot x_2^2. \quad (3.98)$$

Перевірка значущості коефіцієнтів рівняння регресії проводилася аналогічно до [218]. Порівняння абсолютної величини коефіцієнтів і відповідних довірчих інтервалів показало, що всі коефіцієнти статистично значимі, і тому рівняння регресії (3.96)-(3.98) не спрощуються.

Адекватність отриманого рівняння регресії реальним процесом перевірялася за допомогою критерію Фішера (2.154). Порівнюючи знайдений критерій Фішера з табличним ( $2,15 < 9,10$  – при випробуванні поліпропіленових зразків;  $5,65 < 9,10$  – при випробуванні поліетиленових зразків і  $7,5 < 9,10$  – при випробуванні зразків з полівінілхлориду), при вибраній надійній ймовірності, можна стверджувати, що рівняння регресії (3.96)-(3.98) є адекватними з 95%-ою надійною ймовірністю [221].

Для одержання натуральних рівнянь підставимо значення кодованого фактора  $X$ , згідно з виразом (2.146), у рівняння (3.96)-(3.98), в результаті цього отримаємо функції залежності міцності зразків з поліпропілену, поліетилену та полівінілхлориду при поперечному розтягу від температури  $T$  і деформації попереднього розтягу  $\varepsilon_1$ .



Функції залежності міцності зразків поперек напрямку попереднього розтягу такі:

– для поліпропілену

$$\sigma_{12}^{\text{пп}} = 18,16 - 4,39 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) - 0,14 \cdot (T - 70) + 0,06 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) \cdot (T - 70) - 0,75 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5)^2 + 0,001 \cdot (T - 70)^2; \quad (3.99)$$

– для поліетилену

$$\sigma_{12}^{\text{пе}} = 12,95 - 3,23 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) - 0,09 \cdot (T - 70) + 0,02 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5) \cdot (T - 70) - 0,18 \cdot (\varepsilon_1 - 1,5)^2; \quad (3.100)$$

– для полівінілхлориду

$$\sigma_{12}^{\text{пвх}} = 5,64 - 0,7 \cdot (\varepsilon_1 - 0,6) - 0,02 \cdot (T - 110) - 0,004 \cdot (\varepsilon_1 - 0,6) \cdot (T - 110) - 1,5 \cdot (\varepsilon_1 - 0,6)^2. \quad (3.101)$$

Отримані рівняння дозволяють описати процес руйнування орієнтованої структури полімерного матеріалу в поперечному до цієї орієнтації напрямку залежно від деформації попереднього розтягу та температури матеріалу. Ці залежності можна використовувати при розрахунках конструктивних та технологічних параметрів обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості.

На рис. 3.11 зображені графіки залежності міцності поліпропілену, поліетилену та полівінілхлориду в поперечному напрямку до орієнтації структури полімерів від деформації попереднього розтягу  $\varepsilon_1$  та температури  $T$ . Наведені на рисунках функціональні залежності представляють результати аналітичних та експериментальних досліджень розривної міцності полімеру.

Із представлених графіків видно, що отримані аналітичні (3.50) та регресійні (3.99)-(3.101) залежності розривної міцності поліпропілену, поліетилену та полівінілхлориду поперек орієнтації його структури від деформації попереднього розтягу та температури задовільно узгоджуються (відносне відхилення експериментальних значень від теоретичних не перевищує 14%). Цей факт підтверджує правомірність використання моделі для дослідження напружено-деформованого стану полімеру під час дії на нього робочих органів перероблювального обладнання.

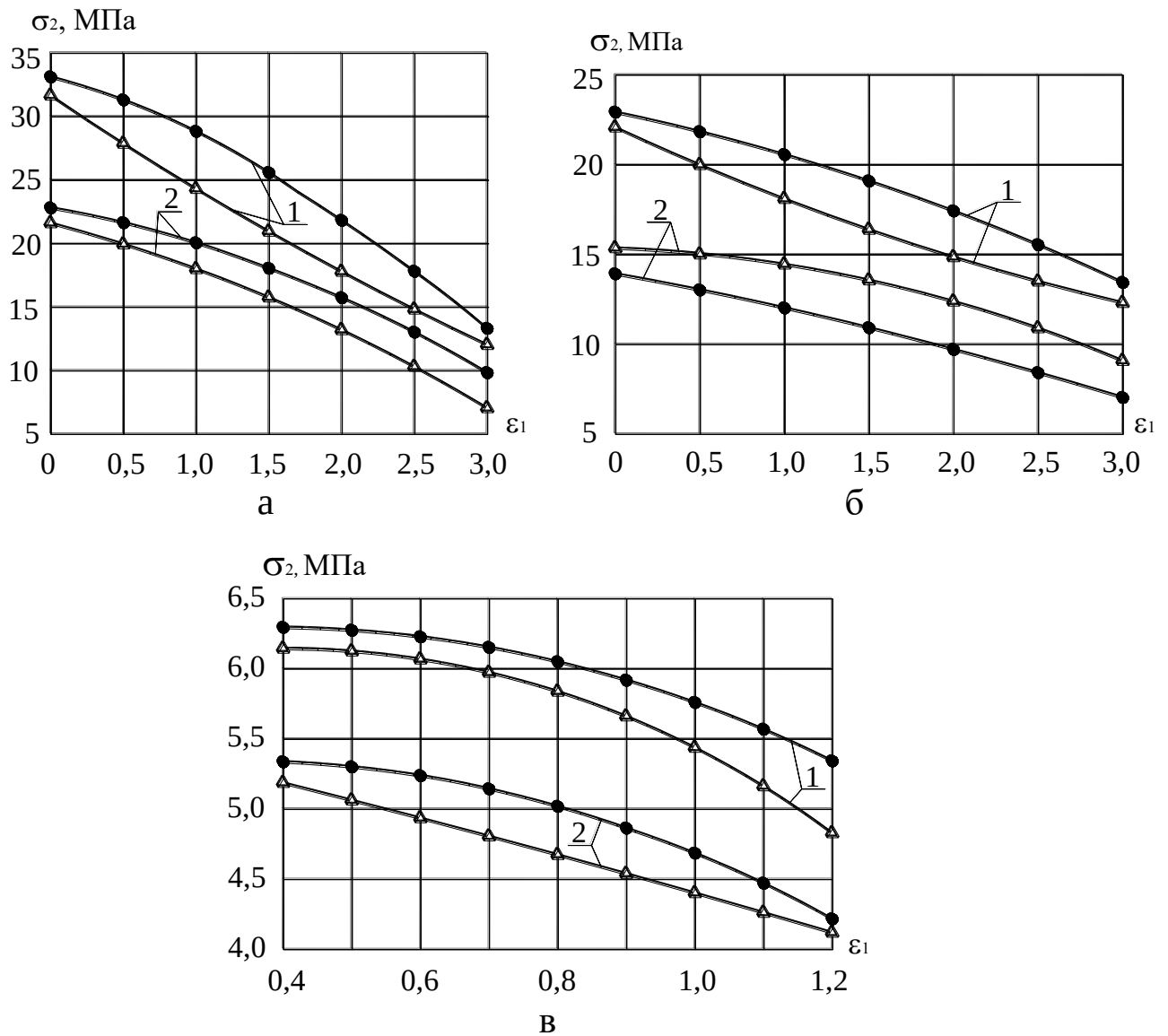


**Рис. 3.11.** Залежності міцності поліпропіленового (а), поліетиленового (б) зразка та зразка з полівінілхлориду (в) поперек напрямку деформації попереднього розтягу від цієї деформації: 1 – температура нагрівання  $T=50^\circ\text{C}$ ; 2 – температура нагрівання  $T=100^\circ\text{C}$ ;  $\bullet$  – апроксимація експериментальних даних;  $\triangle$  – аналітичні залежності

### **3.4.2. Експериментальні дослідження впливу швидкості деформації на міцність при розтягу**

З метою встановлення зв'язку між конструктивними параметрами робочих органів перероблювального обладнання і технологічними режимами процесу переробки полімерних відходів проводилися експериментальні дослідження впливу швидкості деформації розтягу полімерних зразків на величину руйнівного напруження. Визначення граничних швидкостей деформацій розтягу і відповідних їм руйнівних напружень дозволить розраховувати раціональні конструктивні та ефективні технологічні параметри обладнання для переробки полімерних відходів на частинки із анізотропією фізико-механічних властивостей. Це дасть можливість проектувати енергоефективне обладнання для переробки полімерних відходів з їх подальшим використанням як сировини при виробництві виробів легкої промисловості.

Випробування проводилися на дослідній установці (рис. Д.1, додаток Д), яка призначена для визначення міцності матеріалів при розтягу в широкому температурному діапазоні.

Установка для випробовування полімерних зразків на міцність при розтягу створена на базі РМ-30 і складається з механізму для розтягу із заданою сталою швидкістю, системи контролю та підтримки певної температури в камері із полімерним зразком та системи автоматичної реєстрації вимірюваних даних (навантаження та деформації) на ЕОМ. Основні її технічні характеристики наведені в табл. Д.1 (додаток Д).

Експериментальні дослідження впливу швидкості деформації та температури на міцність при розриві зразків із полівінілхлориду проводилися на рівнях варіювання, які наведені в табл. 3.1. В кожному досліді проводили чотири паралельних виміри. Для побудови залежностей в логарифмічних координатах після кожного виміру знаходився десятковий логарифм. Дослідження впливу швидкості деформації розтягу, що створюється в полімері, на його міцність проводилися за однофакторними планами в логарифмічних координатах.

Таблиця 3.1

Рівні варіювання факторів при дослідженні впливу швидкості  
деформації та температури на міцність при розриві

| Позн. | Номер дослідку<br>Фактори  | 1         | 2                 | 3         | 4                 | 5         | 6                 | 7         | 8                 |
|-------|----------------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
| $T$   | Температура, °C            | 20        |                   |           |                   |           |                   |           |                   |
| $\nu$ | Швидкість деформації, см/с | $10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ | $10^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-2}$ | $10^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-1}$ |
| $T$   | Температура, °C            | 50        |                   |           |                   |           |                   |           |                   |
| $\nu$ | Швидкість деформації, см/с | $10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ | $10^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-2}$ | $10^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-1}$ |
| $T$   | Температура, °C            | 80        |                   |           |                   |           |                   |           |                   |
| $\nu$ | Швидкість деформації, см/с | $10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ | $10^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-2}$ | $10^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-1}$ |

Для отримання точної однофакторної моделі використовувався алгебраїчний поліном другого порядку [220]:

$$\lg \sigma = b_0 + b_1 \cdot \lg \nu + b_2 \cdot (\lg \nu)^2, \quad (3.102)$$

де  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – коефіцієнти рівняння регресії;  $\lg \sigma$  – десятковий логарифм руйнівного напруження розтягу;  $\lg \nu$  – десятковий логарифм швидкості деформації.

Порядок зазначеного полінома визначався методом різниць [220]. Експериментальні дослідження проводились на восьми рівнях фактора (табл. Ж.1, додаток Ж), на кожному з яких проводилось по чотири виміри. Одержані результати, а також проміжні дані для розрахунку критеріїв Кохрена та Фішера наведені в табл. Ж.2 (додаток Ж).

Після визначення максимальної величини помилки в кожному досліді та порівняння її з допустимою, яка на практиці не повинна перевищувати 5% [221], було встановлено, що прийняте число повторних спостережень є достатнім для необхідної точності проведення експерименту.

З метою перевірки дисперсій помилок на однорідність, відповідно до [218, 220], розраховувався критерій Кохрена:

$$G_{розр} = s_{\max}^2 / \sum_{i=1}^N s_i^2 = 0,2/0,65 = 0,3.$$

Розрахункове значення критерію менше за табличне  $G_{табл} = 0,32$  [221], тому всі дисперсії похибок однорідні.

Коефіцієнти рівняння регресії знаходилися за допомогою матричного методу [220]. Значення коефіцієнтів наведені у таблиці Ж.3 (додаток Ж).

Після підстановки значень коефіцієнтів у рівняння (3.102) були отримані рівняння регресії при різній температурі зразка від швидкості деформації:

– температура  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\lg \sigma = 1,478 + 0,243 \cdot \lg \nu - 0,003 \cdot (\lg \nu)^2; \quad (3.103)$$

– температура  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\lg \sigma = 1,183 + 0,321 \cdot \lg \nu - 0,004 \cdot (\lg \nu)^2; \quad (3.104)$$

– температура  $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\lg \sigma = 0,434 + 0,152 \cdot \lg \nu + 0,008 \cdot (\lg \nu)^2. \quad (3.105)$$

Перевірка значущості коефіцієнтів рівняння регресії проводилася аналогічно до [218, 220]. Порівняння абсолютної величини коефіцієнтів і відповідних довірчих інтервалів показало, що коефіцієнти при  $(\lg \nu)^2$  є статистично не значимі, і тому рівняння регресії (3.103)-(3.105) можна спростити:

– температура  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\lg \sigma = 1,478 + 0,243 \cdot \lg \nu; \quad (3.106)$$

– температура  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\lg \sigma = 1,183 + 0,321 \cdot \lg \nu; \quad (3.107)$$

– температура  $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\lg \sigma = 0,434 + 0,152 \cdot \lg \nu. \quad (3.108)$$

Адекватність отриманого рівняння регресії реальним процесам перевірялася за допомогою критерію Фішера (2.154). Порівнюючи знайдений критерій Фішера з табличним ( $4,43 < 9,10$ ), при вибраній надійній ймовірності, можна стверджувати, що рівняння регресії (3.106)-(3.108) є адекватним з 95%-ою надійною ймовірністю [221].

Отримані рівняння (3.106)-(3.108) дозволяють визначати залежність граничної міцності полімерних відходів від швидкості їх деформації при різних

значеннях температури, що може бути використане під час проектування робочих органів перероблювального обладнання та визначення енергоефективних режимів процесу переробки.

На рис. 3.12 зображені графіки залежності міцності полівінілхлориду від швидкості деформації розтягу  $v$  та температури  $T$ .

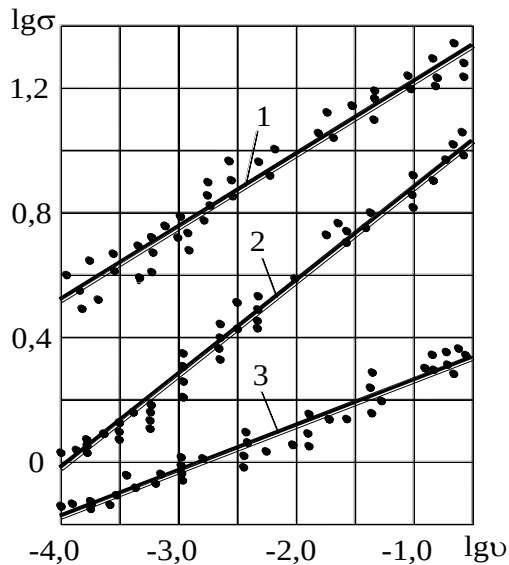


**Рис. 3.12. Залежність руйнівного напруження від швидкості розтягу полівінілхлориду: 1 –  $T=20^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T=50^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T=80^\circ\text{C}$**

З рис. 3.12 видно, що внаслідок зростання швидкості деформації зразка з полівінілхлориду збільшується величина руйнівного напруження. Це пояснюється тим, що за такий короткий проміжок часу рівноважна деформація не може розвинути, тому що ланцюги макромолекул не встигають переходити по потенціальних ямах, в результаті в'язкопружний модуль значно перевищує рівноважний модуль, через що руйнування відбувається при більших напруженнях.

### 3.4.3. Експериментальні дослідження впливу граничної деформації попереднього розтягу на деформацію в поперечному напрямку

Важливе значення для проектування перероблювального обладнання має гранична деформація попередньої орієнтації структури полімерного матеріалу. З метою встановлення зв'язку між руйнівною деформацією в поперечному напрямку до орієнтації полімеру і деформацією попереднього розтягу полімерного матеріалу проводилися експериментальні дослідження на дослідній установці 2167 Р-50, яка призначена для випробування пластмас (рис. И.1, додаток И). Технічні характеристики установки наведені в табл. И.1 (додаток И). Полімерні зразки виготовлялися з поліетилену та поліпропілену.



Дослідження впливу деформації попереднього розтягу на руйнівні деформації в поперечному до розтягу напрямку проводилися за однофакторними планами. Експериментальні дослідження проводились на восьми рівнях фактора, на кожному з яких проводилось по чотири виміри.

Для отримання точної однофакторної моделі використовувався алгебраїчний поліном другого порядку [220]:

$$\varepsilon = b_0 + b_1 \cdot \varepsilon_1 + b_2 \cdot \varepsilon_1^2, \quad (3.109)$$

де  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – коефіцієнти рівняння регресії;  $\varepsilon$  – деформація в поперечному до попереднього розтягу напрямку;  $\varepsilon_1$  – гранична деформація попереднього розтягу.

Одержані результати, а також проміжні дані для розрахунку критеріїв Кохрена та Фішера, наведені в табл. К.1-К.2 (додаток К). Після визначення максимальної величини помилки в кожному досліді та порівняння її з допустимою, яка на практиці не повинна перевищувати 5% [221], було встановлено, що прийняте число повторних спостережень є достатнім для необхідної точності проведення експерименту.

З метою перевірки дисперсій помилок на однорідність, відповідно до [218, 220], розраховувався критерій Кохрена, який є меншим за його табличне [221] значення ( $0,31 < 0,32$ ), тому всі дисперсії похибок однорідні.

Коефіцієнти рівняння регресії знаходилися за допомогою матричного методу [220]. Значення коефіцієнтів наведені у таблиці К.3 (додаток З).

Після підстановки значень коефіцієнтів у рівняння (3.109) були отримані такі рівняння регресії:

– швидкість руйнівної деформації розтягу  $v_2 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м/с:

$$\varepsilon_2^{(1)} = 1,483 + 0,146 \cdot \varepsilon_1 + 0,216 \cdot \varepsilon_1^2; \quad (3.110)$$

– швидкість руйнівної деформації розтягу  $v_2 = 3,0 \cdot 10^{-3}$  м/с:

$$\varepsilon_2^{(2)} = 1,457 + 0,078 \cdot \varepsilon_1 + 0,158 \cdot \varepsilon_1^2; \quad (3.111)$$

– швидкість руйнівної деформації зрізу  $v_2 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м/с:

$$\varepsilon_{12}^{(1)} = 0,437 + 0,198 \cdot \varepsilon_1 + 0,128 \cdot \varepsilon_1^2; \quad (3.112)$$

– швидкість руйнівної деформації зрізу  $v_2 = 3,0 \cdot 10^{-3}$  м/с:



$$\varepsilon_{12}^{(2)} = 0,228 + 0,163 \cdot \varepsilon_1 + 0,174 \cdot \varepsilon_1^2. \quad (3.113)$$

Перевірка значущості коефіцієнтів рівняння регресії проводилася аналогічно до [218, 220]. Порівняння абсолютної величини коефіцієнтів і відповідних довірчих інтервалів показало, що всі коефіцієнти статистично значимі, і тому рівняння регресії (3.110)-(3.113) не спрощується.

Адекватність отриманого рівняння регресії реальним процесам перевірялася за допомогою критерію Фішера (2.154). Порівнюючи знайдений критерій Фішера з табличним ( $6,51 < 9,10$ ), при вибраній надійній ймовірності, можна стверджувати, що рівняння регресії (3.110)-(3.113) є адекватним з 95%-ою надійною ймовірністю [221].

Отримані рівняння регресії дозволяють визначати руйнівні деформації розтягу та зсуву в поперечному напрямку до орієнтації полімеру залежно від його попередньої деформації розтягу.

Експериментальні дослідження впливу деформації попереднього розтягу на граничну деформацію розтягу та зсуву в поперечному напрямку показали, що збільшення деформація попереднього розтягу полімерного матеріалу приводить до збільшення значень руйнівних деформацій у поперечному напрямку (рис. 3.13, 3.14).

В результаті проведених експериментальних досліджень визначено ефективні значення граничної деформації попереднього розтягу, які становлять: для поліетилену  $\varepsilon_1 = 1,3$ ; для поліпропілену  $\varepsilon_1 = 1,2$ ; для полівінілхлориду  $\varepsilon_1 = 0,32$ . При таких значеннях граничної деформації попереднього розтягу поліетилену руйнівна деформація в поперечному напрямку збільшується на 18 %, а величина руйнівного напруження зменшується на 10 %.

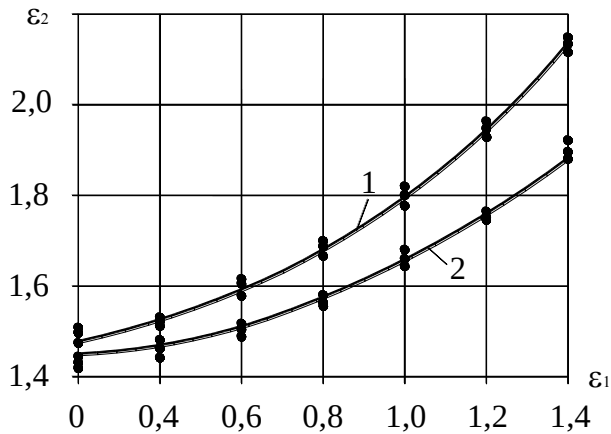


**Рис. 3.13. Графіки залежності руйнівної деформації розтягу для поліетилену від попереднього розтягу: 1 – швидкість розтягу  $v_1 = v_2 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м/с; 2 –  $v_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $v_2 = 3,0 \cdot 10^{-3}$  м/с**

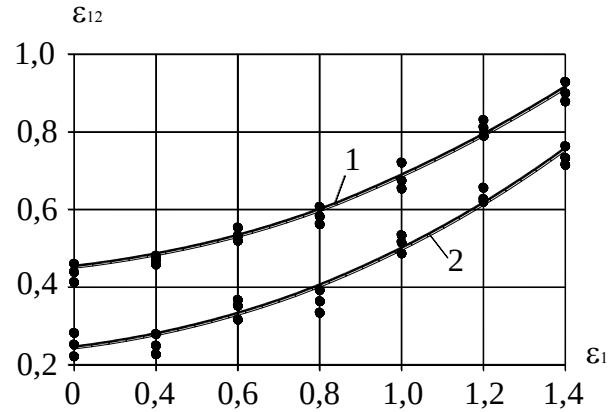
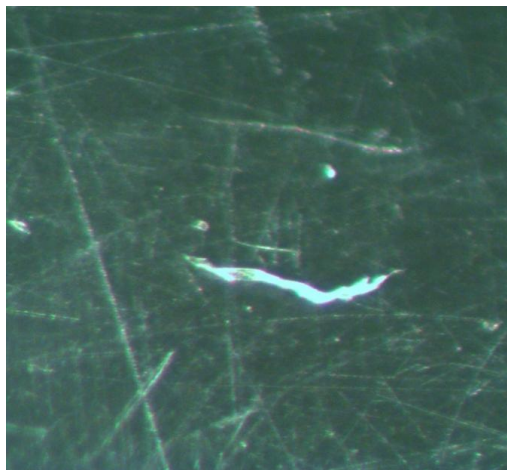
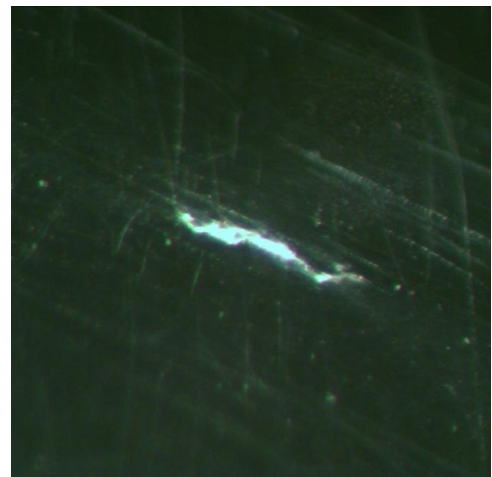


**Рис. 3.14. Графіки залежності руйнівної деформації зсуву для поліетилену від попереднього розтягу: 1 – швидкість розтягу  $v_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м/с; швидкість зрізу  $v_2 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м/с; 2 –  $v_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $v_2 = 3,0 \cdot 10^{-3}$  м/с**

На рис. 3.15 наведені мікрофотографії розривів при деформації полімерів, що з'являються в аморфній області між кристалітами.



**а**



**б**

**Рис. 3.15. Утворення розривів в поліетилені:  
а – неорієнтована структура; б – орієнтована структура**

З рис. 3.15 видно, що під час поперечної деформації попередньо розтягнутої структури полімеру в аморфній області між орієнтованими кристалітами виникають розриви, які мають вигляд прямої лінії (рис. 3.15 а), що збільшується вздовж орієнтації структури полімеру. Якщо структура не

орієнтована (рис. 3.15 б), то розриви мають вигляд хвилястої лінії, внаслідок цього руйнування полімеру є некерованим, що вимагає значно більших зусиль, ніж під час поперечного руйнування попередньо розтягнутого полімеру, а це, в свою чергу, призводить до більших витрат енергії перероблювальним обладнанням.

### **Висновки до розділу 3**

1. Вперше розроблено математичну модель напружено-деформованого стану полімеру при дії на нього робочих органів перероблювального обладнання та температури, на основі якої запропонований метод визначення граничних значень в'язкопружної деформації полімерного матеріалу, що можна використовувати для розрахунку дотичних і нормальних напружень, які необхідно забезпечити перероблювальному обладнанню для руйнування полімерних відходів.

2. Запропоновано модель пластичної деформації полімерного матеріалу в міжвалковому просторі перероблювального обладнання в умовах стиску і зсуву, на основі якої встановлено, що всебічний тиск, який створюється в полімері робочими органами перероблювального обладнання, викликає лише в'язкопружну деформацію, а тому пластичного ущільнення матеріалу в процесі його руйнування не відбувається.

3. В результаті числового моделювання пластичної деформації полімерних відходів між валками профілю Рело отримано розподіл дотичних напружень по площині полімерного матеріалу, за яким побудовано графічні залежності напруження від швидкості деформації, яка визначається коловими швидкостями та радіусами валків.

4. Вперше експериментально отримані залежності, що пов'язують навантаження, яке необхідно створити робочими органами перероблювального обладнання для руйнування полімерних відходів, з деформацією попереднього розтягу і температурою цих відходів та швидкістю руйнівної деформації.

5. Вперше проведено експериментальні дослідження впливу деформації попереднього розтягу на граничні деформації розтягу та зсуву в поперечному напрямку, які показали, що збільшення деформації попереднього розтягу приводить до збільшення руйнівних деформацій та зменшення руйнівних напружень у поперечному напрямку. Цей факт дозволяє не враховувати орієнтацію структури полімерних відходів перед їх обробкою. Орієнтація або переорієнтація структури здійснюється на пристрої із зубчастими валками, після цього відходи з однаково орієнтованою структурою руйнуються на пристрої із валками профілю Рело.

6. Вперше експериментально отримано мікрофотографії розривів при деформації полімерів, відповідно до яких підтверджено гіпотезу руйнування полімеру по границям між кристалічними областями. Під час поперечної деформації попередньо розтягнутої структури полімеру в аморфній області між орієнтованими кристалітами виникають розриви, які мають вигляд прямої лінії, що зростає вздовж орієнтації структури полімеру. Якщо структура не орієнтована, то розриви мають вигляд хвилястої лінії, внаслідок цього руйнування полімеру є некерованим, що вимагає значно більших зусиль, а це, в свою чергу, призводить до більших витрат енергії перероблювальним обладнанням.

## РОЗДІЛ 4

### ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ

#### 4.1. Загальні положення

Велику кількість робіт [4-8, 40, 80, 83, 87, 89, 90, 93, 94] присвячено розробці обладнання для переробки полімерних відходів, однак у них не враховувалася зміна фізико-механічних характеристик полімерного матеріалу у процесі деформації. Для проектування обладнання для такого процесу ми розробили математичні моделі [200, 202, 214, 215, 247], які дозволяють простежити за змінами фізико-механічних характеристик полімерного матеріалу при різних видах напружено-деформованого стану, які генеруються обладнанням у процесі переробки полімерних відходів. Це дає можливість забезпечити необхідні навантаження в певній послідовності, що дозволить перероблювати відходи полімерних матеріалів на частинки з орієнтованою структурою при мінімальних енергетичних витратах.

Як відомо з робіт [202, 215, 216], якщо впливати на полімерний матеріал певним навантаженням, то можна домогтися зміни його структури, забезпечивши, тим самим, анізотропію фізико-механічних властивостей полімеру. У результаті цього полімерний матеріал буде мати максимальну міцність в одному напрямку і мінімальну – в іншому. Прикладаючи навантаження в напрямку мінімальної міцності полімеру, можна домогтися зменшення витрат енергії перероблювальним пристроєм для руйнування полімерних відходів.

Аналіз наявних пристроїв для подрібнення полімерних відходів [4-8, 40, 80, 87, 93, 94] показав, що для забезпечення в полімерному матеріалі складного напружено-деформованого стану, при якому матеріал зруйнується на частинки з орієнтованою структурою, необхідно послідовно створити в полімері розтягувальних, стискальних і зсувних деформацій, при яких відбудеться необхідна зміна його структури, а отже й фізико-механічних властивостей. Для

цього перероблювальне обладнання повинно включати вузли (пристрої), які у певній послідовності забезпечують створення згаданих вище деформацій, тобто спочатку створюють граничні деформації розтягу та стиску для максимальної орієнтації структури полімеру, після цього – руйнівних деформацій зсуву, при яких забезпечується деструкція полімерного матеріалу в аморфних областях між орієнтованими конгломератами кристалічних областей.

В дисертаційній роботі запропоновано конструкцію обладнання для переробки полімерних відходів, яке включає в себе три основних вузли: валковий зубчастий пристрій; валковий пристрій із криволінійною поверхнею; голкофрезовий пристрій [247, 248].

Моделювання процесу руйнування полімерного матеріалу дозволяє отримати вихідні дані (граничні деформації, при яких забезпечується орієнтація структури полімеру, руйнівні деформації, при яких забезпечується його деструкція, та відповідні напруження) для проектування зазначених вище пристроїв. Це дає можливість, по-перше, розробляти енергоефективне перероблювальне обладнання, по-друге, перероблювати полімерні відходи на частинки заданої форми та розмірів, наприклад, отримувати витягнуті частинки з орієнтованою структурою, а отже, й з анізотропією фізико-механічних властивостей.

Частинки полімерного матеріалу з орієнтованою структурою можна, подібно до полімерних волокон, використовувати як армувальні елементи при отриманні полімерних виробів легкої промисловості, таких як деталі низу взуття, бокові стінки валіз, різноманітну фурнітуру та інші вироби.

Відомо, що полімерні матеріали мають широкий діапазон властивостей. У звичайному стані полімер має ізотропну структуру надмолекулярних утворень, що містяться в аморфній матриці з прохідних фібрил [160, 162, 178, 192, 194].

При проходженні полімерного матеріалу між зубчастими валками його структура змінюється. В результаті впливу розтягувальних навантажень надмолекулярні утворення (сфероліти та інші кристалічні області) витягуються та переміщуються, внаслідок цього структура полімерного матеріалу орієнтується. Вплив стискаючих навантажень приводить до поперечного розтягу

полімеру, в результаті якого вздовж орієнтованої структури полімеру утворюються мікророзриви між витягнутими конгломератами кристалічних областей полімеру, а на вершинах зубців утворюються поперечні розриви дископодібної форми, тобто структура полімерного матеріалу частково послабляється [249].

Беручи до уваги той факт, що напруження, які необхідні для руйнування кристалічних елементів (сферолітів та інших), на два порядки перевищують напруження, які необхідні для руйнування аморфної області (прохідних фібрил), можна говорити про значну економію енергії при руйнуванні полімерів у розробленому нами пристрої.

Після обробки на пристрої із зубчастими валками полімерні відходи із послабленою структурою необхідно пропустити між валками з криволінійною поверхнею. Для зручності розрахунків і контролю основних параметрів цих валків, а також для спрощення їх виготовлення, як валки з криволінійною поверхнею пропонуємо використовувати валки із поверхнею трикутника Рело. Після обробки полімерного зразка між валками профілю Рело в результаті дії напружень зсуву в аморфній області цього зразка між орієнтованими конгломератами витягнутих кристалітів виникають значно більші за розмірами розриви, так звані магістральні розриви, швидкість зростання яких різко збільшується при незначному збільшенні навантаження.

Для повного руйнування та відокремлення фрагментів полімерних відходів, перероблених між валками профілю Рело, слід пропустити їх через голкофрезовий пристрій, який за допомогою голок при частоті обертання голкофрези від  $500 \text{ хв}^{-1}$  до  $800 \text{ хв}^{-1}$  створить у вершинах магістральних розривів напруження, що значно перевищують середні значення напружень, в результаті чого розриви проростуть через весь переріз зразка, що остаточно зруйнує його на частинки з анізотропною структурою; витрати енергії при цьому будуть мінімальними.

#### 4.2. Розрахунок та проектування зубчастого валкового пристрою

При розрахунку основних параметрів неперервного процесу переробки полімерних відходів в зубчастих валках можуть зустрічатися два типи задач: при заданих геометричних розмірах валків та швидкостях обертання необхідно визначити продуктивність; при заданій продуктивності необхідно визначити раціональні геометричні розміри зубчастих валків та ефективну швидкість їх обертання.

Для розрахунку за першим варіантом мають бути задані швидкість обертання валків та їх розміри (радіус і довжина робочої частини) [24].

Таким чином, будемо визначати конструктивні параметри зубчастих валків (рис. 4.1), які дозволяють руйнувати полімерний матеріал, отримуючи орієнтовану структуру матеріалу в напрямку прикладання зусиль.

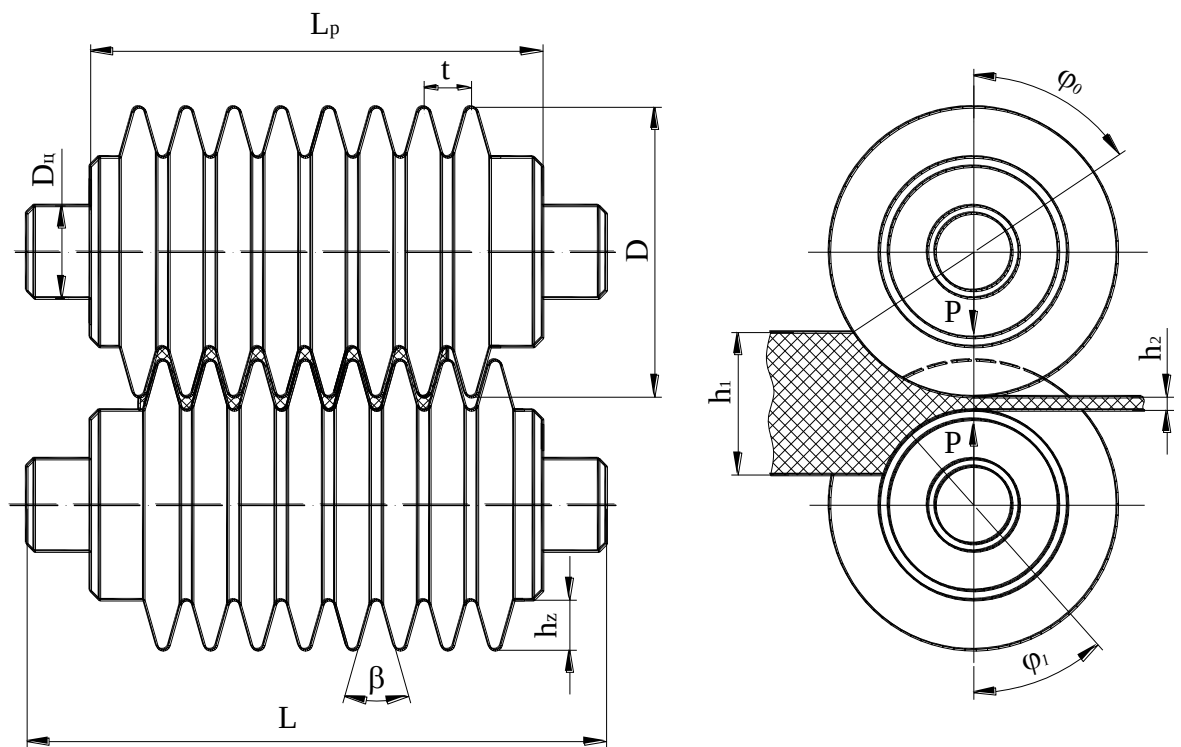


**Рис. 4.1. Розрахункова схема для визначення основних параметрів зубчастих валків**

Як видно з рис. 4.1, полімерний матеріал з початковою товщиною  $h_1$  входить у зону дії зубчастих валків, а виходить із неї з товщиною  $h_2$ . Перед розрахунком



цього пристрою необхідно визначити деформацію  $\varepsilon$  полімерного матеріалу, яку необхідно забезпечити, щоб отримати орієнтовану структуру [24, 247, 248].

При дії на полімерний матеріал зубчастих валків матеріал, потрапляючи між виступ одного валка і впадину іншого, розтягується.

Деформація полімерного матеріалу між виступами і впадинами валків відбувається лише в тому випадку, коли полімерний матеріал буде розміщено на зубцях, тобто не буде ковзання і вільного розміщення його на поверхні валків [24, 247]. Отже, зусилля, що притискають полімерний матеріал між виступами і впадинами, мають бути завжди вищі за розтягувальні (рис. 4.2). В іншому випадку буде відбуватися проковзування полімеру без деформації.

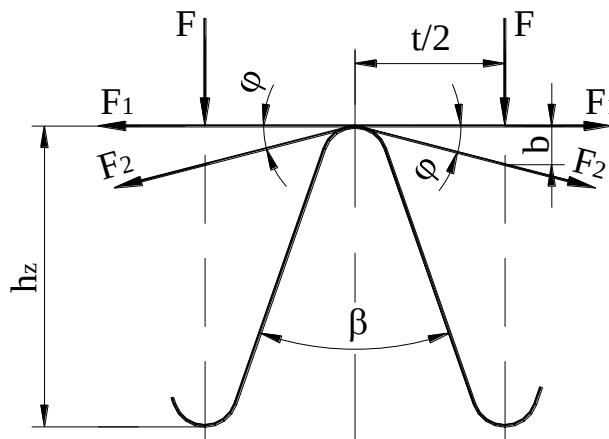


**Рис. 4.2. Деформація полімеру між виступами і впадинами валків**

Для забезпечення зазначених вище умов слід визначити конструктивні параметри валків та технологічні параметри процесу деформації полімерного матеріалу між валками.

Будемо розглядати, перш за все, процес деформації полімерного матеріалу в місцях стиску на кінцях зубців. Забезпечення необхідного защемлення матеріалу в зазначених місцях дозволить отримати необхідну деформацію. Для забезпечення вказаного процесу необхідно прикласти зусилля  $F$ , яке визначається з такого співвідношення [24, 247]:

$$F = 24 E \cdot I \cdot b / t^3, \quad (4.1)$$

де  $E$  – в'язкопружний модуль полімерного матеріалу, Па;  $I = (h_2)^3 \cdot l / 12$  – момент інерції поперечного перерізу матеріалу,  $\text{м}^4$ ;  $t$  – крок зубців, м;  $b$  – прогин полімерного матеріалу при проходженні його через зубчасті валки, м.

На вершині зубців необхідно створити зусилля  $F_1$ , яке не дасть полімерному матеріалу ковзати:

$$F_1 = F \cdot f, \quad (4.2)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя полімерного матеріалу по поверхні зубців.

Протилежна гілка полімеру розтягується зусиллям  $F_2$ , яке можна отримати з такого рівняння [24, 247]:

$$F_2 = F_1 \cdot e^{2 \cdot \varphi \cdot f} = 24 f \cdot E \cdot I \cdot b / t^3 \cdot e^{2 \cdot \varphi \cdot f}, \quad (4.3)$$

де  $2\varphi = 2 \cdot \arctg(2b/t)$  – кут обхвату зубця.

Напруження розтягу, що виникає в полімерному матеріалі, визначимо з такого рівняння:

$$T = \sigma_p S = E \cdot \varepsilon_p \cdot h, \quad (4.4)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу полімеру,  $\text{м}^2$ ;  $h$  – товщина полімеру, м;  
 $\varepsilon_p = \sqrt{4b^2 + t^2} / t - 1$  – відносний розтяг полімерного матеріалу.

Для забезпечення необхідного розтягу потрібно домогтися виконання умови  $F_2 \geq T$ , тобто:

$$24 f \cdot E \cdot I \cdot b / t^3 \cdot e^{2 f \arctg(2b/t)} \geq E \cdot h \cdot \left( \sqrt{4b^2 + t^2} / t - 1 \right). \quad (4.5)$$

Максимальний розтяг полімерного матеріалу можливий у випадку, коли його прогин  $b$  при проходженні через зубчасті валки буде дорівнювати висоті зубця  $h_z$ , тобто  $h_z = b$ .

Враховуючи умову (4.5) та забезпечуючи максимальний розтяг полімерного матеріалу, виразимо глибину впадини (висоту виступу) через крок зубців таким чином:

$$h_z = 0,5 \cdot t / \tg(\beta/2). \quad (4.6)$$

Підставивши в рівняння (4.5) замість прогину полімерного матеріалу висоту зубця  $h_z$  отримаємо:

$$12 f \cdot E \cdot I \cdot t / (t^3 \operatorname{tg} \beta / 2) \cdot e^{2 f \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}^{-1}(\beta/2))} \geq E \cdot h \cdot \left( \sqrt{\frac{t^2}{\operatorname{tg}^2(\beta/2)} + t^2} / t - 1 \right). \quad (4.7)$$

Виконавши математичні перетворення рівняння (4.7), отримаємо вираз для кроку  $t$ :

$$t \leq \sqrt{\frac{12 f \cdot I \cdot e^{2 f \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\operatorname{tg}(0,5 \cdot \beta)}\right)}}{h \left( \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(0,5 \cdot \beta)} - \operatorname{tg}(0,5 \cdot \beta) \right)}}. \quad (4.8)$$

Підставивши в рівняння (4.8) вираз для моменту інерції, отримаємо:

$$t \leq \sqrt{\frac{f \cdot h^2 \cdot e^{2 f \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\operatorname{tg}(0,5 \cdot \beta)}\right)}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(0,5 \cdot \beta)} - \operatorname{tg}(0,5 \cdot \beta)}}. \quad (4.9)$$

Із рівняння (4.9) видно, що на крок зубців валків впливає кут профілю зубців, який має бути підібраний таким чином, щоб при дії на полімерний матеріал у ньому створювався необхідний розтяг, при якому перероблений полімерний матеріал буде мати орієнтовану структуру.

За допомогою кута профілю зубців можна визначити довжину ділянки полімеру, затисненого між зубцями валків:

$$t' = 2l_1 = t / \sin(0,5 \cdot \beta). \quad (4.10)$$

де  $l_1$  – довжина бічної поверхні зубця, м.

Відносне подовження полімерного матеріалу в результаті пропускання його між зубчастими валками визначимо з такої формули:

$$\varepsilon_p = (t' - t) / t = \sin^{-1}(0,5 \cdot \beta) - 1. \quad (4.11)$$

Враховуючи відому деформацію, яку необхідно створити в полімерному матеріалі, щоб отримати орієнтовану структуру, з рівняння (4.11) визначимо кут зубців:

$$\beta = 2 \arcsin(1 / [1 + \varepsilon_p]). \quad (4.12)$$

З рівняння (4.9) за відомим кутом зубців  $\beta$  визначимо крок зубців  $t$ .

На рис. 4.3 (графік 1) наведено залежність кута зубців  $\beta$  від деформації розтягу або стиску  $\hat{\varepsilon}_1$  поліетиленової плівки. Рівняння для визначення необхідної деформації розтягу або стиску для руйнування структури полімерного матеріалу виведені раніше; вони наведені в роботі [188]. За відомим кутом профілю зубців можна визначити крок  $t$  зубців рис. 4.3 (графік 2).

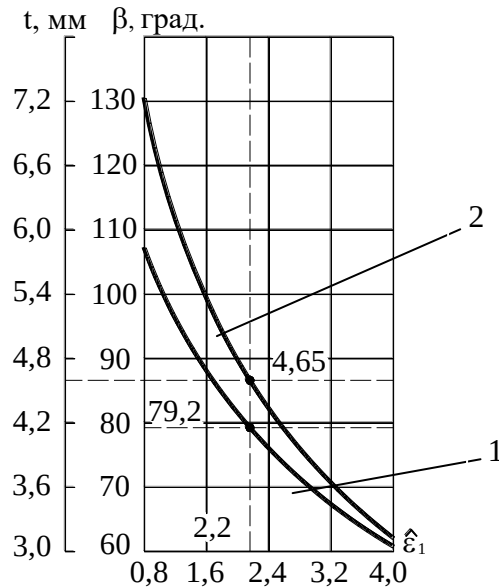


**Рис. 4.3.** Залежність кута  $\beta$  (1) та кроку  $t$  (2) зубців від деформації  $\hat{\varepsilon}_1$ , яка створюється в полімері при пропусканні його між зубчастими валками

Під час проходження полімерного матеріалу між зубчастими валками, крім розтягу його на вершинах зубців, ми спостерігали його згин по радіусу вершини зубця (рис. 4.4). З [228, 230] відомо, що при згині зовнішній шар полімерного матеріалу буде розтягуватися, а внутрішній – стискатися.

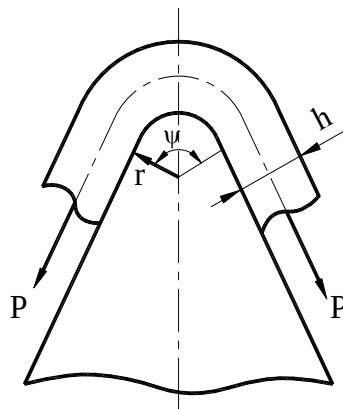


**Рис. 4.4.** Згин полімеру на зубці

Стискання внутрішнього шару полімерного матеріалу на вершинах зубців буде перешкоджати його витягуванню. Для подовження полімерного матеріалу будемо дотримуватися умови, яка полягає в тому, що напруження стиску у внутрішньому шарі компенсуються напруженнями розтягу (рис. 4.5):  $\varepsilon_{cm} = \varepsilon_p$ .

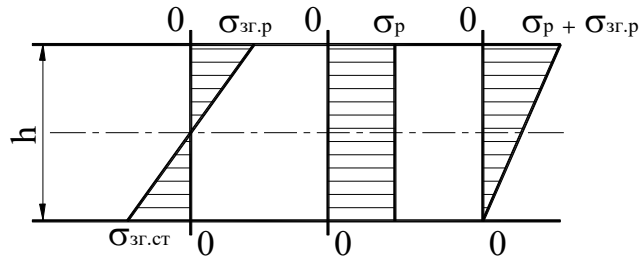


**Рис. 4.5. Епюра внутрішніх напруг, що виникають у полімерному матеріалі**

Виразимо відносну деформацію розтягу з такого рівняння:

$$\varepsilon_p = [\psi(r + 0,5 \cdot h) - r\psi] / r\psi = 0,5 \cdot h / r. \quad (4.13)$$

де  $r$  – радіус зубців, м;  $\psi$  – кут обхвату вершини зубця полімерним матеріалом.

Деформація стиску має бути компенсована розтягом. Отже, радіус зубців валків можна визначити з такого рівняння:

$$r = 0,5 \cdot h / \varepsilon_p. \quad (4.14)$$

Згідно з [24], при поперечному згині напруження дорівнюють нулю на вісі полімерного матеріалу і максимальні біля його поверхонь. Отже, визначимо максимальну деформацію стиску:

$$\varepsilon_{cm} = [\psi(r + 0,5 \cdot \delta) - r\psi] / r\psi = 0,5 \cdot h / r. \quad (4.15)$$

Таким чином, визначивши необхідну деформацію, що приводить до зміни структури полімеру, за наведеними вище рівняннями можна розрахувати конструктивні параметри (крок та кут профілю зубців, радіус заокруглення, глибину каналу), що забезпечать потрібну деформацію. Отримані рівняння дозволяють визначати раціональні конструктивні параметрів зубчастих валків для отримання такої деформації полімерного матеріалу, при якій відбувається орієнтація його структури в напрямку дії напружень розтягу.

Як зазначено раніше, у процесі дії на полімерний матеріал зубчастих валків він піддається таким деформаціям: розтягу, стиску та згину [247, 248]. Внутрішній

шар полімерного матеріалу на вершині зубців буде витягуватися під дією розтягувальних напружень і стискатися під дією напружень згину (див. рис. 4.5).

Таким чином, деформація розтягу внутрішнього шару буде компенсуватися деформацією його стиску, а деформація зовнішнього шару полімерного матеріалу збільшиться за рахунок розтягу, що виникає при згині.

Під час проходження полімерного матеріалу між зубчастими валками він піддається деформаціям розтягу та стиску по всій товщині (рис. 4.1).

Крім того, приймаємо такі припущення: релаксація деформації відсутня; область впливу на полімер – тільки в площині осей зубчастих валків.

Згідно з [247, 248] деформація полімерного матеріалу в зубчастих валках відбувається в два етапи: розтяг полімерного матеріалу між двома зубчастими валками; згин полімерного матеріалу на вершинах зубців.

Таким чином, згідно до [24, 247] та рис. 4.1, відносний розтяг можна визначити з такого рівняння:

$$\varepsilon_p = [1 - \sin(0,5 \cdot \beta)] / \sin(0,5 \cdot \beta), \quad (4.16)$$

Розрахована за рівнянням (4.16) деформація розтягу має забезпечувати орієнтовану структуру полімерного матеріалу. Для забезпечення виконання цієї умови виразимо відносний розтяг полімерного матеріалу через напруження розтягу  $\sigma_p$  і стиску  $\sigma_{cm}$  та в'язкопружні постійні надмолекулярних утворень кристалічної та аморфної областей –  $E_c$ ,  $E_a$  та  $\nu_c$ ,  $\nu_a$ , відповідно до математичної моделі, що описує зміну структури полімеру при дії на нього розтягувальних навантажень [179, 202]:

$$\varepsilon_p = (\sigma_p - 2\nu_c \sigma_{cm}) / E_c + \sigma_p / E_a. \quad (4.17)$$

Підставивши рівняння (4.17) у вираз (4.16) і розв'язавши отриманий вираз відносно  $\beta$ , будемо мати рівняння для визначення кута профілю зубців, при якому забезпечується така деформація полімерного матеріалу, що приводить до орієнтації надмолекулярних утворень (сферолітів та інших кристалічних областей) у напрямку цієї деформації:

$$\beta = 2 \arcsin \left( \frac{1}{(\sigma_p - 2\nu_c \sigma_{cm}) / E_c + \sigma_p / E_a + 1} \right). \quad (4.18)$$

З рівняння (4.18) можна визначити кут профілю зубців валкового пристрою для переробки полімерних відходів, при якому забезпечується орієнтована структура полімерного матеріалу, що проходить між валками.

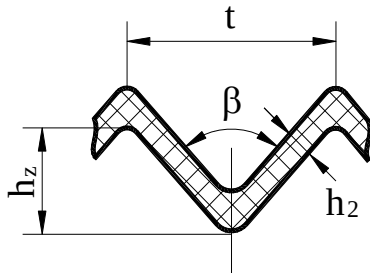


**Рис. 4.6. Схема розташування полімерного матеріалу між зубцями валків**

Полімерний матеріал між двома зубцями набуває вигляду рівнобедреного трикутника (рис. 4.6). Висота цього трикутника дорівнює  $h_z$ , а основа –  $t$ .

З рис. 4.1 видно, що розтяг полімерного матеріалу починається на ділянці  $\varphi_0 \dots \varphi_1$  і закінчується на ділянці  $\varphi_0 \dots 0$ .

Далі полімерний матеріал стискається між бічними поверхнями зубців (ділянка  $\varphi_1 \dots 0$ ), а на ділянці  $\varphi_0 \dots \varphi_1$  полімерний матеріал розтягується, що приводить до зменшення товщини матеріалу з  $h_1$  до  $h_1(1 - \nu \varepsilon_p)$ . Коефіцієнт Пуассона полімерного матеріалу  $\nu$  визначаємо, згідно з [184, 191], за такою формулою:

$$\nu = [0,5 \cdot E_V - E/6] / E_V, \quad (4.19)$$

де  $E_V$  – в'язкопружний модуль об'ємної деформації, що може бути представлений таким виразом, Па [191]:

$$E_V = E_a \frac{E_c(1 + \nu_a) + 2\chi^2 E_c(1 - 2\nu_a) + 2E_a(1 - \chi^2)(1 - 2\nu_c)}{3[E_c(1 - \chi^2)(1 - 2\nu_a)(1 + \nu_a) + \chi^2 E_a(1 + \nu_a)(1 - 2\nu_c) + 2E_a(1 - 2\nu_a)(1 - 2\nu_c)]}, \quad (4.20)$$

де  $\chi$  – ступінь кристалічності (визначається типом кубічної решітки пакування сферолітів у матеріалі [184]);  $E_c$ ,  $\nu_c$  – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона сфероліта (вибираються з довідникової літератури);  $E_a$ ,  $\nu_a$  – в'язкопружний модуль та коефіцієнт Пуассона аморфної матриці (вибираються з довідникової літератури);  $E$  – в'язкопружний модуль полімерного матеріалу сферолітної будови, який може бути представлений, згідно з [184, 191], таким виразом:

$$E = E_a \frac{1 + \frac{2}{3}\chi^2 \left( \frac{(1-2\nu_a)(E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c))}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)} + \frac{(7-5\nu_a)(1+\nu_a)(E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c))}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \right)}{1 - \frac{1}{3}\chi^2 \left( \frac{(1+\nu_a)(E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c))}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)} - \frac{4(4-5\nu_a)(1+\nu_a)(E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c))}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \right)}.$$
(4.21)

Згідно з рис. 4.1, міжвісьова відстань дорівнює:

$$a = 2R \cos \varphi_0 + h_2 = R + h_1 + R - h_z, \quad (4.22)$$

де  $R$  – радіус зубчастих валків, м.

Враховуючи, що  $h_2 - h_1 = \varepsilon_{cm} h_1$ , визначимо кут, при якому полімерний матеріал захоплюється валками. Згідно з рис. 4.1, вираз для визначення цього кута можна записати таким чином:

$$\cos \varphi_0 = 0,5 \cdot [2R - h_z - \varepsilon_{cm} h_1] / R, \quad (4.23)$$

де  $\varepsilon_{cm}$  – деформація стиску полімерного матеріалу.

Згин полімерного матеріалу можна визначити з такого рівняння:

$$b = 2R(\cos \varphi - 1) + h_z - h_2. \quad (4.24)$$

Якщо враховувати товщину матеріалу, то рівняння (4.24) перепишеться таким чином:

$$b = 2R(0,5 \cdot h_1 / R + \cos \varphi - 1) + h_z - h_2. \quad (4.25)$$

З рис. 4.1 та враховуючи вираз (4.25), визначимо деформацію розтягу полімерного матеріалу:

$$\Delta l = 2\sqrt{[2R(0,5 \cdot h_1 / R + \cos \varphi - 1) + h_z - h_2]^2 + t^2} / 4 - t \quad (4.26)$$

та відносну деформацію:

$$\varepsilon_p = 2\sqrt{[2R(0,5 \cdot h_1 / R + \cos \varphi - 1) + h_z - h_2]^2 + t^2} / 4t - 1. \quad (4.27)$$

З рис. 4.1 видно, що в результаті проходження полімерного матеріалу між зубцем одного валка та впадиною іншого товщина матеріалу змінюється на величину:

$$\delta = -\varepsilon_{cm} h_1. \quad (4.28)$$

Найбільше стиснення полімерного матеріалу виникає на бічній поверхні зубця, тому при розрахунку зміни товщини матеріалу необхідно враховувати



величину  $\sin(\beta/2)$ , яка є постійною для певного перероблювального пристрою [248]. Враховуючи сказане вище, перепишемо рівняння (4.28) в такий спосіб:

$$\delta = -\varepsilon_{cm} h_1 \sin(\beta/2) = h_1 - h_2 = -\varepsilon_{cm} h_1 \sin(\beta/2). \quad (4.29)$$

Розв'язуючи рівняння (4.29) відносно кута  $\varphi$  з урахуванням рівняння (4.23), отримаємо такий вираз:

$$\cos \varphi = 1 - \frac{\varepsilon_{cm} h_1}{(2R - h_z) \sin(\beta/2)}. \quad (4.30)$$

При куті обертання зубчастих валків  $\varphi_1$  (рис. 4.1) відстань між бічними поверхнями зубців буде дорівнювати кінцевій товщині полімерного матеріалу  $h_2$ , тобто  $h_1(1 - \nu\varepsilon_p)$ . Косинус кута  $\varphi_1$  визначимо з рівняння (4.30):

$$\cos \varphi_1 = \frac{(2R - h_z) \sin(\beta/2) - h_1(1 - \nu\varepsilon_p)}{(2R - h_z) \sin(\beta/2)}. \quad (4.31)$$

Результати обчислень за формулою (4.31) представлені на графіках (рис. 4.7). Залежність (4.31) є важливою при проектуванні зубчастих пристроїв, на яких полімерні відходи обробляються декілька разів. Так, при першому проходженні між валками поліпропілен деформується на 250%, тому у разі другого проходження полімерного матеріалу між зубчастими валками для забезпечення максимальної орієнтації кут обертання валків може бути меншим.

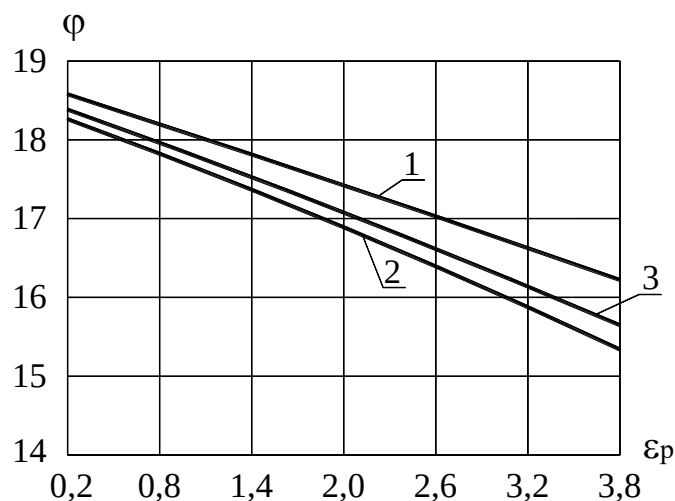


**Рис. 4.7. Залежність кута обертання зубчастих валків від попередньої деформації полімерного матеріалу: 1 – поліетилентерефталат; 2 – поліетилен; 3 – поліпропілен**

Як видно з рис. 4.7, різниця між значеннями кутів обертання зубчастих валків, при яких закінчується в'язкопружна та починається пластична деформація полімерних матеріалів, складає величину меншу, ніж 1 градус. Таким чином, у подальших розрахунках можна використовувати значення кута обертання зубчастих валків, при якому починається пластична деформація полімерного матеріалу. Так, для поліетиленової плівки це відповідає деформації  $\varepsilon_p = 2,4$ ; для поліетилентерефталату –  $\varepsilon_p = 3,2$ ; для поліпропіленової плівки –  $\varepsilon_p = 2,8$  [191].

З рівняння (4.30), з урахуванням виразу (4.28), отримаємо вираз для визначення зміни товщини полімерного матеріалу при певному куті обертання зубчастих валків:

$$\delta = (2R - h_z) \sin(\beta/2) (\cos \varphi - 1). \quad (4.32)$$

На рис. 4.8 наведено графіки залежності зміни товщини певного полімерного матеріалу  $\delta$  від кута обертання зубчастих валків  $\varphi$  при різних значеннях кута профілю зубців  $\beta$ .

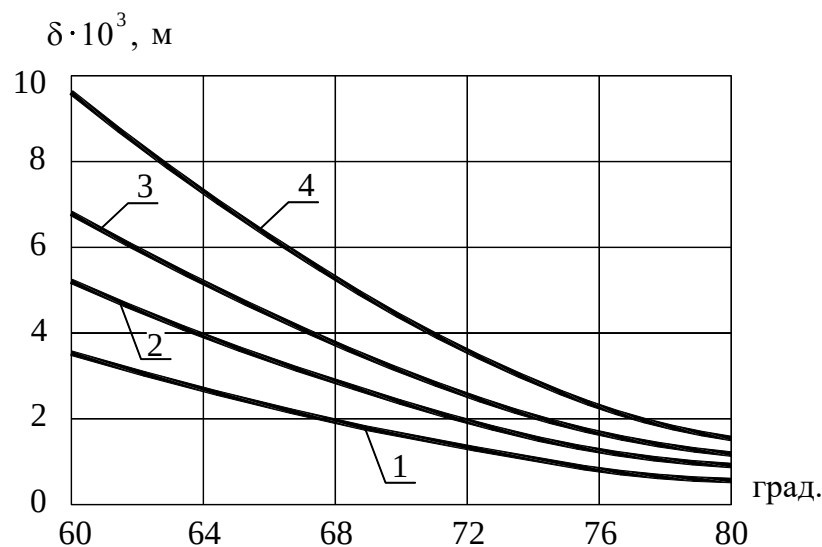


**Рис. 4.8. Залежність товщини полімерного матеріалу від кута обертання зубчастих валків: 1 – кут профілю зубців  $\beta = 40^\circ$  ;  
2 –  $\beta = 55^\circ$  ; 3 –  $\beta = 75^\circ$  ; 4 –  $\beta = 85^\circ$**

Із графіків видно, що, чим більший кут профілю зубців, тим більшим повинен бути кут обертання валків, який забезпечує таку товщину полімерного

матеріалу, при якій починається його пластична деформація. Більший кут обертання зубчастих валків вимагає більших витрат електричної енергії.

Для забезпечення необхідного зусилля притискання полімерного матеріалу до вершин зубців, при якому відсутнє ковзання матеріалу по боковій поверхні зубця, необхідно, щоб кут профілю був якомога меншим. Крім того, як відомо з [184], чим менший кут профілю зубців, тим більша деформація полімерного матеріалу  $\varepsilon$ .

З іншого боку кут профілю зубців має бути не меншим за критичне значення, при якому можливе руйнування зубців.

У подальшому буде проведено силовий розрахунок процесу деформації полімерного матеріалу в зубчастих валках, який визначить мінімальне значення кута профілю зубців.

При обертанні зубчастих валків на кут  $d\varphi$  товщина полімерного матеріалу зміниться на  $d\delta$ , тобто:

$$d\delta = -(2R - h_z) \sin(\beta/2) \sin \varphi d\varphi. \quad (4.33)$$

А відносно деформацію стиску будемо визначати  $\varepsilon_{cm}$  з такого рівняння:

$$d\varepsilon_{cm} = \frac{-(2R - h_z) \sin(\beta/2) \sin \varphi}{h_1(1 - \nu\varepsilon_p)} d\varphi. \quad (4.34)$$

Виконаємо інтегрування виразу (4.34):

$$\varepsilon_{cm} = \frac{(2R - h_z) \sin(\beta/2) \cos \varphi}{h_1(1 - \nu\varepsilon_p)} + C_1. \quad (4.35)$$

Для визначення постійної інтегрування скористаємося початковими умовами деформації полімерного матеріалу, тобто  $\varepsilon_{cm} = 0$  при  $\varphi = \varphi_1$ :

$$C_1 = -\frac{(2R - h_z) \sin(\beta/2)}{h_1(1 - \nu\varepsilon_p)} \cos \varphi_1. \quad (4.36)$$

Підставивши значення постійної інтегрування в рівняння (4.35), отримаємо вираз для визначення максимальної відносної деформації стиску полімерного матеріалу при проходженні його між зубчастими валками:

$$\varepsilon_{cm} = \frac{(2R - h_z) \sin(\beta/2)}{h_1(1 - \nu\varepsilon_p)} (\cos \varphi_0 - \cos \varphi_1). \quad (4.37)$$

З метою фіксації полімерного матеріалу в розтягнутому стані слід піддати його стисненню (рис. 4.9), що можна здійснити, обертаючи зубчасті валки на кут від  $\varphi_0$  до  $\varphi_1$ ; де  $\varphi_0$  – кут, при якому починається в'язкопружна деформація полімерного матеріалу, а  $\varphi_1$  – кут, при якому закінчується в'язкопружна і починається пластична деформація полімерного матеріалу; кут  $\varphi_1$  визначається з рівняння (4.31).

Після цього полімерний матеріал виходить зі зменшеною міцністю в перпендикулярному до розтягу напрямку. Далі, приклавши перпендикулярно до орієнтованої структури полімерного матеріалу напруження зсуву, зруйнуємо матеріал на частинки з анізотропією фізико-механічних властивостей. Для створення згаданих напружень необхідно пропустити попередньо розтягнутий полімерний матеріал між валками, що виготовлені за профілем Рело.

Розраховане за рівнянням (4.37) значення деформації стиску  $\varepsilon_{ст}$ , яку забезпечує пристрій із зубчастими валками, що обертаються, не повинно бути меншим, ніж значення деформації стиску  $\hat{\varepsilon}_2$ , отримане з [248], яка забезпечує пластичну деформацію у напрямку, поперечному до напрямку витягування полімерного матеріалу. В результаті здійснюється фіксація розтягнутого полімерного матеріалу шляхом руйнування зв'язків між витягнутими конгломератами сферолітів.

На рис. 4.10 наведено залежність деформації стиску  $\varepsilon_{ст}$  полімерних матеріалів: поліетилену ( $E_c=1020$  МПа,  $\nu_c=0,37$ ;  $E_a=77$  МПа,  $\nu_a=0,37$ ;  $\chi=0,68$ ), поліетилентерефталату ( $E_c=8239$  МПа,  $\nu_c=0,32$ ;  $E_a=2000$  МПа,  $\nu_a=0,39$ ;  $\chi=0,80$ ) та поліпропілену ( $E_c=3228$  МПа,  $\nu_c=0,28$ ;  $E_a=345$  МПа,  $\nu_a=0,35$ ;  $\chi=0,72$ ), від висоти зубців  $h_z$  при різних кутах профілю  $\beta$ . Фізико-механічні характеристики структурних утворень полімерних матеріалів визначалися експериментально за методикою [218]. Тільки перед експериментом матеріал вводили у високоеластичний стан – модель аморфної області та в склоподібний стан – модель кристалічної області.

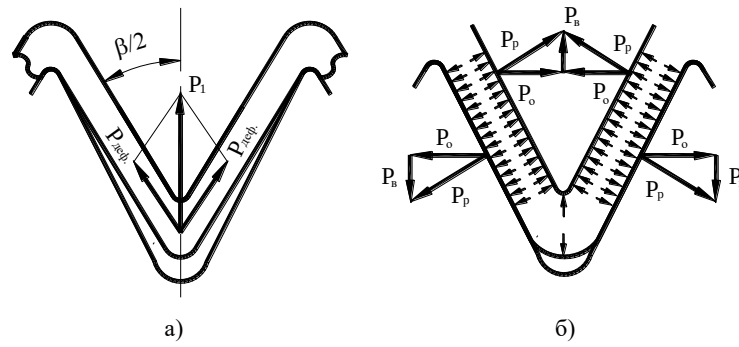


**Рис. 4.9. Схема внутрішніх силових факторів, які виникають у полімерному матеріалі під час розтягу (а) і в момент змикання робочих поверхонь (б) у валковому механізмі**

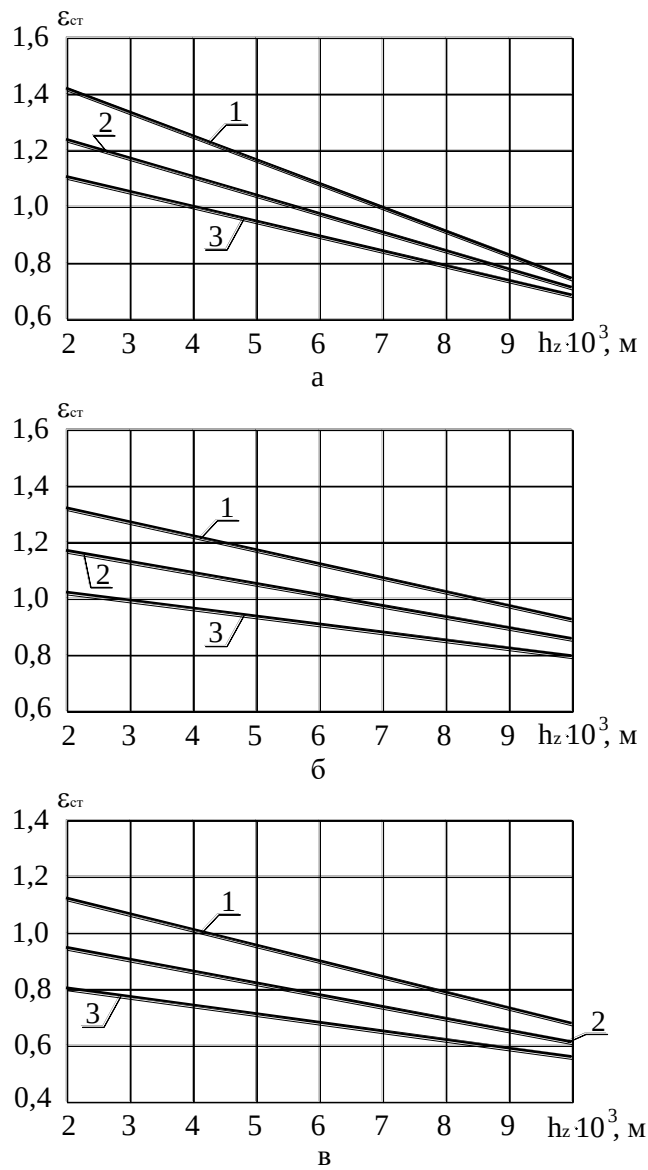


**Рис. 4.10. Залежність деформації стиску  $\varepsilon_c$  від висоти зубців  $h_z$ :  
1 – кут профілю зубців  $\beta = 60^\circ$ ; 2 –  $\beta = 45^\circ$ ; 3 –  $\beta = 30^\circ$ ; а – поліетилен,  
б – поліпропілен; в – поліетилентерeftалат**

Аналіз результатів, які представлені графіками на рис. 4.10, показав, що для фіксації попередньо орієнтованої структури полімерного матеріалу, яка забезпечується руйнуванням зв'язків між орієнтованими конгломератами кристалітів (сферолітів), необхідно створити в ньому потрібну деформація стиску. Так, наприклад, для фіксації витягнутої структури поліетиленової плівки, товщиною 0,001 м (рис. 4.10 а), згідно до [184, 191], необхідно забезпечити деформацію стиску  $\varepsilon_{cm} = 0,6$ , яка може бути створена валками діаметром  $D = 0,12$  м з висотою зубців  $h_z = 0,008$  м та кутом профілю зубців  $\beta = 60^\circ$ . Крім того, залежно від товщини полімерного матеріалу зазор між зубчастими валками можна змінювати. Це забезпечить необхідне значення деформації стиску для полімерних відходів різної товщини.

Аналогічний аналіз графіків виконано для поліетилентерефталату та поліпропіленової плівки (рис. 4.10 б, в).

Перед проектуванням пристрою для переробки полімерних відходів необхідно розрахувати значення його основних параметрів, таких як: діаметр зубчастих валків, висота зубців, кут профілю зубців, частота обертання валків, при яких забезпечується орієнтована структура полімерного матеріалу. Отримані значення цих параметрів можна використовувати для виготовлення енергоефективного перероблювального обладнання.

Аналітичні дослідження впливу конструктивних параметрів зубчастого пристрою на деформацію розтягу та стиску полімерного матеріалу, які забезпечують необхідну для подальшої переробки структуру полімерного матеріалу, можна використовувати при його проектуванні. Так, для максимальної орієнтації структури полімерних відходів необхідно забезпечити такі конструктивні параметри:

- для поліетилену: крок та висота зубців, відповідно, 3 – 4 % та 6,4 – 7,5 % від діаметру валків; кут профілю зубців  $40 \dots 65^\circ$ ;
- для поліетилентерефталату: крок та висота зубців, відповідно, 2,5 – 3,0 % та 5,5 – 6,2 % від діаметру валків; кут профілю зубців  $50 \dots 75^\circ$ ;

– для поліпропілену: крок та висота зубців, відповідно, 3,5 – 5,0 % та 7,5 – 8,2 % від діаметру валків; кут профілю зубців  $45...70^{\circ}$ .

Таким чином, у результаті проведених розрахунків конструктивних та технологічних параметрів пристрою для переробки відходів з поліетилену, поліпропілену та поліетилентерефталату було визначено такі раціональні конструктивні параметри: діаметр  $D=116$  мм;  $t=4$  мм;  $h_z=116$  мм;  $\beta=65^{\circ}$ .

Переробка на цьому пристрої полімерних відходів легкої промисловості забезпечить максимальну орієнтацію їх структури та утворення мікророзривів в аморфних областях між витягнутими конгломератами кристалічної фази (сферолітів).

#### **4.3. Динамічний розрахунок зубчастого валкового пристрою**

Сьогодні у світі гостро стоїть питання економії енергетичних ресурсів, зокрема електричної енергії. У зв'язку з цим при проектуванні обладнання для переробки полімерних відходів необхідно приділяти особливу увагу економії енергетичних витрат [249, 250].

З метою зменшення витрат електроенергії будемо вирішувати задачу, яка полягає в тому, що за заданою продуктивністю пристрою із зубчастими валками необхідно визначити раціональні конструктивні параметри цього пристрою та ефективні технологічні режими його роботи, при яких потужність, що витрачається на деформацію, при якій забезпечується максимальна орієнтація структури полімеру та часткове руйнування зв'язків між витягнутими конгломератами орієнтованих сферолітів, була мінімальною.

Зубчасті валки, прокручуючись, створюють у полімерному матеріалі напруження розтягу, під дією яких структура полімеру сильно орієнтується, та напруження стиску, які руйнують зв'язки між конгломератами витягнутих сферолітів.

Таким чином, метою нашого дослідження є аналіз впливу основних конструктивних та технологічних параметрів валкового пристрою на потужність,

що ним споживається, та, на основі отриманих залежностей, розробка методу визначення раціональних параметрів валкового пристрою, при яких витрати електричної енергії мінімальні.

Зубчасті валки, впливаючи на полімерний матеріал, деформують його, в результаті чого внутрішній шар матеріалу одночасно розтягується і стискається під дією напружень стиску та згину [247, 248].

Таким чином, деформація розтягу внутрішнього шару буде компенсуватися деформацією його стиску, а деформація розтягу зовнішнього шару полімерного матеріалу збільшиться за рахунок розтягу, що виникає при згині. В результаті того, що вершини зубців та впадини мають різні радіуси обертання виникає тангенціальне напруження, що викликається силами тертя.

Отже, при переробці полімерного матеріалу в зубчастих валках потужність буде витрачатися на деформацію розтягу матеріалу, деформацію стиску та на подолання сил тертя [24, 247, 248].

З урахування сказаного вище, повний крутний момент представимо у такому вигляді:

$$T = T_{роз} + T_{ст} + T_m, \quad (4.38)$$

де  $T_{роз}$  – момент сил, що викликають розтяг полімерного матеріалу, Н·м;  $T_{ст}$  – момент сил, що викликають стиск полімерного матеріалу, Н·м;  $T_m$  – момент сил тертя, Н·м.

Розглянемо дію напружень у зоні взаємодії полімерного матеріалу із зубцями валків. Весь процес цієї взаємодії розіб'ємо на два етапи.

На першому етапі відбувається розтяг полімерного матеріалу (рис. 4.9). Згинальні та розтягувальні сили створюють зусилля, що діє на зубчасті валки:

$$P_1 = 2P_{def} \cos(\beta/2), \quad (4.39)$$

де  $P_{def}$  – сила, що викликає деформацію в зоні взаємодії полімеру із зубцями валків, Н;  $\beta$  – кут профілю зубця.

Площу розтягу полімерного матеріалу, що обмежується кривою  $R \cdot d\varphi$  і товщиною матеріалу  $dh$ , визначимо з рівняння:



$$dS_1 = R \cdot d\varphi \cdot dh, \quad (4.40)$$

де  $d\varphi$  – зміна кута обертання зубчастих валків;  $dh$  – зміна товщини полімерного матеріалу, що зменшується в результаті попереднього витягування, м.

Товщину полімерного матеріалу  $h_2$  після проходження його між зубчастими валками визначимо з такого рівняння:

$$h_2 = h_1(1 - \nu \varepsilon_p), \quad (4.41)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона для певного полімерного матеріалу (вибирається з довідникової літератури [94]);  $\varepsilon_p$  – деформація розтягу, яка забезпечує витягування та орієнтацію сферолітів у полімерному матеріалі.

Силу, що діє на площі  $dS_1$  полімерного матеріалу, можна визначити з такого рівняння:

$$dP_{\text{деф}} = \sigma_p \cdot R \cdot d\varphi \cdot dh, \quad (4.42)$$

де  $\sigma_p$  – напруження розтягу, Па.

Ця сила має однакові значення по обидва боки зубців і створює силу опору, що перешкоджає обертанню зубчастих валків:

$$dP_1 = 2\sigma_p \cdot R \cdot \cos(\beta/2) \cdot d\varphi \cdot dh. \quad (4.43)$$

Момент, що створюється силою  $dP_1$ , відповідно до рис. 4.9 а визначимо таким чином:

$$dM_{\text{деф}} = 2\sigma_p \cdot R^2 \cdot \cos(\beta/2) \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \cdot dh. \quad (4.44)$$

Обертаючись на кут  $\varphi_1$  зубчасті валки стискають попередньо розтягнутий полімерний матеріал. Стиснення полімерного матеріалу з метою руйнування зв'язків між витягнутими конгломератами сферолітів відбувається на другому етапі взаємодії полімерного матеріалу із зубчастими валками (рис. 4.1).

Площу стиску полімерного матеріалу, що обмежується кривою  $R \cdot d\varphi$  і довжиною поверхні дотику між полімером і зубцем  $dl$ , можна визначити з такого рівняння:

$$dS = R \cdot d\varphi \cdot dl, \quad (4.45)$$

де  $dl$  – довжина дуги, по якій полімерний матеріал контактує з бічною поверхнею зубця, яка змінюється від 0 до  $l_1$ , м;  $t$  – крок між зубцями, м.

З рис. 4.2 визначимо  $l_1$  у такий спосіб:

$$l_1 = -0,5 \cdot t / \sin(\beta/2). \quad (4.46)$$

Силу, що діє на площі  $dS_2$  перпендикулярно до бічної поверхні зубця, стискаючи тим самим полімерний матеріал, визначимо з такого рівняння:

$$dP_p = \sigma_{cm} \cdot R \cdot d\varphi \cdot dl. \quad (4.47)$$

Сила  $dP_p$  створює силу опору обертанню зубчастого валка  $dP_{rot}$  та вісьову силу  $dP_{ax}$ , орієнтована вздовж вісі обертання валка. Вісьова сила діє на бічних поверхнях зубця, тобто її складові, діючи на протилежних поверхнях в одному напрямку, взаємно компенсуються, тому вона не створюватиме момент.

Силу опору обертанню зубчастого валка  $dP_{rot}$  від стиску полімерного матеріалу на бічних поверхнях зубця визначимо з такого рівняння:

$$dP_{rot} = 2\sigma_{cm} \cdot R \cdot \sin(\beta/2) d\varphi dl, \quad (4.48)$$

де  $\sigma_{cm}$  – напруження стиску, Па.

Стискальний момент, що створюється силою опору  $dP_{rot}$ , відповідно до рис. 4.9 а визначимо в такий спосіб:

$$dM_{cm} = 2\sigma_{cm} \cdot R^2 \cdot \sin(\beta/2) \sin \varphi d\varphi dl. \quad (4.49)$$

На практиці плечі сил, що діють на зубчастих валках, можуть відрізнятися, наприклад, при різних діаметрах валків. Експериментальні дослідження деформації полімерного матеріалу в результаті проходження його між зубчастими валками, що проводилися в рамках нашої роботи, показали, що для отримання потрібної структури полімерного матеріалу при мінімальних витратах електроенергії слід використовувати валки однакового діаметра.

Таким чином, повний момент опору обертанню одного зубця можна визначити за такою формулою:

$$dM = dM_{def} + dM_{cm} = 2\sigma_p \cdot R^2 \cdot \cos(\beta/2) \sin \varphi \cdot d\varphi \cdot dh + 2\sigma_{cm} \cdot R^2 \cdot \sin(\beta/2) \sin \varphi d\varphi dl. \quad (4.50)$$

Проінтегруємо рівняння (4.50) за  $\varphi$  на інтервалі від  $\varphi_0$  до  $\varphi_1$  (розтяг) і на інтервалі від  $\varphi_1$  до 0 (стиск); за  $h$  на інтервалі від  $h_1$  до  $h_2$ ; за  $l$  на інтервалі від 0 до  $l_1$ :

$$\begin{aligned} M &= \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \int_{h_1}^{h_2} dM_{\text{деф}} + \int_{\varphi_1}^0 \int_{h_1}^{h_2} dM_{\text{см}} = \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \int_{h_1}^{h_2} 2\sigma_p \cdot R^2 \cdot \cos(\beta/2) \cdot \sin \varphi d\varphi dh + \int_{\varphi_1}^0 \int_{h_1}^{h_2} \sigma_{\text{см}} \cdot R^2 \cdot \sin(\beta/2) \sin \varphi d\varphi dl = \\ &= 2\sigma_p \cdot R^2 \cdot \cos(\beta/2) \cdot (\cos \varphi_0 - \cos \varphi_1) \cdot (h_2 - h_1) + 2\sigma_{\text{см}} \cdot R^2 \cdot \sin(\beta/2) \cdot (1 - \cos \varphi_1) \cdot l_1 \end{aligned} \quad (4.51)$$

З урахуванням виразів (4.41) і (4.46) перепишемо рівняння (4.51) у такий спосіб:

$$M = 2R^2 \cdot (\sigma_p \cdot \varepsilon_p \cdot \nu \cdot \cos(\beta/2) \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_0) \cdot h_1 + 0,5 \cdot t \cdot \sigma_{\text{см}} \cdot (1 - \cos \varphi_1)), \quad (4.52)$$

де  $\sigma_p$  – напруження розтягу, що створює в полімері відповідну деформацію розтягу  $\varepsilon_p$ , при якій відбувається максимальна орієнтація структури полімеру, Па;  $\sigma_{\text{см}}$  – напруження стиску, що створює в полімері відповідну деформацію стиску  $\varepsilon_{\text{см}}$ , при якій відбувається часткове руйнування поперечних зв'язків орієнтованої структури полімеру, Па. Напруження  $\sigma_p$ ,  $\sigma_{\text{см}}$  визначаються за рівняннями (3.50).

Косинуси кутів  $\varphi_0$  та  $\varphi_1$  виразимо через конструктивні параметри валкового пристрою (рис. 4.1) таким чином [247]:

$$\cos \varphi_0 = 0,5 \cdot [2R - h_z - \varepsilon_{\text{см}} h_1] / R, \quad \cos \varphi_1 = \frac{(2R - h_z) \sin(\beta/2) - h_2}{(2R - h_z) \sin(\beta/2)}, \quad (4.53)$$

де  $h_z$  – висота зубців на обох валках, м.

Таким чином, за допомогою рівняння (4.53) можна визначити повний момент опору обертанню одного зубця.

Окрім повного моменту опору обертанню  $M$ , який можна назвати моментом корисного опору, на зубчасті валки діє момент шкідливого опору  $M_{\text{тр}}$  від сил тертя, що виникають між полімерним матеріалом і зубцями за рахунок різниці радіусів вершин та впадин зубців. У результаті цього полімерний матеріал проковзує на бічних поверхнях зубців (рис. 4.11).

У точці, де сполучаються виступи і впадини, колові швидкості дорівнюють ( $R_1 \cdot \omega_1 = R_2 \cdot \omega_2$ ). Оскільки радіуси зубчастих валків нашого пристрою мають бути однаковими, то кутова швидкість їх обертання також має бути однаковою ( $\omega_1 = \omega_2$ ).

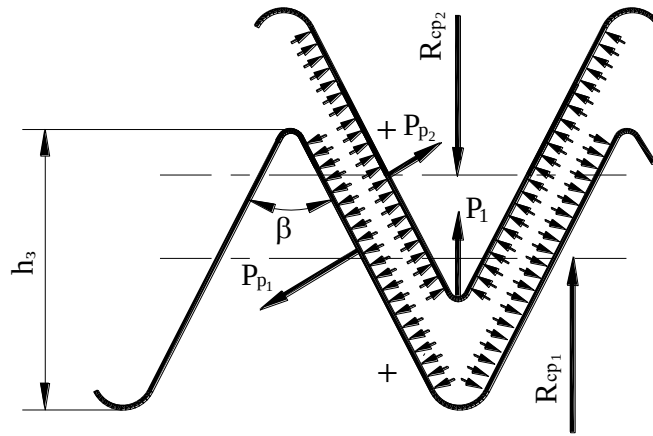


**Рис. 4.11. Схема сил, що виникають між полімерним матеріалом і бічними поверхнями зубців**

Якщо б товщина полімерного матеріалу дорівнювала нулю, то на середині бічної поверхні зубця одного валика, що збігається із серединою бічної поверхні впадини іншого валика, ковзання було б відсутнє. Оскільки полімерні вироби, що перероблюються на нашому обладнанні, завжди мають товщину, то кола середніх радіусів зубців валків контактують один з одним (рис. 4.11), при чому виникає різниця швидкостей за товщиною полімерного матеріалу від зубця одного валка до зубця іншого, що й призводить до ковзання.

Для руйнування зв'язків між орієнтованими конгломератами сферолітів у попередньо витягнутому полімерному матеріалі необхідно стиснути його до деформації  $\varepsilon_2$ , яку можна розрахувати за рівняннями, отриманими в роботі [248]. За визначеною деформацією стиску  $\varepsilon_2$  виставляється зазор між зубчастими валками.

Внаслідок стиснення полімерного матеріалу, розташованого між зубцями валків, силою  $P_1$  (рис. 4.11) в матеріалі виникають зусилля  $P_p$ , що намагаються розтягнути його в поперечному напрямку, тим самим руйнуючі зв'язки між орієнтованими конгломератами сферолітів.

Ковзання, що зумовлене різницею швидкостей за товщиною полімерного матеріалу, і нормальний тиск, що створюється зусиллям  $P_p$ , приводить до виникнення сухого тертя ковзання між полімерним матеріалом і зубчастим

валком. Сила тертя, що виникає, пропорційна нормальному тиску і спрямована протилежно до напрямку швидкості ковзання.

Як видно з рис. 4.11, сили тертя на зовнішньому боці полімерного матеріалу в місці контакту його з бічними поверхнями зубця на обох валках спрямовані в протилежних напрямках, тому в полімерному матеріалі будуть виникати напруження зсуву, що викликатимуть відповідні деформації. Ці деформації сприятимуть руйнуванню орієнтованої структури полімерного матеріалу.

Деформація зсуву суттєво залежить від технологічних (частоти обертання зубчастих валків) та конструктивних (висоти зубців, кута профілю, зазору між валками, діаметра валків) параметрів перероблювального обладнання, від товщини і фізико-механічних характеристик полімерного матеріалу.

Як зазначено раніше, у запропонованому пристрої швидкості обертання зубчастих валків рівні ( $\omega_1 = \omega_2$ ). Через це, у разі невеликої товщини полімерного матеріалу ( $h = (1...4) \cdot 10^{-3}$  м), в ньому виникають незначні деформації зсуву, якими, з врахуванням того, що коефіцієнти тертя, наприклад, поліетиленової і поліамідної плівки та поліетилентерефталату по сталі лежать в діапазоні  $f = 0,4...0,8$ , можна нехтувати.

Дослідження процесу переробки полімерних матеріалів, що мають товщину більшу за вказану вище, вимагають визначення деформації зсуву та врахування її при розрахунку технологічних і конструктивних параметрів перероблювального обладнання.

Тертя між полімерним матеріалом і зубчастими валками виникає в момент торкання полімером вершини зубця. З метою зменшення проковзування полімерного матеріалу на вершинах зубців нарізані насічки, які зачіплюють матеріал і затягують його в міжвалковий простір.

Під час розтягу полімерного матеріалу між зубцями одного валка на бічних поверхнях зубця виникає сила тертя, що буде відрізнятися від сили тертя від стискання полімеру. Сили тертя на бічних поверхнях зубця, викликані розтягом та стиском полімерного матеріалу визначимо з таких виразів:

– розтяг полімеру:

$$dF_1 = 2 f \sigma_p R \cos \frac{\beta}{2} d\varphi dh, \quad (4.54)$$

– стиск полімеру:

$$dF_2 = 2 f \sigma_{cm} R d\varphi dl, \quad (4.55)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя полімерного матеріалу по сталі.

Момент від сил тертя  $dF_1$ ,  $dF_2$ , що створюється на бічних поверхнях зубця, визначимо з такого рівняння:

$$dM_{mp} = 2 f \sigma_p R^2 \cos(\beta/2) d\varphi dh + 2 f \sigma_{cm} R(R - 0,5 \cdot h_z) d\varphi dl. \quad (4.56)$$

Проінтегруємо рівняння (4.56) за  $\varphi$  на інтервалі від  $\varphi_0$  до  $\varphi_1$  (розтяг) і на інтервалі від  $\varphi_1$  до 0 (стиск); за  $h$  на інтервалі від  $h_1$  до  $h_2$ ; за  $l$  на інтервалі від 0 до  $l_1$ :

$$\begin{aligned} M_{mp} &= \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \int_{h_1}^{h_2} 2 f \sigma_p R^2 \cos(\beta/2) d\varphi dh + \int_{\varphi_1}^0 \int_{0}^{l_1} 2 f \sigma_{cm} R(R - 0,5 \cdot h_z) d\varphi dl = \\ &= 2 f \sigma_p \cdot R^2 \cdot \cos(\beta/2) \cdot (\varphi_0 - \varphi_1) \cdot (h_2 - h_1) + 2 f \sigma_{cm} \cdot R^2 \cdot (1 - 0,5 \cdot h_z/R) (0 - \varphi_1) \cdot l_1. \end{aligned} \quad (4.57)$$

З рівняння (4.57), враховуючи вирази (4.41) і (4.46), одержимо рівняння для моменту тертя на одному зубці:

$$M_{mp} = 2 f R^2 \left( \sigma_p \cdot \varepsilon_p \cdot \nu \cdot \cos(\beta/2) \cdot (\varphi_0 - \varphi_1) \cdot h_1 + 0,5 \cdot \sigma_{cm} t \cdot (1 - 0,5 \cdot h_z/R) \varphi_1 / \sin(\beta/2) \right), \quad (4.58)$$

де  $\sigma_p$  – нормальні напруження розтягу, що створюються зубчастими валками в полімерних відходах, Па;  $\sigma_{cm}$  – нормальні напруження стиску, що створюються зубчастими валками в полімерних відходах, Па.

Напруження розтягу  $\sigma_p$  та стиску  $\sigma_{cm}$  розраховуються за відомими граничними деформаціями попереднього розтягу з рівняння (3.50).

Повний момент корисних і шкідливих опорів на одному зубці кожного з валків визначимо з рівняння (4.56), враховуючи вирази (4.52) та (4.58):

$$\begin{aligned} M_{sum} &= 2 R^2 \cdot \left\{ \sigma_p \varepsilon_p \nu h_1 \cdot \cos(\beta/2) \cdot ((\cos \varphi_1 - \cos \varphi_0) + f \cdot (\varphi_0 - \varphi_1)) + \right. \\ &\quad \left. + 0,5 \cdot \sigma_{cm} t \cdot ((1 - \cos \varphi_1) + f (1 - 0,5 \cdot h_z/R) \varphi_1 / \sin(\beta/2)) \right\}. \end{aligned} \quad (4.59)$$

Загальний обертальний момент визначимо з такого виразу:

$$T = M_{sum} \cdot z, \quad (4.60)$$

де  $z$  – кількість зубців на кожному валку.

Тоді потужність, що витрачається на створення обертового моменту при рівномірному русі, дорівнюватиме:

$$N = T \cdot \omega / \eta, \quad (4.61)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії пристрою (експериментально обґрунтоване значення  $\eta=0,65$ );  $\omega = \pi / 30$  – кутова швидкість обертання зубчастих валків,  $\text{рад}^{-1}$ ;  $n$  – частота обертання зубчастих валків,  $\text{хв}^{-1}$ .

Підставляючи вираз (4.59) у рівняння (4.61), з урахуванням (4.60), отримаємо потужність, яку слід витратити на орієнтацію структури полімерних відходів і часткового руйнування в поперечному до орієнтації напрямку:

$$N = \frac{z \pi n R^2}{15 \cdot \eta} \cdot \{ \sigma_p h_p \cdot \cos(\beta/2) \cdot ((\cos \varphi_1 - \cos \varphi_0) + f \cdot (\varphi_0 - \varphi_1)) + \\ + 0,5 \cdot \sigma_{cm} t ((1 - \cos \varphi_1) + f (1 - 0,5 \cdot h_z / R) \varphi_1 / \sin(\beta/2)) \}. \quad (4.62)$$

Як видно з рівняння (4.62), для зменшення енергетичних витрат, що йдуть на орієнтацію структури полімерного матеріалу та часткове руйнування в поперечному до орієнтації напрямку, необхідно визначити ефективні технологічні (частота обертання зубчастих валків) та раціональні конструктивні (кількість та висота зубців, кут профілю, діаметр валків, зазор між валками) параметри перероблювального пристрою.

Вихідні параметри для розрахунку: частота обертання валків:  $n = 90 \text{ хв}^{-1}$ ; діаметр зубчастих валків:  $D=0,116 \text{ м}$ ; кількість зубців:  $z=25$ ; крок зубців:  $t=0,01 \text{ м}$ ; кут профілю зубця:  $\beta=70^\circ$ ; вихідна товщина полімерного матеріалу:  $h_1=0,004 \text{ м}$ .

Полімерний матеріал: поліетиленова плівка ( $E_1=1020 \text{ МПа}$ ,  $E_2=770 \text{ МПа}$ ,  $\nu=0,37$ ); поліамідна плівка ( $E_1=5500 \text{ МПа}$ ,  $E_2=3400 \text{ МПа}$ ,  $\nu=0,35$ ); поліетилентерефталат ( $E_1=8239 \text{ МПа}$ ,  $E_2=2000 \text{ МПа}$ ,  $\nu=0,32$ ) [94, 178].

На рис. 4.12 представлена залежність потужності, що витрачається на обертання зубчастих валків, від деформації полімерного матеріалу, яку необхідно створити, щоб зруйнувати його структуру.

З графіка видно, що для забезпечення деформації полімерного матеріалу  $\varepsilon_p=3,0$ , при якій його структура перетворюється на структуру орієнтованих

витягнутих конгломератів кристалічних областей (сферолітів) з частково зруйнованими поперечними зв'язками між конгломератами [191, 202], необхідно витратити: для поліамідної плівки – 0,75 кВт; для поліетиленової плівки – 0,25 кВт і для поліетилентерефталату – 1,25 кВт.

З метою зменшення витрат енергії потрібно визначити ефективні параметри валкового пристрою. Для цього проаналізуємо вплив технологічних (частоти обертання зубчастих валків) та конструктивних (діаметра валків, кута профілю та кроку зубців) параметрів перероблювального обладнання на потужність, що витрачається для створення заданої деформації полімерного матеріалу внаслідок впливу на нього зубчастих валків.

На рис. 4.13-4.16 представлено залежності потужності від частоти обертання та діаметра зубчастих валків, кута профілю та кроку зубців. Змінюючи конструктивні параметри, такі як кут профілю і крок зубців, можна мінімізувати витрати електричної енергії, не впливаючи на продуктивність пристрою.

Як видно з рис. 4.13, чим більше значення кута профілю зубця, тим менше потужності споживає пристрій. Однак, згідно з [247], кут профілю може збільшуватися до значення  $78^{\circ}$ . Подальше збільшення кута  $\beta$  може призвести до того, що пристрій не зможе забезпечити потрібну деформацію, тобто таку, при якій структура полімерного матеріалу максимально орієнтується.

З рис. 4.14 видно, що збільшення кроку між зубцями призведе до збільшення споживання потужності. Згідно з [248], за відомим кутом профілю зубця, при якому забезпечується потрібна деформація та споживається мінімум потужності, визначимо крок між зубцями  $t = 0,004$  м.

На рис. 4.15 і 4.16 наведено залежності потужності, що споживається валковим пристроєм, від діаметра зубчастих валків та частоти їх обертання.

Як видно з наведених на рис. 4.15 і 4.16 залежностей, збільшення діаметра валків і частоти їх обертання призводять до зростання витрат електроенергії. Це пояснюється збільшенням інерційних сил, що виникають під час обертання валків, та взаємодією їх із полімерним матеріалом.



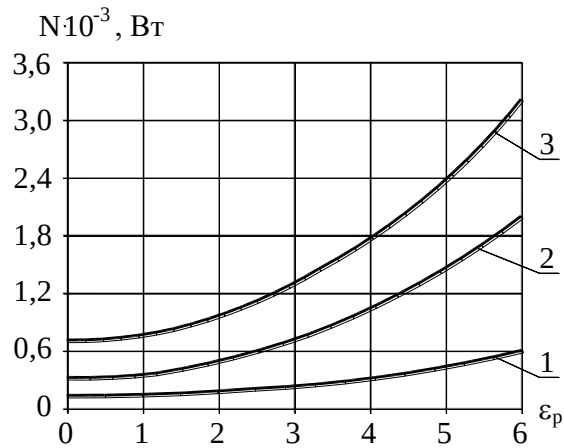


**Рис. 4.12. Залежності потужності від деформації полімерних матеріалів:**  
**1 – поліетилен; 2 – поліамід; 3 – поліетилентерефталат**

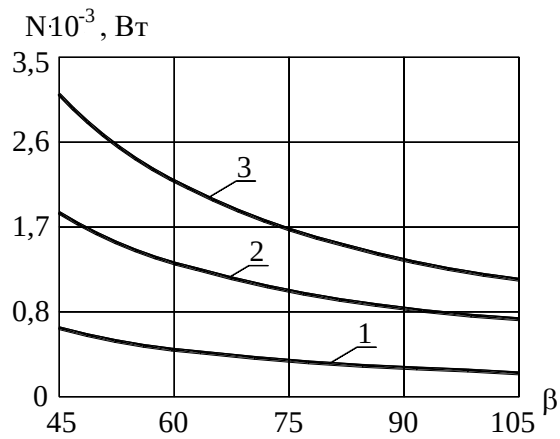


**Рис. 4.13. Залежність потужності від кута профілю зубця:**  
**1 – поліетилен; 2 – поліамід; 3 – поліетилентерефталат**

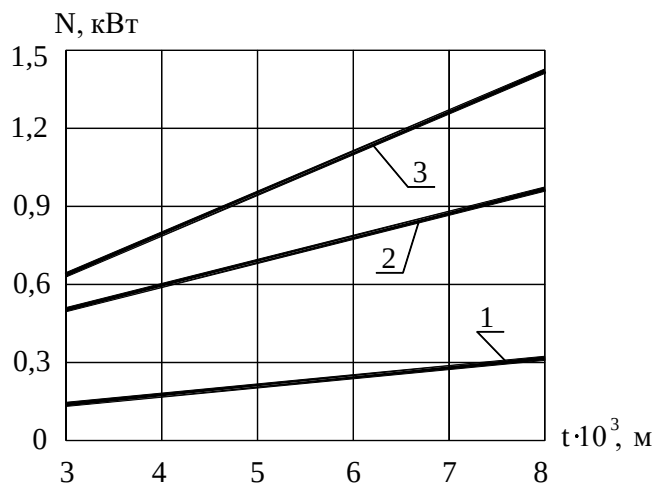


**Рис. 4.14. Залежність потужності від кроку зубців:**  
**1 – поліетилен; 2 – поліамід; 3 – поліетилентерефталат**

Зменшення діаметра та частоти обертання зубчастих валків сприятимуть зниженню споживання потужності, але при цьому буде зменшуватися продуктивність пристрою. Тому, на наш погляд, варто дослідити, який з цих двох параметрів здійснює найбільший вплив на споживання потужності.

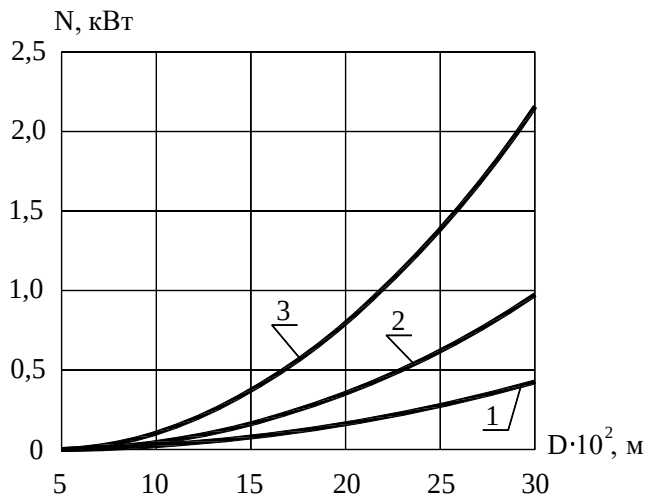


**Рис. 4.15. Залежність потужності від діаметра зубчастих валків:**  
**1 – поліетилен; 2 – поліамід;**  
**3 – поліетилентерефталат**

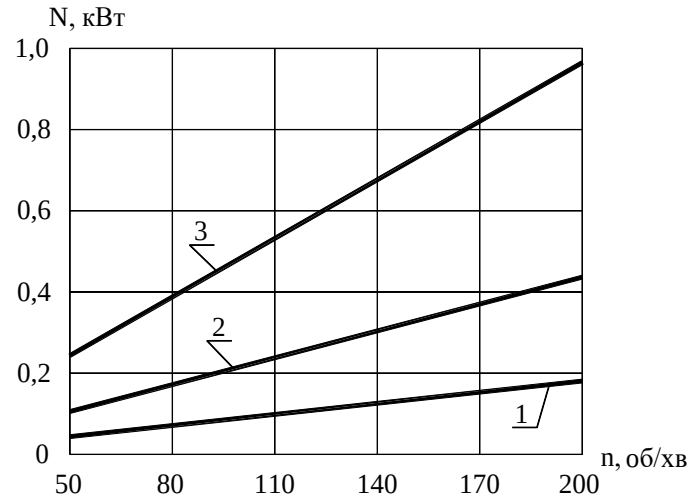


**Рис. 4.16. Залежність потужності від частоти обертання зубчастих валків:**  
**1 – поліетилен; 2 – поліамід;**  
**3 – поліетилентерефталат**

Аналогічний аналіз було виконано для поліетиленової плівки та поліетилентерефталату.

В результаті проведеного аналізу визначено схему навантаження матеріалу та отримано аналітичні залежності, що пов'язують основні конструктивні та технологічні параметри валкового пристрою із напружено-деформованим станом, що створюються ними в полімерних відходах.

Отримані аналітичні залежності для визначення потужності, що споживається перероблювальним обладнанням, можна використовувати для розрахунку раціональних конструктивних та технологічних параметрів валкового пристрою (радіусу зубчастих валків, кута профілю та кроку зубців, частоти обертання валків), при яких споживання потужності мінімальне. На основі цього запропоновано метод визначення технологічних (частоти обертання зубчастих валків) та конструктивних (діаметра зубчастих валків, кута профілю та

кроку зубців) параметрів, при яких забезпечується мінімальне споживання потужності для певних полімерних матеріалів.

Використовуючи запропонований метод, ми здійснили аналітичні дослідження впливу конструктивних та технологічних параметрів сучасних валкових пристроїв на потужність, що витрачається на максимальну орієнтацію структури полімерного матеріалу та часткове руйнування орієнтованої структури в поперечному напрямку (на вершинах зубців). В результаті було встановлено, що при переробці полімерних відходів найменші витрати електроенергії будуть при таких співвідношеннях параметрів пристрою: крок та висота зубців, відповідно, 5,2 – 6,3 % та 6,0 – 7,2 % від діаметру валків; кут профілю зубців від  $65^\circ$  до  $72^\circ$ ; частота обертання валків від  $110 \text{ хв}^{-1}$  до  $128 \text{ хв}^{-1}$ .

#### **4.4. Визначення параметрів перероблювального пристрою із валками профілю Рело**

Як зазначалось в роботі [247], при рівних швидкостях обертання зубчастих валків напруження зсуву, що створюються в полімерних відходах, незначні і тому в попередніх розрахунках зубчастого пристрою ми ними нехтували. Для забезпечення виникнення в полімерному матеріалі суттєвих напружень зсуву пропонується використовувати пристрій із валками, що виконані за профілем Рело.

Випукла форма згаданих валків забезпечить більшу площу робочої поверхні, а також дозволить створити в полімерному матеріалі складний напружено-деформований стан внаслідок дії значних напружень стиску та зсуву. Вплив цих напружень в поздовжньому та поперечному напрямку до попередньої орієнтації структури полімеру остаточно зруйнує зв'язки між витягнутими конгломератами орієнтованих сферолітів.

На відміну від пристрою із зубчастими валками, що розглядався в роботі [247], валки, що виготовлені за профілем Рело, мають змінний зазор та шість точок повного контакту. Також кут захвату полімерного матеріалу валками,

виготовленими за профілем Рело, значно більший, ніж у пристроях із зубчастими валками.

В процесі проходження полімерного матеріалу між валками, виготовленими за профілем Рело, виникаючі в матеріалі деформації стиску та зсуву протікають нерівномірно, що збільшує ефект руйнування поперечних зв'язків між попередньо орієнтованими структурними елементами полімеру.

Таким чином, завданням даного дослідження є визначення схеми навантаження полімерного матеріалу, на основі якої отримання аналітичних залежностей, що пов'язують основні конструктивні параметри перероблювального пристрою, в якому валки виготовлені за профілем Рело, з напружено-деформованим станом, що створюється в полімерному матеріалі.

Пристрої із зубчастими валками, які розглянуто в роботі [248], в основному створюють деформації зсуву тільки у випадку, коли валки обертаються з різними швидкостями або мають різні діаметри. Пристрої із валками профілю Рело, забезпечують деформації зсуву, які виникають за рахунок різних швидкостей обертання точок профілю [92].

Полімерний матеріал втягується між валками, виготовленими за профілем Рело, і деформується (рис. 4.17). Для забезпечення проходження матеріалу між валками необхідно, щоб вони оберталися з однаковою частотою і мали однакове початкове положення. Швидкості руху зовнішнього і внутрішнього шарів полімерного матеріалу різні, через що в ньому виникають напруження зсуву  $\tau_{zc}$ . Під час проходження матеріалу між валками виникає градієнт швидкості по товщині полімеру, що різко змінюється через кожні  $60^\circ$ . Виникаючі при цьому напруження зсуву  $\tau_{zc}$  кожні  $60^\circ$  змінюють свій напрямок дії, а це збільшує ефект руйнування зв'язків орієнтованої структури полімеру [215, 247].

Деформація полімерного матеріалу між валками, виготовленими за профілем Рело (рис. 4.17), виникатиме лише тоді, коли матеріал буде триматися на цих валках, тобто ковзання полімерного матеріалу буде відсутнє. Таким чином сили, що притискають полімерний матеріал між валками, мають бути

завжди більшими за сили, які викликають напруження зсуву в матеріалі. В протилежному випадку полімерний матеріал буде ковзати без деформації.

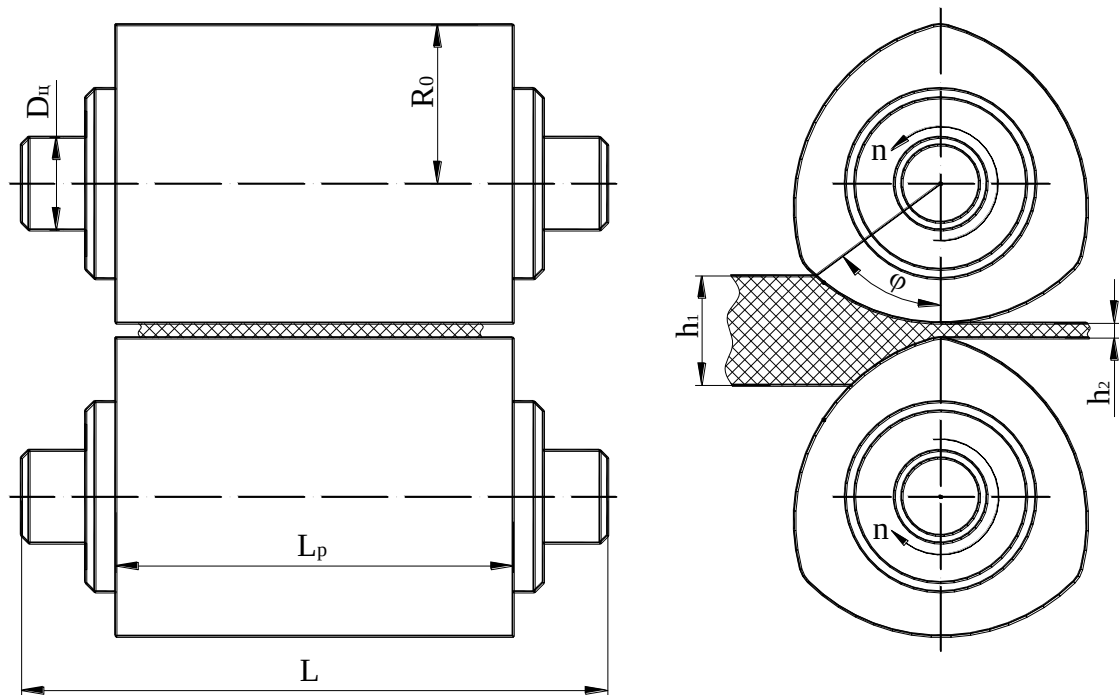


**Рис. 4.17. Схема для визначення основних конструктивних параметрів валкового пристрою**

Для створення в полімерному матеріалі максимальних деформацій зсуву розрахуємо раціональні конструктивні та технологічні параметри валкового пристрою.

Оскільки профіль Рело має складну форму, яка досить сильно впливає на процес переробки полімерного матеріалу [92], опишемо профіль Рело функціональною залежністю (рис. 4.18) за відомими базовим колом, радіусом  $R_0$ , і трьома дугами, радіусом  $R_d$ , центри яких розташовані на прямих, що проходять через центр базового кола (або валка профілю Рело) (рис. 4.18). Кут  $\alpha$  між цими прямими становить  $120^\circ$ , а відстань від центральної точки валка до центрів дуг є однаковою і визначає ексцентриситет дуги відносно центру обертання валка  $W$ .

Отже, відстань від вісі обертання валків профілю Рело до їх поверхонь залежно від кута обертання валків будемо визначати з таких рівнянь:

— для верхнього валка:

$$R = \sqrt{R_D^2 + W^2 (\cos^2(3\varphi/2) - 1)} - W \cdot \cos(3\varphi/2), \quad (4.63)$$

– для нижнього валка:

$$R = \sqrt{R_D^2 + W^2 (\cos^2(\pi/2 - 3\varphi/2) - 1)} - W \cdot \cos(\pi/2 - 3\varphi/2), \quad (4.64)$$

де  $R$  – відстань від осі обертання валка до його поверхні, м;  $R_D$  – радіус дуги, м;  $W$  – ексцентриситет дуги відносно центру обертання валка, м;  $\varphi$  – кут обертання валка, рад (при розрахунках приймали  $0 \leq \varphi \leq \pi/3$ ).

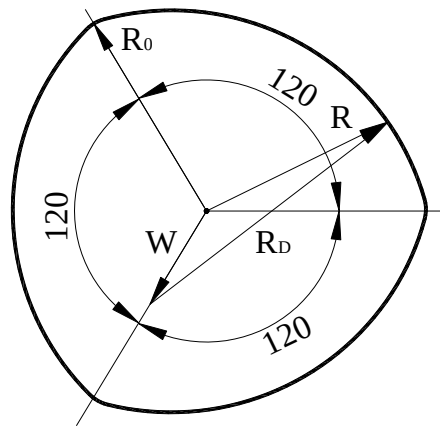


**Рис. 4.18. Схема побудови профілю Рело**

При розрахунку конструктивних параметрів валків профілю Рело за вихідні параметри обираємо базовий радіус (радіус заготовки, з якої виготовляють профіль Рело)  $R_0$  і ексцентриситет  $W$ , яким будемо варіювати.

Радіус дуги  $R_D$  визначається геометрично з рис. 4.18 і дорівнює:

$$R_D = \sqrt{(0,5 \cdot R_0 + W)^2 + 0,75 \cdot R_0^2}. \quad (4.65)$$

Таким чином, на основі сказаного вище, можна стверджувати, що основними конструктивними параметрами валків, виготовлених за профілем Рело, є: радіус базової заготовки  $R_0$ , з якої отримують профіль Рело, та ексцентриситет дуги відносно центру обертання валка  $W$ .

Через те, що виробництво валків профілю Рело є досить складним процесом, а тому й дорого коштує, перед їх виготовленням необхідно математично описати вплив конструктивних параметрів валків на процес

руйнування зв'язків між витягнутими конгломератами орієнтованих сферолітів під час проходження попередньо витягнутого полімерного матеріалу між ними.

Деформація полімерного матеріалу між валками, виготовленими за профілем Рело, можлива у разі відсутності ковзання матеріалу по поверхні валків. Таким чином сили, що притискають полімерний матеріал між валками мають бути завжди більшими за сили, які викликають напруження зсуву в матеріалі, тобто:  $F_2 \leq Q_{zc}$ .

Згідно до [80] визначимо силу, яка забезпечує необхідне притискання полімерного матеріалу до бічної поверхні валків профілю Рело:

$$F_2 = 4f \cdot E_2 \cdot \left(1 - e_{\text{пр}}^{\text{max}} / h_1\right) \cdot \sin\left(\arccos\left[1 - 0,5 \cdot \left(h_1 - e_{\text{пр}}^{\text{max}}\right) / R\right]\right), \quad (4.66)$$

де  $E_2$  – в'язкопружний модуль поперек напрямку орієнтації структури полімеру, Па, визначається з рівняння (2.100);  $h_1$  – початкова товщина полімеру, м;  $e_{\text{пр}}^{\text{max}}$  – максимальна міжвалкова відстань, м;  $f$  – коефіцієнт тертя полімеру по поверхні валків.

З рівнянь (4.63) та (4.64) встановлено, що найбільша міжвалкова відстань між валками Рело будь-якої форми досягається в положенні при куті  $\varphi = \pi/6$ . Враховуючи сказане вище, отримаємо вираз для визначення максимальної міжвалкової відстані:

$$e_{\text{пр}}^{\text{max}} = R_D - 0,4 \cdot W + \sqrt{R_D^2 - W^2} - 2\sqrt{R_D^2 - 0,5 \cdot W^2} + e_{\text{пр}}^{\text{min}}, \quad (4.67)$$

де  $e_{\text{пр}}^{\text{min}}$  – мінімальна міжвалкова відстань (положення валків при  $\varphi = 0$ ), що вибирається конструктивно і залежить від початкової товщини полімеру (рис. 4.19), м.

Порівнюючи силу притискання з зусиллям, що викликають напруження зсуву, визначимо умову, яку необхідно виконати для забезпечення захвату та деформації полімерного матеріалу:

$$\varphi \leq 4f \cdot \frac{E_2}{\nu_{12} G_{12}} \cdot \left(1 - e_{\text{пр}}^{\text{max}} / h_1\right) \cdot \sin\left(\arccos\left[1 + 0,5 \cdot \left(h_1 + e_{\text{пр}}^{\text{max}}\right) / R_0\right] + \frac{\pi}{3}\right), \quad (4.68)$$

де  $G_{12}$  – в'язкопружний модуль при поперечному зсуві, визначається з рівняння (2.117), Па.

На основі отриманих вище рівнянь побудовані графіки залежності кута положення валків профілю Рело, при якому забезпечується захват і деформація полімеру, від товщини та мінімальної міжвалкової відстані (рис. 4.20).

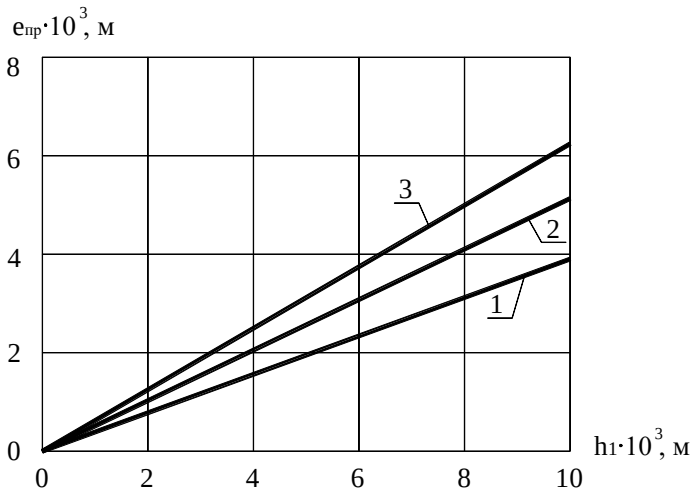


**Рис. 4.19. Залежності міжвалкової відстані від початкової товщини полімеру:** 1 –  $R_0 = 0,06$  м,  $W = 0,03$  мм;  
2 –  $R_0 = 0,06$  м,  $W = 0,05$  мм;  
3 –  $R_0 = 0,04$  м,  $W = 0,03$  мм

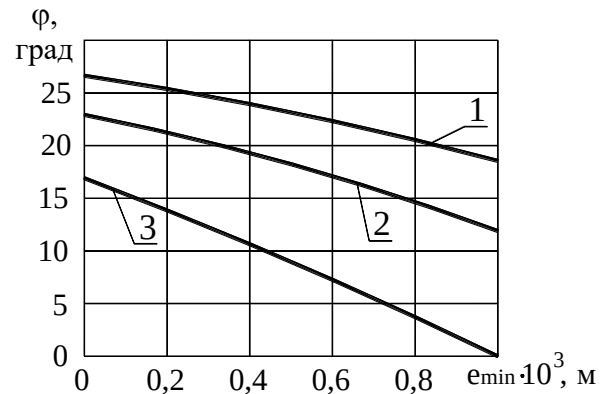


**Рис. 4.20. Графіки залежності деформації зсуву від ступеня витягування для ПЕТФ (3), ПП (2) та ПЕ (1)**

Із наведених графіків (рис. 4.19) видно, що товщина полімерного матеріалу визначає мінімальну міжвалкову відстань, яка має забезпечити затягування полімеру в міжвалковий простір і унеможливити його ковзання по поверхні валків. Відстань між валками, що забезпечує максимальну деформацію стиску  $\varepsilon_{cm} = 0,43$  [248], при заданих конструктивних параметрів валків ( $R_0 = 0,06$  м,  $W = 0,05$  м), становить  $e_{np} = 2,8 \cdot 10^{-3}$  м. Якщо радіус вершин буде вдвічі більший за відстань від вісі обертання до поверхні валка ( $R_0 = 0,06$  м,  $W = 0,03$  м), то мінімальна відстань між валками має становити  $e_{np} = 3,25 \cdot 10^{-3}$  м.

Отримані залежності мінімальної міжвалкової відстані від початкової товщини полімерних відходів і кута їх захвату, а також деформації від мінімальної міжвалкової відстані та початкової товщини полімерних відходів можна використовувати для визначення раціональних параметрів пристрою із валками профілю Рело.



Під час проходження полімерного матеріалу між валками, виготовленими за профілем Рело, крім стиску спостерігається зсув його шарів. Як видно з рис. 4.21, в результаті різних швидкостей точок профілю Рело шари полімерного матеріалу розтягуються по-різному.

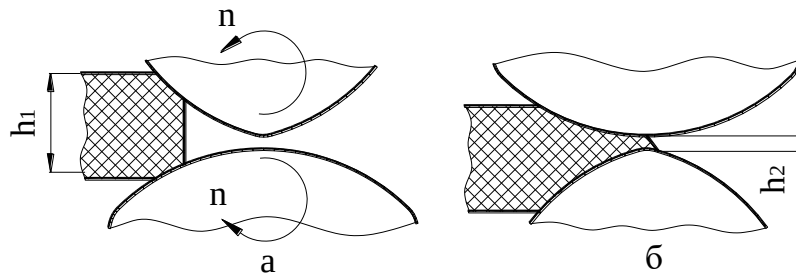


**Рис. 4.21. Схема для визначення деформації зсуву: а – деформація стиску; б – деформація стиску і зсуву**

Деформація розтягу верхнього шару полімерного матеріалу менша за деформацію розтягу нижнього шару, що приводить до виникнення зсувних деформацій. Оскільки радіус точок поверхні верхнього і нижнього валків, між якими затиснутий полімерний матеріал, різний і постійно змінюється, то зсувні деформації виникають поперемінно у двох напрямках (рис. 4.22).

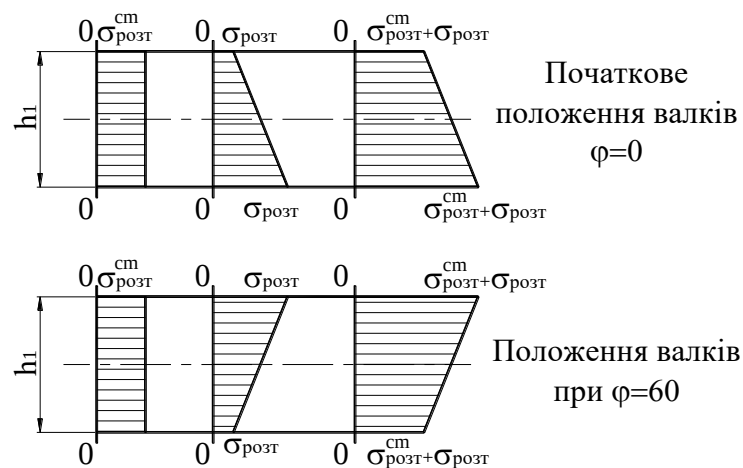


**Рис. 4.22. Епюра внутрішніх напружень, що виникають у полімері**

Такий складний напружено-деформований стан, що створюється в полімерному матеріалі під час проходження його між валками, руйнує поперечні зв'язки між витягнутими конгломератами орієнтованих сферолітів [215].

На рис. 4.22 наведено епюру напружень, що створюють в полімерному матеріалі складний напружено-деформований стан. Напруження розтягу  $\sigma_{розт}^{ст}$  з'являються в матеріалі при дії напружень стиску, які забезпечують пересування полімерного матеріалу між валками.

Деформацію поздовжнього зсуву шарів полімерного матеріалу визначимо з такого рівняння (рис. 4.21):

$$\gamma = (s_2 - s_1)/h_2, \quad (4.69)$$

де  $s_1, s_2$  – переміщення, відповідно, верхнього та нижнього шарів полімерного матеріалу, м;  $h_2$  – товщина полімерного матеріалу під час зсуву, м.

Елементарні переміщення шарів  $ds_1, ds_2$  з врахуванням виразів (4.63) та (4.64) будемо визначати з таких рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} ds_1 &= \left[ \sqrt{R_D^2 + W^2 (\cos^2(3\varphi/2) - 1)} - W \cdot \cos(3\varphi/2) \right] \cdot d\varphi, \\ ds_2 &= \left[ \sqrt{R_D^2 + W^2 (\cos^2(\pi/2 - 3\varphi/2) - 1)} - W \cdot \cos(\pi/2 - 3\varphi/2) \right] \cdot d\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (4.70)$$

Проінтегрувавши рівняння (4.70) по  $\varphi$  від 0 до  $\pi/3$  та підставивши отримані вирази (4.69) визначимо залежність максимальної деформації зсуву від конструктивних і технологічних параметрів валкового пристрою:

$$\gamma = \frac{\sqrt{4\left(\frac{R_D}{W}\right)^2 - 3} \cdot \left[ \left( \frac{R_D}{W} - 1 \right) \ln \left( \frac{3}{4} - \left( \frac{R_D}{W} + 1 \right) + K \right) + 2\sqrt{3} \left( K + \frac{1 - \frac{R_D}{W}}{2} \ln \left( \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{R_D}{W} + 1}{2} + K \right) \right) \right]}{h_1 \cdot \left[ \left( \frac{1 - \frac{R_D}{W}}{2} \right) \cdot \ln \left( \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{R_D}{W} + 1}{2} + K \right) + K \right]}, \quad (4.71)$$

де  $K = \frac{1}{2} \sqrt{4\frac{R_D}{W} - \left(\frac{R_D}{W} + 1\right) \cdot 2\sqrt{3} + 3}$  – функція, що характеризує кривизну валків профілю Рело і залежить від ексцентриситету дуги відносно центра обертання валків профілю Рело (рис. 4.23).

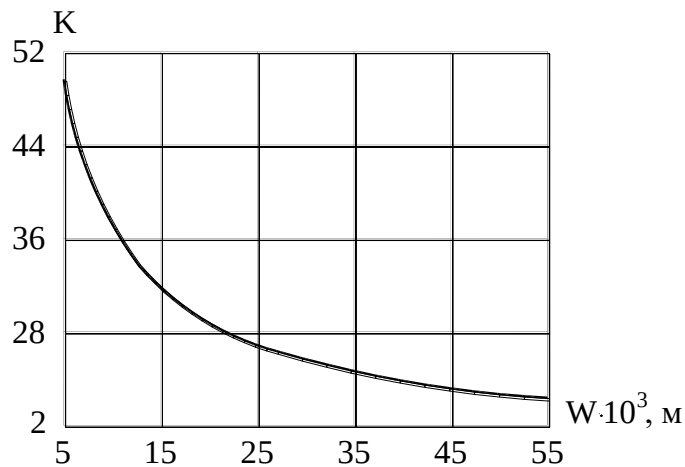


**Рис. 4.23. Залежність кривизни поверхні валків профілю Рело від ексцентриситету дуги відносно центра їх обертання**

Як видно з рис. 4.23, збільшення ексцентриситету дуги  $W$  відносно центра обертання валків зменшує їх кривизну, що може призвести до проковзування матеріалу, що оброблюється.

Таким чином, рівняння (4.71) дозволяє підбирати такі конструктивні параметри валків, виготовлених за профілем Рело, які забезпечують виникнення необхідної деформації у полімерному матеріалі, при якій руйнуються зв'язки між витягнутими конгломератами орієнтованих сферолітів.

На рис. 4.24 представлені залежності максимальної деформації зсуву полімерного матеріалу, що перероблюється, від ексцентриситету дуги відносно центра обертання валка.

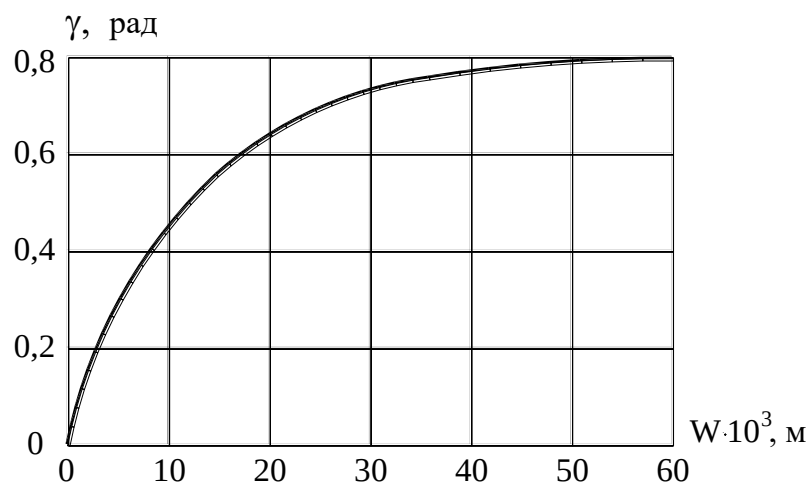


**Рис. 4.24. Залежність деформації зсуву від ексцентриситету дуги  $W$  для поліетиленової плівки**

Як видно з рис. 4.24 при базовому радіусі  $R_0$ , що дорівнює 0,068 м, збільшення ексцентриситету дуги відносно центра обертання валка (рис. 4.18) з 0,01 м до 0,04 м дозволяє отримати максимальний відносний зсув полімерного матеріалу  $\gamma = 0,78$ , товщиною 0,002 м. Подальше зростання ексцентриситету дуги майже не збільшує деформацію зсуву полімерного матеріалу.

#### 4.5. Динамічний розрахунок пристрою із валками профілю Рело

Потужність, що споживається валковим пристроєм, залежить від крутного моменту, який створюється приводом на валках. Через велику кількість факторів, що впливають на крутний момент і, відповідно, на потужність, на сьогодні не має закінченої і надійної методики розрахунку енергії. Хоча є різноманітні методики розрахунку крутного моменту (потужності), що ґрунтуються на теорії пластичної або в'язкопружної деформації.

Потужність, що споживається валками, залежить від таких факторів, як: властивості і температура полімерного матеріалу, що оброблюється; колові швидкості валків; величина зазору між валками; геометрична форма та розмір валків.

Розглянемо вплив основних факторів на споживання енергії валками. Так, зростання колової швидкості приводить до збільшення об'єму полімерного матеріалу, що деформується між валками, виготовленими за профілем Рело, і, відповідно, до збільшення роботи деформації. Крім того, зміна колової швидкості валків впливає також на швидкість деформації. При пружній деформації, величина якої не залежить від часу, це не відіграє суттєвої ролі, але для високоеластичної і особливо для пластичної деформації зі змінною часу зростають навантаження на валки, виготовлені за профілем Рело, що призводить до зростання споживання потужності.

При збільшенні фрикції зростає об'єм полімерного матеріалу, що деформується, і швидкість деформації, та відповідно, збільшуються споживана потужність і продуктивність.

Збільшення зазору може призвести до зростання споживання потужності, однак зростання потужності буде відставати від збільшення зазору. Це пояснюється тим, що, з одного боку, збільшення зазору приводить до зростання об'єму полімерного матеріалу, що проходить через зазор, а це, у свою чергу, збільшує роботу деформації. З іншого боку, зі збільшенням зазору зменшується величина лінійного обтиску, що зменшує роботу деформації.

Слід відзначити періодичність дії валків, виготовлених за профілем Рело, на верхній та нижній шари полімерного матеріалу, що оброблюється. При періодичній дії валків споживання енергії валками може різко змінюватися в часі. Наприклад, у перший період роботи навантаження на нижньому валку може у 2-3 рази перевищувати навантаження на верхньому валку. Тут момент, який необхідний для подолання опору деформації полімерного матеріалу, будемо розраховувати за роботою пластичної чи в'язкопружної деформації матеріалу між валками або за силами тиску на валки полімерного матеріалу, що оброблюється.

У першому випадку [80] не враховується робота сил тертя між поверхнею валків і полімерним матеріалом, тому результати розрахунку, порівняно із запропонованим нами варіантом, в якому враховуються сили тиску, можуть бути дуже заниженими. Для визначення моментів і потужності будемо розраховувати валковий пристрій за силами тиску полімерного матеріалу, що оброблюється, на валки, виготовлені за профілем Рело. При переробці полімерного матеріалу в цьому валковому пристрої потужність буде витрачатися на подолання сил тертя, на деформацію стиску, на деформацію розтягу матеріалу (верхній та нижній шари матеріалу розтягуватимуться по-різному).

Враховуючи сказане вище, визначимо повний крутний момент валкового пристрою:

$$T = T_p + T_c + T_m, \quad (4.72)$$

де  $T_p$  – момент сил, що викликають максимальний розтяг полімерного матеріалу (шар матеріалу, дотичного до нижнього валка (рис. 4.17)), Н·м;  $T_c$  – момент сил, що викликають стиск полімерного матеріалу, Н·м;  $T_m$  – момент сил тертя, Н·м.

Розглянемо дію напружень у зоні взаємодії полімерного матеріалу із виступом валка, виготовленого за профілем Рело. Весь процес цієї взаємодії розіб'ємо на два етапи.

На першому етапі відбувається стиск полімерного матеріалу (рис. 4.19). Стискувальні сили створюють зусилля, що діє на вершинах валка:

$$P_1 = 2P_p \cos(\alpha/2), \quad (4.73)$$

де  $P_p$  – сила, що викликає максимальну деформацію розтягу в шарі полімерного матеріалу, дотичного до нижнього валка (рис. 4.17), Н;  $\alpha$  – кут між вершинами профілю Рело.

Обертаючись, валки профілю Рело впливають на полімерний матеріал змінними навантаженнями. Максимальна деформація полімерного матеріалу спостерігається на вершинах валків. У подальших розрахунках будемо враховувати вплив сили, що викликає максимальну деформацію полімерного матеріалу, тобто будемо вважати, що максимальні зусилля при обробці полімерного матеріалу у валковому пристрої виникатимуть на вершинах валка.

Площу розтягу нижнього шару полімерного матеріалу, обмеженого кривою  $R \cdot d\varphi$  і товщиною матеріалу  $dh$ , знайдемо з такого виразу:

$$dS_1 = R \cdot d\varphi \cdot dh, \quad (4.74)$$

де  $d\varphi$  – зміна кута обертання валків профілю Рело;  $dh$  – зміна товщини полімерного матеріалу, м.

На площі  $dS_1$  полімерного матеріалу діє сила  $dP_p$ , яку знайдемо з такого виразу:

$$dP_p = \sigma_p \cdot R \cdot d\varphi \cdot dh, \quad (4.75)$$

де  $\sigma_p$  – напруження розтягу, Па.

Ця сила має однакові значення по обидва боки вершини валків і створює силу опору, що перешкоджає їхньому обертанню:

$$dP_P = 2\sigma_p \cdot \cos(\alpha/2) \cdot R \cdot d\varphi \cdot dh. \quad (4.76)$$

Момент, що створюється силою  $dP_p$ , яка викликає максимальний розтяг полімерного матеріалу (шар матеріалу, дотичного до нижнього валка (рис. 4.17)), можна визначити за таким рівнянням [247, 248]:

$$dT_p = \sigma_p \cdot R^2 \sin \varphi \cdot d\varphi \cdot dh. \quad (4.77)$$

Проінтегруємо рівняння (4.77) за  $\varphi$  на інтервалі від 0 до  $\pi/3$  та за  $h$  на інтервалі від  $h_1$  до  $h_2$ :

$$\begin{aligned} T_p &= \sigma_p \cdot R^2 \cos(\pi/3) \cdot (h_2 - h_1) - \sigma_p \cdot R^2 \cos 0 \cdot (h_2 - h_1) = \\ &= 0,5 \cdot \sigma_1 \cdot R^2 \cdot h_1 \cdot \nu \cdot \varepsilon_1 = 0,5 \cdot \sigma_1 \cdot h_1 \cdot \nu \cdot \varepsilon_1 \cdot \left( 0,5 \cdot \sqrt{(R_0 + 2W)^2 + 3R_0^2} - W \right)^2, \end{aligned} \quad (4.78)$$

де  $R_0$  – базовий радіус заготовки, з якої виготовляється валок профілю Рело, м;  $W$  – ексцентриситет дуги відносно центра обертання валка, м;  $\sigma_p$  – максимальні напруження розтягу полімеру в напрямку поперечному до попередньої орієнтації, Па (визначається з рівняння (3.50));  $\varepsilon_p$  – відносна деформація розтягу шару полімеру, дотичного до нижнього валка (рис. 4.21).

Обертаючись на кут  $\varphi_1$  (рис. 4.17), зубчасті валки стискають витягнутий попередньо полімерний матеріал.

Площу стиску полімерного матеріалу, що обмежується кривою  $R \cdot d\varphi$  і довжиною поверхні дотику між полімером і валком, виготовленим за профілем Рело,  $l$ , можна визначити з такого рівняння:

$$dS_2 = R \cdot l \cdot d\varphi = R_0 \cdot l \cdot d\varphi, \quad (4.79)$$

де  $l$  – довжина валка, виготовленого за профілем Рело, м.

Силу, що діє на площі  $dS_2$  перпендикулярно до бічної поверхні валка, стискаючи тим самим полімерний матеріал, визначимо з такого рівняння:

$$dP_c = \sigma_c \cdot l \cdot R \cdot d\varphi = \sigma_c \cdot l \cdot R_0 \cdot d\varphi. \quad (4.80)$$

Сила  $dP_c$  створює силу опору обертанню валка  $dP_2$  та вісьову силу  $dP_{ax}$ , орієнтовану вздовж вісі обертання валка. Вісьова сила діє на бічних поверхнях валка, тобто її складові, діючи на протилежних поверхнях в одному напрямку, взаємно компенсуються, тому вона не створюватиме момент.

Стискувальний момент, що створюється силою опору обертанню валка  $dP_2$ , відповідно до [247, 248], визначимо таким чином:

$$dT_{cm} = -\sigma_{cm} \cdot l \cdot R^2 \sin \varphi d\varphi. \quad (4.81)$$

Проінтегруємо рівняння (4.81) за  $\varphi$  на інтервалі від 0 до  $\pi/3$ :

$$\begin{aligned} T_{cm} &= -\left(\sigma_{cm} \cdot R^2 \cos(\pi/3) \cdot l - \sigma_{cm} \cdot R^2 \cos 0 \cdot l\right) = 0,5 \cdot \sigma_{cm} \cdot R^2 \cdot l = \\ &= 0,5 \cdot \sigma_{cm} \cdot l \cdot \left(0,5 \cdot \sqrt{(R_0 + 2W)^2 + 3R_0^2} - W\right)^2, \end{aligned} \quad (4.82)$$

де  $\sigma_{cm}$  – нормальні напруження стиску (рис. 4.17), що створюються валками Рело в полімерних відходах (визначається з рівняння (3.50)), Па.

Тертя між полімерним матеріалом і валками, виготовленими за профілем Рело, з'являється в момент торкання полімеру до поверхні валка. З метою зменшення проковзування полімерного матеріалу на вершинах валків нарізані насічки, які зачіплюють матеріал і затягують його в міжвалковий простір.

Під час розтягу полімерного матеріалу між валками, виготовленими за профілем Рело, на бічній поверхні валка виникає сила тертя. Визначимо сили тертя на бічній поверхні валка, що викликані стиском і розтягом полімерного матеріалу:

– розтяг полімеру:

$$dF_1 = 2 f \sigma_p R \cdot \cos(\alpha/2) d\varphi dh, \quad (4.83)$$

– стиск полімеру:

$$dF_2 = 2 f \sigma_{cm} l \cdot R d\varphi, \quad (4.84)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя полімерного матеріалу по сталі;  $R$  – відстань від поверхності валка профілю Рело до вісі його обертання, м (визначається з рівняння (4.63), (4.64) з урахуванням виразу (4.65)).

Момент від сил тертя  $dF_1$ ,  $dF_2$ , що створюється на поверхні валка, визначимо з такого рівняння:

$$dT_m = f \sigma_p R^2 d\varphi dh + 2 f \sigma_{cm} \cdot l R d\varphi. \quad (4.85)$$

Проінтегруємо рівняння (4.85) за  $h$  на інтервалі від  $h_1$  до  $h_2$ :



$$T_m = \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{3}} \int_{h_1}^{h_2} f \sigma_p R^2 \cdot d\varphi dh + \int_0^{\frac{\pi}{3}} 2 f \sigma_{cm} R \cdot l d\varphi =$$

$$= f \sigma_p \cdot R^2 \cdot \pi/3 \cdot (h_2 - h_1) + f \sigma_{cm} \cdot R \cdot \pi/3 \cdot l, \quad (4.86)$$

де  $h_2 = h_1(1 - \nu \varepsilon_p)$  – товщина полімерного матеріалу після проходження між валками, виготовленими за профілем Рело, м;  $l$  – довжина валків, м.

З рівняння (4.86) одержимо вираз для моменту тертя на поверхні валка:

$$T_m = \frac{f \cdot R \cdot \pi}{3} \cdot (\sigma_{cm} l - 0,5 \cdot \sigma_p \cdot R \cdot \varepsilon_p \nu \cdot h_1) = f \cdot \left( 0,5 \cdot \sqrt{(R_0 + 2W)^2 + 3R_0^2} - W \right) \cdot \pi/3 \times$$

$$\times \left( \sigma_{cm} l - 0,5 \cdot \sigma_p \cdot \varepsilon_p \nu \cdot h_1 \cdot \left( 0,5 \cdot \sqrt{(R_0 + 2W)^2 + 3R_0^2} - W \right) \right) \quad (4.87)$$

Повний момент корисних і шкідливих опорів на валку визначимо з рівняння (4.85), враховуючи вирази (4.86) та (4.87), запишеться таким чином:

$$T = \frac{R_0^2}{2} (\sigma_p \cdot h_1 \cdot \nu \cdot \varepsilon_p + \sigma_{cm} \cdot l) + \frac{f \cdot R_0 \cdot \pi}{3} \cdot \left( \sigma_{cm} l - \frac{\sigma_p \cdot R_0 \cdot \varepsilon_p \nu}{2} \cdot h_1 \right) =$$

$$= \left( \frac{1}{2} \sqrt{(R_0 + 2W)^2 + 3R_0^2} - W \right)^2 \cdot \frac{3 \cdot (\sigma_p \cdot h_1 \cdot \nu \cdot \varepsilon_p + \sigma_{cm} \cdot l) - \sigma_p \cdot f \cdot \pi \cdot \varepsilon_p \nu \cdot h_1}{6} \quad (4.88)$$

$$+ \left( \frac{1}{2} \sqrt{(R_0 + 2W)^2 + 3R_0^2} - W \right) \cdot \frac{f \cdot \pi \cdot \sigma_{cm} l}{3}.$$

Як видно з рівняння (4.88), залежність повного моменту корисних і шкідливих опорів на валку від базового радіуса валка є квадратичною, тобто незначне збільшення базового радіуса валка призведе до суттєвого збільшення моменту, а отже, й потужності, що витрачається на переробку полімерних відходів.

Тоді потужність, що витрачається на створення обертового моменту при рівномірному русі, дорівнюватиме:

$$N = T \cdot \omega / \eta, \quad (4.89)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії пристрою (експериментально обґрунтоване значення  $\eta = 0,65$ );  $\omega = \pi n / 30$  – кутова швидкість обертання валків, рад<sup>-1</sup>;  $n$  – частота обертання валків, хв<sup>-1</sup>.

Підставляючи вираз (4.88) в рівняння (4.89), отримаємо потужність, яку витратиме перероблювальний пристрій з валками профілю Рело:

$$N = \frac{\pi n}{30 \cdot \eta} \cdot \left( \left( \frac{1}{2} \sqrt{(R_0 + 2W)^2 + 3R_0^2} - W \right)^2 \cdot \left[ \frac{3 \cdot (\sigma_p \cdot h_1 \cdot \nu \cdot \varepsilon_p + \sigma_{cm} \cdot l)}{6} - \frac{\sigma_p \cdot f \cdot \pi \cdot \varepsilon_p \cdot \nu \cdot h_1}{6} \right] + \frac{f \cdot \pi \cdot \sigma_{cm} \cdot l}{3} \cdot \left( \frac{1}{2} \sqrt{(R_0 + 2W)^2 + 3R_0^2} - W \right) \right) \quad (4.90)$$

Отримана залежність пов'язує витрати потужності пристрою із валками профілю Рело з його конструктивними та технологічними параметрами. Це рівняння дозволяє проаналізувати вплив параметрів перероблювального пристрою з валками профілю Рело на енергетичні витрати (рис. 4.25), що йдуть на руйнування попередньо орієнтованої структури полімерного матеріалу, а саме на розрив зв'язків між конгломератами кристалітів у витягнутій структурі полімеру.

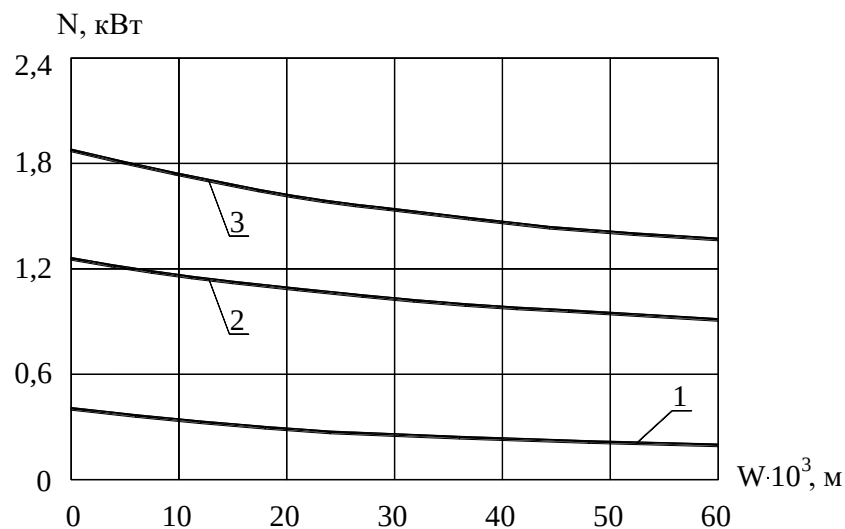


**Рис. 4.25. Залежності потужності від ексцентриситету валків Рело:**  
**1 – поліетилен; 2 – поліамід; 3 – поліетилентерефталат**

Як видно з рис. 4.25, залежність потужності, що витрачається валковим пристроєм на переробку полімерного матеріалу, від ексцентриситету валків профілю Рело є близькою до лінійної. Так, збільшення ексцентриситету з 10 мм до 40 мм при переробці поліаміду, поліетилену та поліетилентерефталату дозволить зменшити витрати енергії на 15 %. Тому при проектуванні перероблювального пристрою з валками профілю Рело необхідно враховувати енергетичні витрати і проводити оптимізацію конструктивних та технологічних параметрів пристрою з урахуванням якості, продуктивності та енергоефективності процесу переробки.

#### 4.6. Проектування обладнання для переробки полімерних відходів

У попередніх підрозділах цього розділу було отримано аналітичні залежності, що пов'язують конструктивні та технологічні параметри пристрою із зубчастими валками та пристрою з валками профілю Рело з енергетичними витратами, продуктивністю цих пристроїв та якістю перероблених полімерних відходів. Якість переробленого матеріалу визначається ступенем орієнтації структури отриманих фрагментів полімеру та їх формою. На основі цих залежностей було визначено найбільш раціональні конструктивні та технологічні параметри валкових пристроїв та спроектовано обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості.

На рис. 4.26 представлено загальний вигляд пристрою для переробки полімерних відходів.

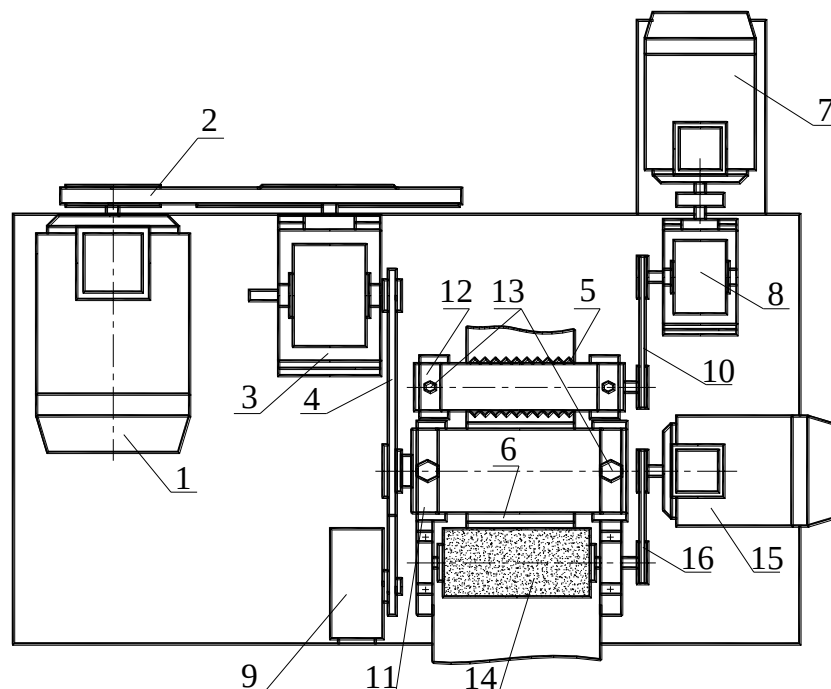


**Рис. 4.26. Пристрій для переробки відходів полімеру:**

- 1, 7, 15 – електродвигун; 2 – пасова передача; 3, 8 – редуктор черв'ячний;  
4, 10, 16 – ланцюгова передача; 5 – зубчастий валковий пристрій;  
6 – пристрій валковий з профілем Рьоло; 9 – натяжний пристрій;  
11, 12 – стійки; 13 – упорні болти; 14 – голкофреза**

Він складається з електродвигуна 1 (потужність  $N = 1,5$  кВт, частота обертання вала двигуна  $n = 3000$  об/хв); пасової передачі 2, шків якої виконано з можливістю зміни швидкості обертання; черв'ячного редуктора 3 (передаточне число  $u = 25$ ); ланцюгової передачі 4 (ПР-12,7-1800-1, крок 12,7 мм, навантаження 18000 Н); натяжного пристрою 9; пристрою з зубчастими валками 5; пристрою з валками типу Рело 6.

Для руйнування структури полімерного матеріалу використовувався пристрій із зубчастими валками та пристрій з валками профілю Рело. Зубчасті валки отримують обертання від електродвигуна 7 через черв'ячну 8 і ланцюгову 10 передачі, а валки профілю Рело отримують обертання через пасову передачу 2, редуктор (черв'ячний) 3 та ланцюгову передачу 3. Ланцюги передач 3 та 10 обходять зірочки верхнього і нижнього валків обох пристроїв з різних боків, тому валки пристроїв 5 і 6 обертаються в протилежних напрямках, що забезпечує затягування полімерного матеріалу у міжвалковий простір.

#### 4.6.1. Розрахунок параметрів і проектування пристрою із зубчастими валками

Кожен із зубчастих валків має 10 впадин і 10 зубців (рис. 4.27), які зчіплюються між собою.

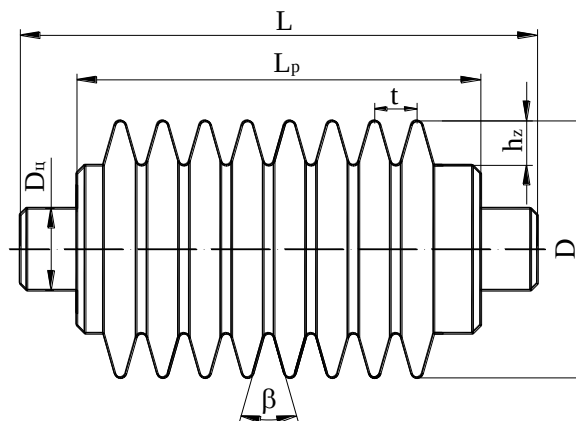


Рис. 4.27. Схема для визначення конструктивних параметрів зубчастих валків

Параметри зубчастих валків розраховано відповідно до методу, наведеного в підрозділі 4.2 цього розділу. Крок зубців визначався з виразу (4.9), а кут їх профілю – з виразу (4.12). Максимальний коефіцієнт тертя між поліетиленом, поліпропіленом і полівінілхлоридом та поверхнею зубців приймемо таким, що дорівнює  $f = 0,8$ ; товщину полімерного матеріалу приймемо 1, 3, 5, 8 мм, а відносну деформацію  $\varepsilon_1$ , при якій структура полімеру зміниться, тобто відбудеться пластичне послаблення матеріалу поперек його розтягу, приймемо таким, що дорівнює 0,6; 0,8 і 0,9.

Підставивши наведені вище дані в рівняння (4.12), отримаємо значення кута профілю зубців:  $\beta = 77^\circ$ ,  $68^\circ$  та  $64^\circ$ . З урахуванням того, що збільшення кута профілю зубців приводить до зменшення енергетичних витрат, та для забезпечення великих деформацій полімерного матеріалу приймемо  $\beta = 70^\circ$ .

За відомим кутом профілю зубців за допомогою рівняння (4.9) розрахуємо крок зубців при різних параметрах товщини полімерного матеріалу (табл. 4.1)

Таблиця 4.1

Крок зубців валкового пристрою при різних товщині полімеру

| Товщина полімеру, мм | 1   | 3   | 5   | 8    |
|----------------------|-----|-----|-----|------|
| Крок зубців, мм      | 2,7 | 5,2 | 8,6 | 12,8 |

У зв'язку з тим, що діапазон товщини полімерних відходів легкої промисловості є досить широким та враховуючи розподіл полімерних відходів за їх товщиною, попередньо приймемо такий крок зубців  $t = 6,5$  мм.

Отже, розрахований крок та кут профілю зубців забезпечують потрібний розтяг полімерного матеріалу, при якому його структура змінюється, а саме відбувається витягування та орієнтація сферолітів та їх конгломератів. У результаті цього відбувається пластичне послаблення структури полімерного матеріалу в поперечному до витягування напрямку.

З рівняння (4.6) знайдемо висоту зубців:

$$h_z = 0,5 \cdot (t - \kappa) / \operatorname{tg}(\beta/2) = 0,5 \cdot (6,5 - 2,5) / \operatorname{tg}(70/2) = 5,7 \text{ мм},$$

де  $k$  – ширина площадки заокруглення вершин зубців, яка приймається конструктивно, м. Для проектних розрахунків ширина площадки заокруглення вершин зубців була прийнята такою, що дорівнює 2,5 мм, а висота зубців – 5,7 мм.

Радіус заокруглення зубців розраховувався з рівняння (4.14).

Таблиця 4.2

Значення радіуса заокруглення зубців при різних деформації розтягу  
та товщині полімерного матеріалу

| $h_1$ , мм      | 1   |     |     | 3   |     |     | 5   |     |     | 8   |     |     |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\varepsilon_p$ | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,9 |
| $r$ , мм        | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 2,5 | 1,9 | 1,7 | 4,2 | 3,1 | 2,8 | 6,7 | 5,0 | 4,4 |

У зв'язку з тим, що діапазон товщини полімерних відходів легкої промисловості є досить широким, та враховуючи розподіл полімерних відходів за їх товщиною, попередньо приймемо такий радіус заокруглення зубців  $r = 3$  мм.

Затягування полімерного матеріалу зубчастими валками буде відбуватися, якщо зусилля, що затягує,  $Q$  більше за силу відштовхування  $F_R$  від поверхні валка, тобто:

$$Q = F_t \cdot \cos \varphi_o \geq F_R = N_R \cdot \sin \varphi_o, \quad (4.91)$$

де  $N_R$  – сила відштовхування полімеру від поверхні валка (або сила реакції валка на тиск полімеру), Н;  $F_t$  – сила тертя між полімерним матеріалом і поверхнею зубчастого валка, Н;  $\varphi_o$  – кут охоплення полімером зубчастого валка.

З рівняння (4.91) отримаємо:  $\varphi_o \leq \psi$ , де  $\psi = \arctg f$ ,  $f$  – коефіцієнт тертя.

Використовуючи рівняння (4.23) та проводячи деякі його перетворення, визначимо діаметр зубчатих валків  $D$ :

$$D = [h_z + \varepsilon_{cm} h_1] / [1 - \cos \varphi_o], \quad (4.92)$$

де  $\varepsilon_{cm} = (h_1 - h_2) / h_1$  – деформація стиску полімерного матеріалу;  $h_2$  – товщина полімерного матеріалу після його проходження між зубчастими валками, м.

Якщо в рівнянні (4.92) замість кута охоплення полімером зубчастого валка  $\varphi_o$  підставити вираз для кута тертя  $\arctg f$ , то отримаємо мінімальний діаметр

зубчастих валків, при якому відбувається зтягування полімерного матеріалу в міжвалковий простір:

$$D = \frac{h_z + \varepsilon_{cm} h_1}{1 - \cos(\arctg f)}. \quad (4.93)$$

Використовуючи вираз (4.93) розрахуємо значення діаметрів валків залежно від таких параметрів: коефіцієнта тертя ( $f = 0,8$ ), висоти зубців ( $h_z = 5,7$  мм), деформації стиску ( $\varepsilon_{cm} = 0,4; 0,6; 0,8$ ) та початкової товщини полімеру ( $h_1 = 1, 3, 5, 8$  мм). Результати розрахунку наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Значення радіуса зубчастих валків від деформації стиску  
та початкової товщини полімеру

| $h_1$ , мм         | 1,0  |      |      | 3,0  |      |      | 5,0  |      |      | 8,0  |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\varepsilon_{cm}$ | 0,2  | 0,4  | 0,6  | 0,2  | 0,4  | 0,6  | 0,2  | 0,4  | 0,6  | 0,2  | 0,4  | 0,6  |
| $R$ , мм           | 48,4 | 49,8 | 51,2 | 54,0 | 58,2 | 62,4 | 59,6 | 66,5 | 73,6 | 68,2 | 80,0 | 90,5 |

З метою більш надійного зтягнення полімеру в міжвалковий простір, а також враховуючи, що полімерний матеріал може бути вологим, приймемо коефіцієнт тертя  $f = 0,5$ . Тоді діаметр зубчастого валка буде дорівнювати  $D = 122$  мм.

За результатами наведених вище розрахунків та для проведення перевірочних і уточнювальних експериментальних досліджень було виготовлено зубчасті валки.

#### 4.6.2. Розрахунок параметрів і проектування пристрою із валками профілю Рело

Кожен із валків профілю Рело має подібну до трикутника форму (рис. 4.28). Валки обертаються таким чином, що відстань між їхніми вісями не змінюється. Базовий радіус  $R_0$  валка профілю Рело приймаємо таким, що дорівнює радіусу зубчастого валка, тобто  $R_0 = 61$  мм.

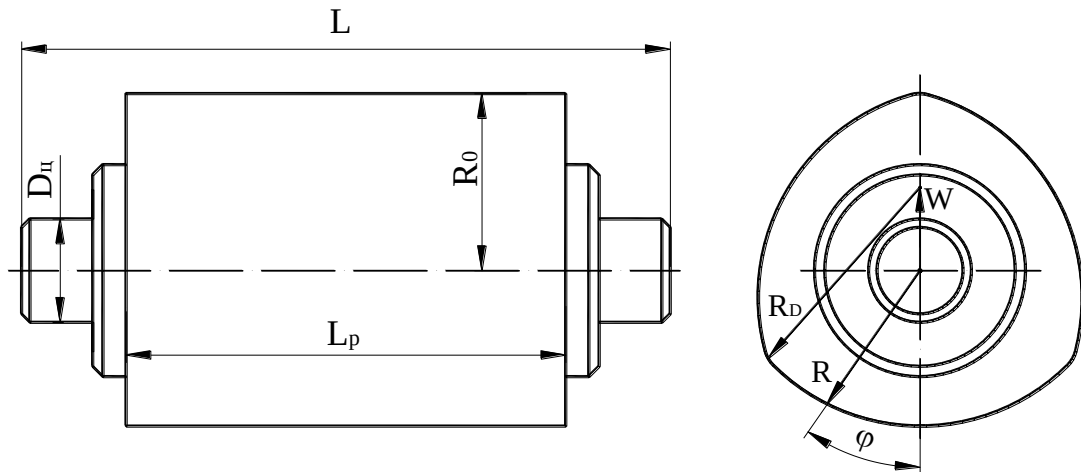


**Рис. 4.28. Схема для визначення конструктивних параметрів валків Рело**

Параметри валків розраховувалися відповідно до методу, наведеного в підрозділі 4.4 цього розділу. Радіус дуги  $R_D$  визначимо з виразу (4.65), а відстань від вісі обертання валків профілю Рело до їх поверхонь  $R$  визначимо з такого рівняння:

$$R = R_D - W, \quad (4.94)$$

де  $W$  – ексцентриситет дуги відносно центра обертання валка, м.

Результати розрахунків конструктивних параметрів валків профілю Рело представлено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Значення радіуса дуги та відстані від центра обертання до поверхні валка профілю Рело при різних значеннях ексцентриситету

|            |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|
| $W$ , мм   | 5    | 10   | 30   | 50   |
| $R_D$ , мм | 63,6 | 66,5 | 80,3 | 96,2 |
| $R$ , мм   | 58,6 | 56,5 | 50,3 | 46,2 |

Використовуючи рівняння (4.65), (4.69) та (4.94), виразимо деформацію зсуву через ексцентриситет:

$$\gamma = \left[ R_0 - \left( \sqrt{\left( \frac{R_0}{2} + W \right)^2 + \frac{3}{4} \cdot R_0^2} - W \right) \right] \cdot \pi / (3h_2). \quad (4.95)$$



Ексцентриситет валків визначався з виразу (4.95) при різній початковій товщині  $h_1 = 0,8; 1; 1,2; 1,5$  та при різних деформаціях зсуву  $\gamma = 0,4; 0,6; 0,8$  для поліетиленової та поліпропіленової плівок.

Підставляючи наведені вище значення товщини полімерного матеріалу та його деформацій зсуву в рівняння (4.95), визначимо ексцентриситет шляхом підбору (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Значення ексцентриситету валків при різній деформації зсуву та товщині полімерного матеріалу

| $h_1$ , мм | 0,8 |      |      | 1   |      |      | 1,2 |      |      | 1,5 |      |      |
|------------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|
| $\gamma$   | 0,4 | 0,6  | 0,8  | 0,4 | 0,6  | 0,8  | 0,4 | 0,6  | 0,8  | 0,4 | 0,6  | 0,8  |
| $W$ , мм   | 4,5 | 12,5 | 20,2 | 5,7 | 16,2 | 27,2 | 7,0 | 20,5 | 35,4 | 9,0 | 27,4 | 51,2 |

У зв'язку з тим, що діапазон товщини полімерних відходів легкої промисловості є досить широким, та враховуючи розподіл полімерних відходів за їх товщиною, для проектних розрахунків приймемо таке значення ексцентриситету:  $W = 25$  мм, а радіус дуги, відповідно, –  $R_D = 76,6$  мм

Отже, розраховані ексцентриситет та радіус дуги для валків профілю Рело забезпечують потрібний зсув полімерного матеріалу в поперечному до попереднього витягування напрямку, при якому його структура руйнується, а саме відбувається розрив перенапружених зв'язків між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів. У результаті цього полімерний матеріал подрібнюється на витягнуті фракції з орієнтованою структурою.

Затягування полімерного матеріалу валками профілю Рело буде відбуватися, якщо зусилля, що затягує, більше за силу відштовхування від поверхні валка, тобто:

$$F_t \cdot \cos \varphi_o \geq N_R \cdot \sin \varphi_o, \quad (4.96)$$

де  $N_R$  – сила відштовхування полімеру від поверхні валка (або сила реакції валка на тиск полімеру), Н;  $F_t$  – сила тертя між полімерним матеріалом і

поверхнею валка профілю Рело, Н;  $\varphi_o$  – кути охоплення полімером валків будуть різними, тому що в момент затягування полімерного матеріалу в міжвалковий простір радіуси валків різні (рис. 4.20).

Приймаємо в розрахунках такий кут охоплення, при якому сила відштовхування полімеру від поверхні валка більша, тобто  $\varphi_o = \varphi_2$ .

З рівняння (4.96) отримаємо:  $\varphi_o \leq \psi$ , де  $\psi = \arctg f$ ,  $f$  – коефіцієнт тертя.

Використовуючи рівняння (4.23) та проводячи деякі його перетворення, уточнимо прийняте раніше значення базового діаметра для валків профілю Рело  $D$ :

$$D_0 = \frac{R_0 - R + \varepsilon_{cm} h_1}{1 - \cos \varphi_o}, \quad (4.97)$$

де  $\varepsilon_{cm} = (h_1 - h_2)/h_1$  – деформація стиску полімерного матеріалу;  $h_2$  – товщина полімерного матеріалу після його проходження між валками профілю Рело, м.

Якщо в рівнянні (4.97) замість кута охоплення полімером валка профілю Рело  $\varphi_o$  підставити вираз для кута тертя  $\arctg f$ , то отримаємо мінімальний базовий діаметр валків профілю Рело, при якому відбувається затягування полімерного матеріалу в міжвалковий простір:

$$D_0 = \frac{R_0 - R + \varepsilon_{cm} h_1}{1 - \cos(\arctg f)}, \quad (4.98)$$

Використовуючи вираз (4.98) розрахуємо значення базових діаметрів валків профілю Рело залежно від таких параметрів: коефіцієнта тертя ( $f = 0,5$ ), базового радіуса ( $R_0 = 61$  мм), ексцентриситету ( $W = 25$  мм), деформації стиску ( $\varepsilon_{cm} = 0,4; 0,6; 0,8$ ) та початкової товщини полімеру ( $h_1 = 0,8; 1,0; 1,2; 1,5$  мм). Результати розрахунку наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Значення базового діаметра валків від деформації стиску  
та початкової товщини полімеру

| $h_1$ , мм         | 0,8  |      |      | 1,0  |      |      | 1,2  |      |      | 1,5  |      |       |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| $\varepsilon_{cm}$ | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 0,4  | 0,6  | 0,8   |
| $D$ , мм           | 91,8 | 93,4 | 94,8 | 92,6 | 94,5 | 96,4 | 93,4 | 95,6 | 98,0 | 94,5 | 97,4 | 100,2 |

З метою більш надійного затягнення полімеру в міжвалковий простір, приймемо базовий діаметр валка, виготовленого за профілем Рело, таким, що дорівнює  $D = 95$  мм.

За результатами наведених вище розрахунків та для проведення перевірочних і уточнювальних експериментальних досліджень було виготовлено валки профілю Рело.

Отже, розраховане і спроектоване в дисертаційній роботі обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості не вимагає використання дорогих спеціальних пристроїв і може бути використано в будь-якому місці накопичення полімерних відходів. Крім того, механічна переробка полімерних матеріалів дозволяє створювати у відновленому полімері анізотропну структуру, що близька до орієнтованого полімеру, тобто фрагменти зруйнованого полімерного матеріалу в напрямку їх довжини будуть мати підвищені фізико-механічні властивості. Це дозволяє використовувати їх як наповнювачі при виготовленні нових полімерних виробів легкої промисловості, що дозволить покращити експлуатаційні характеристики тих областей виробів, на які діють значні навантаження в процесі їх повсякденного використання.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Вперше для переробки полімерних відходів запропонована конструкція обладнання, яке включає в себе: пристрій із зубчастими валками, на якому полімер піддається напруженням розтягу та стиску; пристрій із валками профілю Рело, на якому полімер піддається напруженням стиску та зсуву; голкофрезу, де відбувається повна дезінтеграція полімерного матеріалу на частинки з орієнтованою структурою.

2. Вперше отримані залежності, що дозволяють за відомими граничними деформаціями та напруженнями, які необхідно створити в полімерних відходах для їх руйнування, визначити конструктивні параметри пристроїв із зубчастими валками і валками профілю Рело та технологічні режими їх роботи.

3. Проведені аналітичні дослідження впливу конструкційних параметрів пристрою із зубчастими валками і валками профілю Рело на деформації відповідно, розтягу та стиску, стиску та зсуву полімерних відходів, при яких забезпечується затягування матеріалу в міжвалковий простір, максимальна орієнтація його структури та подальше руйнування, в результаті чого були встановлені залежності конструктивних параметрів згаданих пристроїв від початкової товщини полімерних відходів та граничних деформацій розтягу, стиску та зсуву.

4. Вперше отримані залежності, що пов'язують витрати потужності пристроями із зубчастими валками та валками, виготовленими за профілем Рело, з їх конструктивними параметрами (діаметром зубчастих валків, висотою, кутом профілю і кроком зубців, базовим діаметром та ексцентриситетом валків Рело) і технологічними режимами їх роботи (частотою обертання валків), на основі яких встановлено, що споживана згаданими пристроями потужність зменшується при збільшенні кута профілю зубців та ексцентриситету валків Рело, однак надмірне зростання цих параметрів при незмінних інших факторах призведе до ковзання полімеру, а отже й до зменшення продуктивності.

5. Запропоновано метод визначення раціональних конструктивних параметрів валкових пристроїв та ефективних технологічних режимів їх роботи, який дозволяє визначати такі параметри перероблювального обладнання, як: діаметр зубчастих валків, висоту, кут профілю і крок зубців, базовий діаметр і ексцентриситет валків Рело, частота обертання валків, при яких полімерні відходи перетворюються на частинки з максимально орієнтованою структурою при мінімальних витратах енергії.

6. За допомогою розробленого методу визначення конструктивних і технологічних параметрів пристроїв із зубчастими валками та валками профілю Рело вперше розраховані найбільш раціональні та ефективні параметри валкових пристроїв, при яких створюються граничні деформації, необхідні для забезпечення руйнування полімеру на частинки з високо орієнтованою структурою, витрачаючи при цьому мінімум енергії. Так, для забезпечення

граничної деформації попереднього розтягу на зубчастих валках при обробці полімерних відходів товщиною від 1 мм до 4 мм, визначено такі параметри: крок та висоту зубців, відповідно, 3–6 % та 4–7 % від діаметра валків; кут профілю зубців від  $60^\circ$  до  $80^\circ$ . Для забезпечення руйнівної деформації зсуву для відходів товщиною від 0,8 мм до 1,5 мм на валках профілю Рело ексцентриситет має становити 12–28 % від базового діаметру.

## РОЗДІЛ 5

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

#### 5.1. Загальні положення

У попередньому розділі наведено метод проектування обладнання для переробки полімерних відходів, на основі якого було розроблено і виготовлено експериментальну установку, що являє собою окремі вузли, переробка відходів на яких досліджувалася окремо.

На першій стадії полімерний зразок пропускався між зубчастими валками, де він піддавався розтягувальним і стискальним навантаженням.

На другій стадії обробки полімерний зразок із пластично послабленою на першій стадії структурою пропускався між валками профілю Рело, де він піддавався навантаженням стиску та зсуву.

На третьому етапі зруйнований полімерний зразок оброблювався голкофрезою, при цьому відбувалася повна його дезінтеграція на частинки з орієнтованою структурою. Ефективність обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості визначається витратами потужності, дисперсністю перероблених відходів та продуктивністю. Останній параметр ефективності перероблювального пристрою має вагоме значення для промислового обладнання і може досліджуватися тільки у виробничому процесі. У нашій дисертаційній роботі будемо досліджувати вплив конструктивних і технологічних параметрів експериментальної установки на потужність, що витрачається для руйнування полімерних відходів.

Згідно із сучасними теоріями руйнування [251] процес деформації аморфно-кристалічних полімерних матеріалів, що розглядаються в нашій роботі, полягає в тому, що під дією зовнішніх сил у найбільш слабких місцях полімерного матеріалу – в аморфних областях – утворюються дрібні замкнуті

розриви на поверхні матеріалу. Руйнування полімерного матеріалу відбувається в тому випадку, коли розриви настільки збільшуються, що перетинають матеріал по всьому перерізу в одному або у декількох напрямках. Під час руйнування структури полімерного матеріалу напруження у ньому перевищують граничне значення міцності на розрив аморфної області, в'язкопружна деформація змінюється пластичною деформацією і відбувається руйнування.

Процеси руйнування полімерного матеріалу, як і будь-якого твердого тіла, пов'язані зі значними витратами потужності на утворення нових поверхонь. Наявні теорії процесу подрібнення [251] встановлюють залежність між потужністю, що витрачається на руйнування тіла, і результатом процесу подрібнення, тобто розміром вільної поверхні продукту переробки. Згідно з цією теорією, потужність, що витрачається на руйнування полімерних відходів, пропорційна площі поверхонь кусків полімеру, що утворюються при переробці. Площа поверхні полімерного матеріалу  $S_K$  зі зруйнованою структурою буде в десятки разів більша від площі поверхні полімерного матеріалу, взятої до його переробки  $S_{II}$ :

$$S_K / S_{II} = \delta, \quad (5.1)$$

де  $\delta$  – ступень подрібнення полімерних відходів.

Окремий вузол запропонованого обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості забезпечує обмежену ступінь подрібнення, тому для досягнення більш високих значень цього показника процес подрібнення будемо здійснювати у три стадії, використовуючи послідовно всі пристрої, розроблені та запропоновані у цій дисертаційній роботі, а саме: пристрій із зубчастими валками, пристрій із валками профілю Рело і голкофрезовий пристрій. Певні полімерні матеріали вимагають декількох проходів (повторень обробки) на певній стадії переробки.

На основі сказаного вище пропонуємо як контрольований параметр для експериментальних досліджень процесу переробки полімерного матеріалу вибрати

питому потужність, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні переробленого матеріалу.

Для визначення цього параметра будемо вимірювати потужність, що витрачається на пластичне послаблення та руйнування полімерного зразка  $N$ , при різних значеннях конструктивних і технологічних параметрів кожного з трьох запропонованих пристроїв. Після вимірювання площі вільної поверхні подрібнених частинок полімерного зразка  $S$  питому потужність, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімерного матеріалу, будемо визначати за таким виразом:

$$w = (N - N_0) / S, \quad (5.2)$$

де  $N$  – потужність, що витрачається на руйнування структури полімерного зразка, Вт;  $N_0$  – потужність, що витрачається на холосте обертання валків або голкофрези, Вт.

Вибір матеріалу зразка здійснювався, виходячи з номенклатури полімерів, які набули широкого використання в легкій промисловості. Для проведення експериментальних досліджень було вибрано такі матеріали та їх марки:

- поліетилен (ПЕ), марка: 20108-075;
- поліпропілен (ПП), марка: 1365 S;
- полівінілхлорид (ПВХ), марка: ОПЛП-2.

Заготовки з полівінілхлориду на зразки для випробування отримували литтям під тиском на термопластавтоматі моделі Б2С/14Е. Для одержання заготовок для зразків однакової товщини їх обробляли на обладнанні ДН-2-0. Товщина зразків, згідно з вимогами випробування, має бути однаковою по всій площині зразків.

Як заготовки для поліетиленових та поліпропіленових зразків ми використовували готові поліетиленові та поліпропіленові листи товщиною 2 мм.

За допомогою спеціально виготовлених різаків на пресі ПВГ-8-0 із заготовок вирубали зразки, які мали розміри та форму, відповідно до вимог випробування, а саме: довжину – 0,1 м, ширину – 0,06 м, товщину – 0,002 м.



## 5.2. Експериментальні дослідження руйнування полімерного матеріалу на пристрої із зубчастими валками

### 5.2.1. Опис експериментального пристрою

Дослідження проводилися на експериментальному пристрої (рис. 5.1), який призначений для орієнтації структури полімерного матеріалу. Пристрій із зубчастими валками (рис. Л.1-Л.2, додаток Л) може використовуватися для дослідження переробки полімерних матеріалів, що використовуються в легкій промисловості, товщиною від 1 мм до 5 мм. Якщо полімерні відходи мають більшу товщину, то їх необхідно обробити на дискових ріжучих ножах.

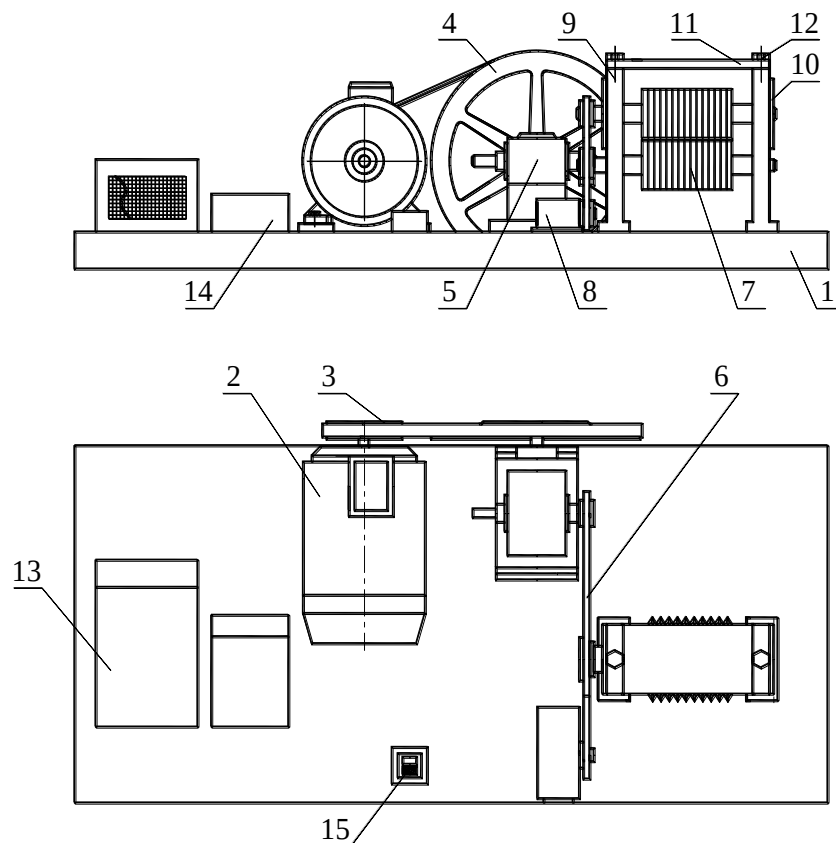


**Рис. 5.1. Експериментальна установка із зубчастими валками:**

- 1 – плита; 2 – електродвигун; 3 – ведучий шків; 4 – ведений шків;  
5 – черв'ячний редуктор; 6 – ланцюгова передача; 7 – зубчасті валки;  
8 – натяжний пристрій; 9 – стійки; 10 – підшипникові вузли; 11 – пластина;  
12 – болти для регулювання міжвалкової відстані; 13 – пристрій для  
вимірювання потужності; 14 – трансформатор; 15 – вмикач**

Експериментальний пристрій із зубчастими валками містить плиту 1, на якій розміщено електродвигун потужністю 1,5 кВт (3000 об/хв), від якого передається обертання зубчастим валкам 7 через пасову передачу, ведучий шків 3 якої виконаний із можливістю зміни частоти обертання, а ведений шків 4 виконаний зі шпицями, через черв'ячний редуктор 5, ланцюгову передачу 6.

Черв'ячний редуктор 5 має передаточне відношення  $I = 34$ . Ланцюгова передача 6 (ПР 12,7-1800) обходить зірочки верхнього і нижнього зубчастих валків 7 з різних боків для забезпечення протилежного обертання цих валків. Тому в конструкції експериментальної установки передбачено натяжний пристрій 8.

Зубчасті валки розташовуються між двома стойками 9, в яких розміщено підшипникові вузли 10. Необхідна жорсткість цієї конструкції забезпечується за допомогою пластини 11. За допомогою болтів для регулювання 12 можна змінювати міжвалкову відстань, тим самим забезпечуючи необхідні деформації для полімерних зразків різної товщини, не допускаючи заклинювання пристрою.

Для визначення потужності, що витрачається на переробку полімерного зразка, використовується пристрій для вимірювання потужності (ватметр) 13, який під'єднаний через трансформатор 14 до двигуна 2. Запуск експериментальної установки здійснюється за допомогою вимикача 15.

### 5.2.2. Планування експериментальних досліджень

З метою дослідження зміни потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімерного матеріалу, відповідно до розробленої в розділі 4 методики проектування обладнання для переробки полімерних відходів, було вибрано такі фактори:

- частота обертання зубчастих валків, яка варіювалася шляхом зміни діаметра ведучого шківів та зірочок;
- крок зубців, для зміни якого було виготовлено додаткові зубчасті валки.

Діапазон варіювання цих факторів вибирався на основі даних, отриманих із попередніх експериментальних вимірювань. Полімерні матеріали, з яких

виготовлено зразки для випробування, та характеристику їх властивостей наведено в таблиці 2.1.

Отже, частоту обертання зубчастих валків будемо варіювати в межах від 30 об/хв до 170 об/хв, а крок зубців – від 4,5 мм до 13,5 мм.

Експериментальні дослідження показників потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні, від конструктивних та технологічних параметрів валкового пристрою передбачають отримання залежності випадкової величини, якою є питома потужність, від невинпадкоких змінних – частоти обертання зубчастих валків і кроку нарізки зубців.

Природа цього взаємозв'язку може бути двоякою: а) дослідження залежної змінної  $w$  пов'язане з деякими помилками вимірювання, а змінні  $n$  і  $t$  вимірюються без помилок або ці помилки суттєво менші в порівнянні з помилкою вимірювання залежної змінної; б) значення змінної  $w$  залежать не тільки від відповідних значень  $n$  і  $t$ , а й від низки неконтрольованих чинників. Тому при кожному поєднанні значень  $n$  і  $t$  залежна змінна  $w$  схильна до коливань випадкового характеру. Часто виникає необхідність у встановленні зв'язку між випадковою величиною  $w$  і невинпадовими змінними  $n$  і  $t$ , що приймають у кожній серії дослідів певні значення.

Таким чином, результатом експериментальних досліджень має бути отримання рівняння регресії математичного очікування випадкової величини за невинпадовими величинами, яке може бути лінійним або криволінійним.

В основі регресійного аналізу покладено такі припущення [220]:

1. При кожному поєднанні значень невинпадкоких змінних випадкова величина має нормальний розподіл.
2. Дисперсія теоретичного розподілу випадкової величини постійна.
3. Тип функції рівняння регресії відомий.
4. Незалежні змінні вимірюються з малою помилкою у порівнянні з помилкою при визначенні залежної змінної, тому нею можна нехтувати.
5. Незалежні змінні є лінійно незалежними.

При проведенні експериментальних досліджень технологічних операцій, здійснюваних з використанням різних пристроїв, часто доводиться мати справу з випадковою величиною, що не описується законом нормального розподілу.

Тому в разі подібної ситуації в нашому випадку необхідно підібрати таку функцію перетворення, яка дозволить перейти від  $w$  до нової випадкової величини, розподіленої приблизно нормально.

Якщо проводити багаторазові повторні спостереження над залежною величиною при прийнятому наборі значень незалежних змінних, то, згідно з другим припущенням, отримаємо дисперсію випадкової величини, яка не буде залежати від значень незалежних змінних. Практично це означає, що при багаторазових повторних спостереженнях над залежною величиною при першому, другому, третьому і т.д. наборах незалежних значень отримані вибіркові дисперсії, що є оцінками дисперсії теоретичного розподілу, повинні бути однорідні. Однорідність оцінок дисперсії не завжди виконується в умовах реального експерименту. Тому ми запропонували таке перетворення випадкової величини, яке дозволить отримати однорідні оцінки дисперсії.

При обробці результатів багатofакторного експерименту як функцію будемо використовувати поліномом другого порядку:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (5.3)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ , – коефіцієнти рівняння регресії.

Після проведення експериментальних досліджень необхідно зробити регресійний аналіз, завдання якого пролягає в такому: перевірка гіпотези однорідності дисперсії; знаходження оцінок коефіцієнтів регресії; визначення довірчих інтервалів для істинних значень; перевірка гіпотези адекватності.

Для запису умов експерименту і обробки експериментальних даних рівні факторів кодувалися. Перший фактор, тобто частота обертання зубчастих валків, кодувався  $x_1$ , другий фактор, крок зубців, –  $x_2$ .

При кодуванні значень факторів, вплив яких досліджувався, верхній рівень позначали як +1, нижній як -1, а нульовий як 0. Кодування факторів  $x_i$  визначалося таким виразом [220, 221]:

$$x_i = (X_i - X_{0i}) / \varepsilon_i, \quad (5.4)$$

де  $i$  – номер фактора;  $X_i$  – натуральне значення  $i$ -го фактора;  $X_{0i}$  – натуральне значення нульового рівня  $i$ -го фактора;  $\varepsilon_i$  – інтервал зміни  $i$ -го фактора.

### 5.2.3. Експериментальні дослідження та обробка результатів експерименту

Експериментальні дослідження потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні перероблених поліетиленової та поліпропіленової плівок, при різних значеннях конструктивних та технологічних параметрів зубчастого пристрою проводилися на рівнях варіювання та з інтервалами, які наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Рівні та інтервали зміни факторів

| Позн.                                      | Фактори                                | Рівні варіювання |     |     |     |         | Інтервал<br>варіюва<br>ння |
|--------------------------------------------|----------------------------------------|------------------|-----|-----|-----|---------|----------------------------|
|                                            |                                        | – 1,414          | – 1 | 0   | + 1 | + 1,414 |                            |
| Для зразків з поліпропілену та поліетилену |                                        |                  |     |     |     |         |                            |
| X1                                         | Частота<br>обертання, хв <sup>-1</sup> | 30               | 50  | 100 | 150 | 170     | 50                         |
| X2                                         | Крок зубців, мм                        | 4,5              | 6   | 9,0 | 12  | 13,5    | 3                          |

Визначення необхідного числа вимірів, що нейтралізує можливі випадкові помилки при відомій надійній ймовірності, здійснювалося відповідно до [220]. Причому загальна величина помилки вимірів не повинна перевищувати 5%. У результаті було встановлено, що в кожному досліді необхідно проводити чотири паралельних виміри.

Матрицю плану для композиційного ротатабельного планування другого порядку наведено в табл. М.1 (додаток М). Після реалізації робочої матриці (додаток М, табл. М.1), при чотирьох паралельних дослідах, ми отримали значення

потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні, для зразків, виготовлених із поліпропілену та поліетилену (додаток М, табл. М. 2-М 3).

Для аналізу результатів досліджень визначалася дисперсія помилки кожного дослідів [220]:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n_n - 1), \quad (5.5)$$

де  $n_n$  – кількість спостережень (кількість повторень дослідів);  $y_i$  – значення параметра оптимізації для окремого спостереження;  $\bar{y}$  – середнє значення параметра.

Отримані значення дисперсій наведено у табл. М. 2-М 3 (додаток М).

Аналіз результатів дослідів показав, що при переробці поліпропіленових зразків у пристрої із зубчастими валками в четвертому досліді дисперсія вимірювань помітно вища, ніж в інших дослідів ( $s^2 = 8,83$ ), а при переробці поліетиленових зразків занадто велика дисперсія вимірювань спостерігається в першому досліді, відповідно,  $s^2 = 39,42$ .

У зв'язку з цим виникла необхідність перевірки однорідності дисперсій. Перевірка проводилася з урахуванням критерію Кохрена:

$$G_{расч} = s_{\max}^2 / \sum_{i=1}^N s_i^2, \quad (5.6)$$

де  $N$  – число дослідів.

Підставляючи значення дисперсій у формулу (5.6), ми отримали такі результати. При випробуванні поліпропіленових зразків:

$$G_{расч} = 8,83 / 61,07 = 0,15.$$

При випробуванні поліетиленових зразків:

$$G_{расч} = 39,42 / 250,04 = 0,16.$$

Розрахункове значення критерію менше за табличне ( $0,15 < 0,32$  та  $0,16 < 0,32$ ), тому з 95%-ою надійною ймовірністю можна стверджувати, що всі дисперсії помилок однорідні [220].

Коефіцієнти рівняння регресії (5.3) отримали за допомогою матричного методу [220]. Розраховані значення коефіцієнтів регресії наведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Значення коефіцієнтів рівняння регресії

| Коефіцієнт \ Матеріал | Зразок з поліпропілену | Зразок з поліетилену |
|-----------------------|------------------------|----------------------|
| $b_0$                 | 76928,0                | 95722,0              |
| $b_1$                 | -1728,8                | -1303,3              |
| $b_2$                 | 7826,8                 | 9224,5               |
| $b_{12}$              | -1097,6                | 512,0                |
| $b_{11}$              | -88,2                  | -366,4               |
| $b_{22}$              | -6033,8                | -8075,0              |

Підставляючи значення коефіцієнтів у (5.3), отримаємо рівняння регресії:

- для поліпропіленового зразка:

$$y_{\text{пп}}(x_1, x_2) = 76928,0 + 17288 \cdot x_1 + 7826,8 \cdot x_2 + 1097,6 \cdot x_1 \cdot x_2 + 88,2 \cdot x_1^2 - 6033,8 \cdot x_2^2, \quad (5.7)$$

- для поліетиленового зразка:

$$y_{\text{пе}}(x_1, x_2) = 95722,0 + 24633,3 \cdot x_1 + 9224,5 \cdot x_2 + 512,0 \cdot x_1 \cdot x_2 + 7366,4 \cdot x_1^2 - 8075,0 \cdot x_2^2. \quad (5.8)$$

Проведемо перевірку значущості коефіцієнтів рівняння регресії. Наявність інформації про значущість коефіцієнтів дозволяє спростити рівняння.

З метою оцінки значущості коефіцієнтів регресії визначено довірчі інтервали [220]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 0,894 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; & \Delta b_i &= \pm 0,707 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; \\ \Delta b_{ii} &= \pm 0,759 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; & \Delta b_{ij} &= \pm s_{\{\bar{y}\}}, \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

де  $s_{\{\bar{y}\}}^2$  – помилка середнього значення паралельних вимірів, яка визначалася відповідно до [221].

При випробуванні поліпропіленових зразків помилка середнього значення паралельних вимірів знаходилася за такою формулою:

$$s_{\{\bar{y}\}}^2 = s_{\{y\}}^2 / n_n = \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{n_n} (y_{u,i} - \bar{y}_u)^2 / \left[ n_n \cdot \sum_{i=1}^N (n-1) \right] = 28,9/4 = 7,2,$$

де  $s_{\{\bar{y}\}}^2$  – дисперсія відтворення;  $y_{u,i}$  – поточне значення паралельного вимірювання на  $u$ -му рівні варіювання частоти обертання зубчастих валків та кроку зубців;  $\bar{y}_u$  – середнє значення потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімерного зразка, на  $u$ -му рівні варіювання;  $n_n$  – кількість паралельних вимірювань кожного дослідження;  $n$  – кількість досліджень (або кількість рівнів варіювання).

При випробуванні поліетиленових зразків помилка середнього значення паралельних вимірів знаходилася за такою формулою:

$$s_{\{\bar{y}\}}^2 = s_{\{y\}}^2 / n_n = \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{n_n} (y_{u,i} - \bar{y}_u)^2 / \left[ n_n \cdot \sum_{i=1}^N (n-1) \right] = 477,2/4 = 119,3.$$

Після підстановки помилки середнього значення паралельних вимірів у рівняння (5.9) було отримано довірчі інтервали коефіцієнтів регресії.

Для поліпропіленових зразків довірчі інтервали коефіцієнтів регресії дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 2,41; & \Delta b_1 &= \Delta b_2 = \pm 1,90; \\ \Delta b_{11} &= \Delta b_{22} = \pm 2,04; & \Delta b_{12} &= \pm 2,69. \end{aligned} \right\}$$

Для поліетиленових зразків довірчі інтервали коефіцієнтів регресії дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 9,77; & \Delta b_1 &= \Delta b_2 = \pm 7,72; \\ \Delta b_{11} &= \Delta b_{22} = \pm 8,28; & \Delta b_{12} &= \pm 10,92. \end{aligned} \right\}$$

Порівняння абсолютної величини коефіцієнтів і відповідних довірчих інтервалів показало, що всі коефіцієнти статично значимі, і тому рівняння регресії (5.7)-(5.8) не спрощуються.

Адекватність отриманого рівняння регресії реальним процесом перевірялася за допомогою критерію Фішера:

$$\Phi = s_{ad}^2 / s_{\{y\}}^2, \quad (5.10)$$



де  $s_{ad}^2$  – залишкова дисперсія (або дисперсія адекватності).

Згідно з [220], залишкова дисперсія визначається з рівняння:

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n n \cdot (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{n - k - (n_0 - 1)}, \quad (5.11)$$

де  $\hat{y}_u$  – розрахункове значення параметра оптимізації;  $k = 6$  – число коефіцієнтів рівняння;  $n_0 = 5$  – число повторень нульового дослідження.

Підставивши значення (додаток М, табл. М. 2-М. 3) в рівняння (5.11), отримаємо дисперсію адекватності для результатів випробування полімерних зразків.

Для результатів випробування поліпропіленового зразка дисперсія адекватності дорівнює:

$$s_{ad}^2 = \frac{729,58}{13 - 6 - (5 - 1)} = 243,2,$$

а розрахункове значення критерію Фішера дорівнює:

$$\Phi_{розр} = 243,2 / 28,9 = 8,42.$$

Для результатів випробування поліетиленового зразка дисперсія адекватності дорівнює:

$$s_{ad}^2 = \frac{11938}{13 - 6 - (5 - 1)} = 3979,3,$$

а розрахункове значення критерію Фішера дорівнює:

$$\Phi_{розр} = 3979,3 / 477,2 = 8,30.$$

Порівнюючи знайдений критерій Фішера з табличним ( $8,42 < 9,10$  – при випробуванні поліпропіленових зразків;  $8,30 < 9,10$  – при випробуванні поліетиленових зразків), при вибраній надійній ймовірності, можна стверджувати, що рівняння регресії (5.7)-(5.8) є адекватними з 95%-ою надійною ймовірністю [221].

Для одержання натуральних рівнянь підставимо значення кодованого фактора  $X$ , згідно з виразом (5.4), у рівняння (5.7)-(5.8) і одержимо функції залежності потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні

перероблених зразків з поліпропілену та поліетилену  $w$  від частоти обертання зубчастих валків  $n$  та кроку зубців  $t$ .

Функції залежності потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні при переробці зразків з поліпропілену:

$$w_{\text{пп}} = 76928,0 + 17288 \cdot \frac{n-100}{50} + 7826,8 \cdot \frac{t-9}{3} + 1097,6 \cdot \frac{n-100}{50} \cdot \frac{t-9}{3} + 88,2 \cdot \left( \frac{n-100}{50} \right)^2 - 6033,8 \cdot \left( \frac{t-9}{3} \right)^2. \quad (5.12)$$

Функції залежності потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні при переробці зразків з поліетилену:

$$w_{\text{пе}} = 95722,0 + 24633,3 \cdot \frac{n-100}{50} + 9224,5 \cdot \frac{t-9}{3} + 512,0 \cdot \frac{n-100}{50} \cdot \frac{t-9}{3} + 7366,4 \cdot \left( \frac{n-100}{50} \right)^2 - 8075,0 \cdot \left( \frac{t-9}{3} \right)^2. \quad (5.13)$$

Отримані рівняння дозволяють описати залежність потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні при переробці поліпропіленових та поліетиленових зразків від конструктивних та технологічних параметрів пристрою із зубчастими валками, а саме від частоти обертання зубчастих валків та кроку зубців.

Ці залежності можна використовувати при розрахунку технологічних та конструктивних параметрів обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості.

#### 5.2.4. Аналіз результатів експериментальних досліджень

На рис. 5.2-5.3 зображено графіки залежності витрат потужності на утворення одиниці вільної поверхні від конструктивних та технологічних параметрів пристрою із зубчастими валками, в якому полімерний матеріал пластично послабляються, тобто відбувається перетворення неорієнтованої структури на структуру витягнутих конгломератів орієнтованих сферолітів.

У результаті проходження поліетиленового і поліпропіленового зразків між зубчастими валками, крім витягування матеріалу, відбувається руйнування аморфної області полімеру вздовж напрямку його руху. Це пояснюється тим, що під час обробки полімерного матеріалу між зубчастими валками за допомогою стискальних та розтягувальних навантажень створюється напружено-деформований стан у результаті якого структура полімерного матеріалу спочатку під впливом напружень розтягу, що виникають в результаті обертання валків та дії сил тертя між полімером і валками, витягується вздовж вісі валків, а потім, під впливом напружень стиску, що виникають на вершинах зубців, руйнується поперек напрямку витягування.

Як видно з рис. 5.2, збільшення частоти обертання зубчастих валків приводить до збільшення витрат потужності на утворення одиниці вільної поверхні. В результаті збільшення частоти обертання валків, збільшується швидкість деформації полімерних зразків, що збільшує руйнівне напруження. Це пояснюється тим, що за такий короткий проміжок часу рівноважна деформація не може розвинути, тому що ланцюги макромолекул не встигають переходити по потенціальних ямах, в результаті в'язкопружний модуль значно перевищує рівноважний модуль, через що руйнування відбувається при більших граничних напруженнях.

Як видно з рис. 5.3, зі збільшенням кроку зубців валків збільшуються витрати потужності на утворення одиниці вільної поверхні. Це можна пояснити тим, що у разі збільшення кроку збільшується величина зусилля, яке слід прикласти для забезпечення максимальної орієнтації структури полімерного матеріалу, а це, у свою чергу, потребує збільшення притискного навантаження для унеможливлення проковзування матеріалу.

Крім того, збільшення кроку зубців приводить до зменшення деформації полімерного матеріалу поперек орієнтації його структури, в результаті цього в матеріалі виникає менша кількість розривів, а отже площа вільної поверхні переробленого полімеру зменшується.

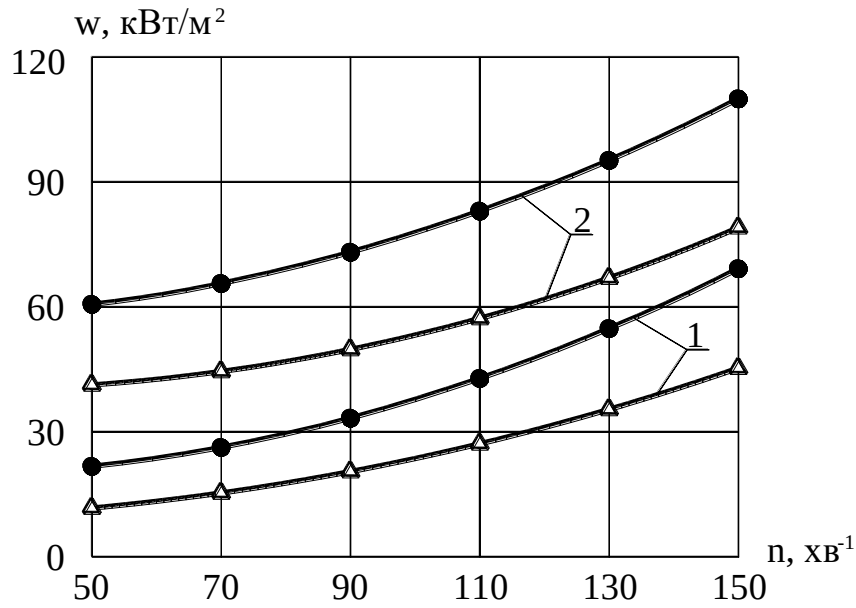


**Рис. 5.2.** Залежність витрати потужності на утворення одиниці вільної поверхні полімерного зразка від частоти обертання валків:  
 1 – крок зубців 0,004 м; 2 – крок зубців 0,01 м;  
 ● – поліетиленовий зразок; ▲ – поліпропіленовий зразок

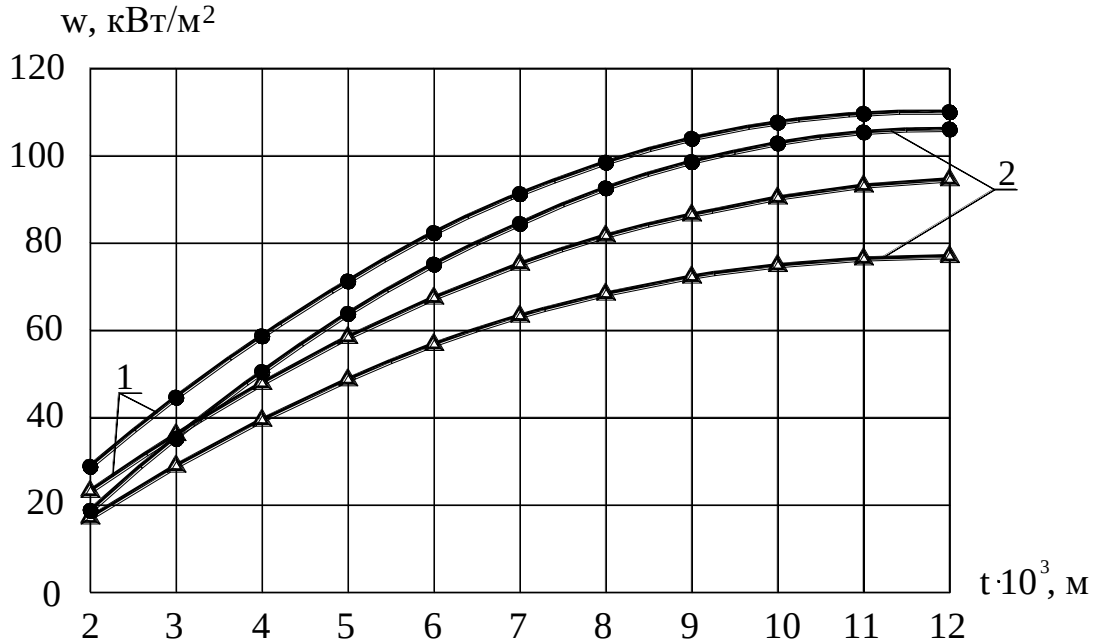


**Рис. 5.3.** Залежність витрат потужності на утворення одиниці вільної поверхні полімерного зразка від кроку зубців валка:  
 1 – частота обертання 150  $\text{хв}^{-1}$ ; 2 – частота обертання 50  $\text{хв}^{-1}$   
 ● – поліетиленовий зразок; ▲ – поліпропіленовий зразок

### 5.3. Експериментальні дослідження руйнування полімерного матеріалу на пристрої із валками профілю Рело

#### 5.3.1. Опис експериментального пристрою та планування експериментальних досліджень

Дослідження проводилися на експериментальному пристрої (рис. 5.4), який призначений для руйнування орієнтованої структури полімерного матеріалу в поперечному до орієнтації напрямку. В результаті створення в полімерному матеріалі значних зсувних напружень, які приводять до виникнення руйнівних деформацій зсуву, в структурі полімеру між витягнутими конгломератами орієнтованих сферолітів (кристалічних областей) з'являються розриви.

Експериментальний пристрій із валками профілю Рело (рис. Н.1-Н.2, додаток Н) може використовуватися для дослідження процесу переробки полімерних відходів, що використовуються в легкій промисловості, товщиною від 0,8 мм до 1,5 мм.

Опис пристрою наведено в попередньому підрозділі. Єдина відмінність полягає у використанні валків профілю Рело замість зубчастих валків.

З метою дослідження зміни потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімерного матеріалу (рис. Н.3, додаток Н), відповідно до розробленої в розділі 4 методики проектування обладнання для переробки полімерних відходів, було вибрано такі фактори:

- частота обертання валків профілю Рело  $n$ , яка варіювалась шляхом зміни діаметра ведучого шківів та зірочок;
- кут між осями обертання зубчастих валків та валків профілю Рело  $\alpha$ .

Оптимізація контрольованого параметра за кутом між осями обертання зубчастих валків та валків профілю Рело дозволить визначити раціональне взаємне розташування валкових пристроїв, при якому забезпечуються мінімальні витрати енергії (див. рис. 4.26).

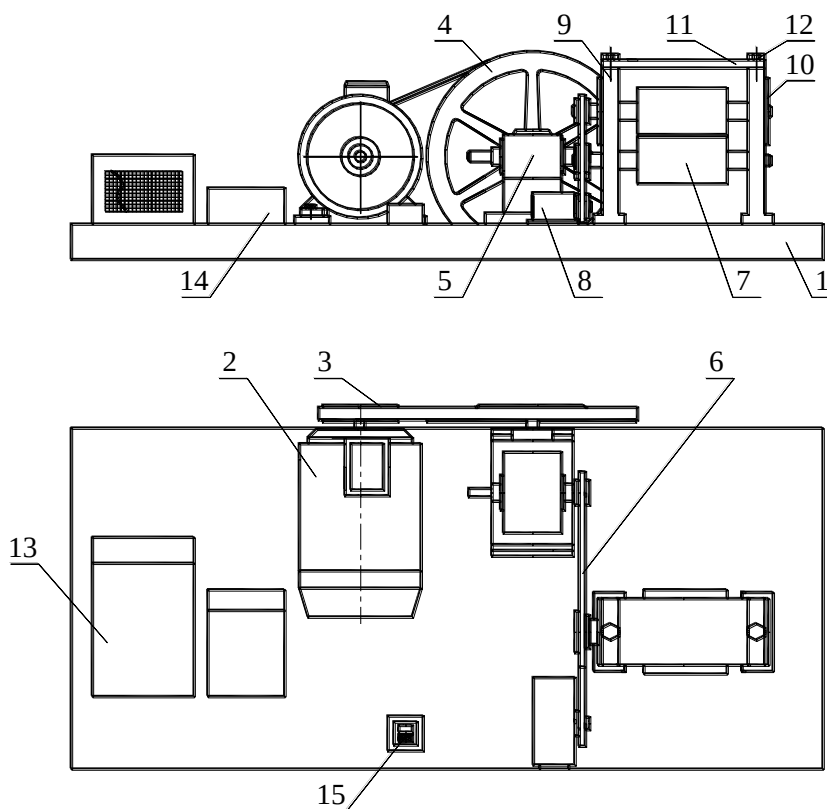


**Рис. 5.4. Експериментальна установка із валками профілю Рело:**  
**1 – плита; 2 – електродвигун; 3 – ведучий шків; 4 – ведений шків;**  
**5 – черв'ячний редуктор; 6 – ланцюгова передача; 7 – валки профілю Рело;**  
**8 – натяжний пристрій; 9 – стойки; 10 – підшипникові вузли; 11 – пластина;**  
**12 – болти для регулювання міжвалкової відстані; 13 – пристрій для**  
**вимірювання потужності; 14 – трансформатор; 15 – вмикач**

Діапазон варіювання цих факторів вибирався на основі даних, отриманих із попередніх експериментальних вимірювань, які проводилися при виконанні цієї дисертації. Полімерні матеріали, з яких виготовлено зразки для випробування, та характеристики їх властивостей наведено в таблиці 2.1.

Отже, частоту обертання валків профілю Рело  $n$  будемо варіювати в межах від 30 об/хв до 170 об/хв, а кут між осями обертання зубчастих валків та валків профілю Редл  $\alpha$  – в межах від  $0^0$  до  $90^0$ .

Експериментальні вимірювання потужності  $w$ , що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні полімерного матеріалу, передбачають отримання функціональної залежності контрольованого параметру  $w$  від

частоти обертання валків профілю Рело  $n$  та кута подачі  $\alpha$  полімерного матеріалу відносно орієнтації його структури.

Слід враховувати, що дослідження контрольованого параметру  $w$  може бути пов'язано з деякими помилками вимірювання. У цьому випадку фактори, що впливають на контрольований параметр – частота обертання валків профілю Рело  $n$  і кут між осями обертання валків  $\alpha$  – мають бути визначені з суттєво меншими помилками у порівнянні з помилкою вимірювання залежної змінної  $w$ .

Часто виникає необхідність у встановленні зв'язку між випадковою величиною  $w$  і не випадковими змінними  $n$  і  $\alpha$ , що приймають у кожній серії дослідів певні значення. Для цього необхідно функціонально пов'язати результати вимірювання контрольованого параметра (потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні полімерного матеріалу) та фактори, вплив яких досліджувався (частоту обертання валків профілю Рело  $n$  і кут між осями обертання зубчастих валків і валків профілю Рело  $\alpha$ ). Отже, результатом експериментальних досліджень має бути отримання рівняння регресії, що пов'язує випадкову величину з не випадковими величинами.

При обробці результатів багатфакторного експерименту як функцію будемо використовувати поліном другого порядку (5.3).

Після проведення експериментальних досліджень необхідно зробити регресійний аналіз, завдання якого пролягає в такому: перевірка гіпотези однорідності дисперсії; знаходження оцінок коефіцієнтів регресії; визначення довірчих інтервалів для істинних значень; перевірка гіпотези адекватності.

Для запису умов експерименту і обробки експериментальних даних рівні факторів кодувалися. Перший фактор, тобто частота обертання валків профілю Рело, кодувався як  $x_1$ , другий фактор – кут між осями обертання зубчастих валків і валків профілю Рело  $x_2$ . При кодуванні значень факторів, вплив яких досліджувався, верхній рівень позначали як  $+1$ , нижній як  $-1$ , а нульовий як  $0$ . Кодування факторів  $x_i$  визначалося виразом (5.4).

### 5.3.2. Експериментальні дослідження та обробка результатів експерименту

Експериментальні дослідження зміни потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні перероблених поліетиленової та поліпропіленової плівок, при різних значеннях конструктивних та технологічних параметрів пристрою з валками профілю Рело проводилися на рівнях варіювання та з інтервалами, які наведено в табл. 5.3.

Визначення необхідної кількості вимірів, що нейтралізує можливі випадкові помилки при відомій надійній ймовірності, здійснювалося відповідно до [220]. Причому бралось до уваги, що загальна величина помилки вимірів не повинна перевищувати 5%. У результаті було встановлено, що в кожному досліді необхідно проводити чотири паралельних виміри.

Таблиця 5.3

Рівні та інтервали зміни факторів

| Позна-<br>чення                            | Фактори                                | Рівні варіювання |     |     |     |         | Інтервал<br>варіюван-<br>ня |
|--------------------------------------------|----------------------------------------|------------------|-----|-----|-----|---------|-----------------------------|
|                                            |                                        | – 1,414          | – 1 | 0   | + 1 | + 1,414 |                             |
| Для зразків з поліпропілену та поліетилену |                                        |                  |     |     |     |         |                             |
| X1                                         | Частота<br>обертання, хв <sup>-1</sup> | 30               | 50  | 100 | 150 | 170     | 50                          |
| X2                                         | Кут подачі                             | 0                | 15  | 45  | 75  | 90      | 30                          |

Матрицю плану для композиційного ротатабельного планування другого порядку наведено в табл. П.1 (додаток П).

Після реалізації робочої матриці (додаток П, табл. П.1), при чотирьох паралельних дослідах, ми отримали значення потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні, для зразків, виготовлених з поліпропілену та поліетилену (додаток П, табл. П. 2-П 3).



Для аналізу результатів досліджень за рівнянням (5.5) визначалася дисперсія помилки кожного досліду. Отримані значення дисперсій наведено у табл. П. 2-П. 3 (додаток П).

Аналіз результатів дослідів показав, що при переробці поліпропіленових зразків у пристрої із валками профілю Рело в першому досліді дисперсія вимірювань помітно вища, ніж в інших дослідах ( $s^2 = 25,57$ ), а при переробці поліетиленових зразків занадто велику дисперсію вимірювань було спостережено у восьмому досліді, відповідно,  $s^2 = 38,00$ .

У зв'язку з цим виникла необхідність перевірки однорідності дисперсій. Перевірка проводилася з урахуванням критерію Кохрена, що визначався за рівнянням (5.6).

При випробуванні поліпропіленових зразків:

$$G_{расч} = 25,57/115,72 = 0,22.$$

При випробуванні поліетиленових зразків:

$$G_{расч} = 38,00/372,22 = 0,10.$$

Розрахункове значення критерію Кохрена для поліпропіленових та поліетиленових зразків менше за табличне ( $0,22 < 0,32$  та  $0,10 < 0,32$ ), тому з 95%-ою надійною ймовірністю можна стверджувати, що всі дисперсії помилок однорідні [221].

Коефіцієнти рівняння регресії (5.3) ми отримали за допомогою матричного методу [220]. Розраховані значення коефіцієнтів регресії наведено у табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Значення коефіцієнтів рівняння регресії

| Матеріал<br>Коефіцієнт | Зразок з поліпропілену | Зразок з поліетилену |
|------------------------|------------------------|----------------------|
| 1                      | 2                      | 3                    |
| $b_0$                  | 4689                   | 7354                 |
| $b_1$                  | -422                   | -1816                |

| 1        | 2     | 3     |
|----------|-------|-------|
| $b_2$    | -1741 | -2709 |
| $b_{12}$ | 202   | 999   |
| $b_{11}$ | -404  | 341   |
| $b_{22}$ | -89   | -645  |

Підставляючи значення коефіцієнтів у рівняння (5.3), отримаємо такі рівняння регресії:

- для поліпропіленового зразка

$$y_{\text{пп}}(x_1, x_2) = 4689 + 422 \cdot x_1 + 1741 \cdot x_2 + 202 \cdot x_1 \cdot x_2 + 404 \cdot x_1^2 - 89 \cdot x_2^2, \quad (5.14)$$

- для поліетиленового зразка

$$y_{\text{пе}}(x_1, x_2) = 7355 + 1816 \cdot x_1 + 2709 \cdot x_2 + 999 \cdot x_1 \cdot x_2 + 541 \cdot x_1^2 - 645 \cdot x_2^2. \quad (5.15)$$

Проведемо перевірку значущості коефіцієнтів рівняння регресії. Наявність інформації про значущість коефіцієнтів дозволяє спростити рівняння.

З метою оцінки значущості коефіцієнтів регресії визначено довірчі інтервали [220]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 0,894 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; \quad \Delta b_i = \pm 0,707 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; \\ \Delta b_{ii} &= \pm 0,759 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; \quad \Delta b_{ij} = \pm s_{\{\bar{y}\}}, \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

де  $s_{\{\bar{y}\}}^2$  – помилка середнього значення паралельних вимірів, яку визначено згідно з [220].

При випробуванні поліпропіленових зразків помилка середнього значення паралельних вимірів знаходилась за такою формулою:

$$s_{\{\bar{y}\}}^2 = s_{\{y\}}^2 / n_n = \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{n_n} (y_{u,i} - \bar{y}_u)^2 / \left[ n_n \cdot \sum_{i=1}^N (n-1) \right] = 876/4 = 219,$$

де  $s_{\{y\}}^2$  – дисперсія відтворення;  $y_{u,i}$  – поточне значення паралельного вимірювання на  $u$ -му рівні варіювання частоти обертання валків профілю Рело та кута подачі;  $\bar{y}_u$  – середнє значення потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімерного зразка, на  $u$ -му рівні

варіювання;  $n_n$  – кількість паралельних вимірювань кожного дослідження;  $n$  – кількість досліджень (або кількість рівнів варіювання).

При випробуванні поліетиленових зразків помилка середнього значення паралельних вимірів знаходилась за такою формулою:

$$s_{\{\bar{y}\}}^2 = s_{\{y\}}^2 / n_n = \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{n_n} (y_{u,i} - \bar{y}_u)^2 / \left[ n_n \cdot \sum_{i=1}^N (n-1) \right] = 112/4 = 28.$$

Після підстановки помилки середнього значення паралельних вимірів у рівняння (5.16) було отримано довірчі інтервали коефіцієнтів регресії.

Для поліпропіленових зразків довірчі інтервали коефіцієнтів регресії дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 13,24; & \Delta b_1 &= \Delta b_2 = \pm 10,46; \\ \Delta b_{11} &= \Delta b_{22} = \pm 11,22; & \Delta b_{12} &= \pm 14,80. \end{aligned} \right\}$$

Для поліетиленових зразків довірчі інтервали коефіцієнтів регресії дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 4,74; & \Delta b_1 &= \Delta b_2 = \pm 3,75; \\ \Delta b_{11} &= \Delta b_{22} = \pm 4,02; & \Delta b_{12} &= \pm 5,30. \end{aligned} \right\}$$

Порівняння абсолютної величини коефіцієнтів і відповідних довірчих інтервалів показало, що всі коефіцієнти статично значимі, і тому рівняння регресії (5.14)-(5.15) не спрощуються.

Для перевірки адекватності отриманих рівнянь регресії реальним процесам визначався критерій Фішера, який розраховувався за такою формулою:

$$\Phi = s_{ao}^2 / s_{\{y\}}^2, \quad (5.17)$$

де  $s_{ao}^2$  – залишкова дисперсія (або дисперсія адекватності), яка визначалася з рівняння (5.11).

Підставивши значення (додаток П, табл. П.2-П.3) в рівняння (5.11), отримаємо дисперсію адекватності для результатів випробування полімерних зразків.

Для поліпропіленових зразків:

$$s_{ao}^2 = 14212 / [13 - 6 - (5 - 1)] = 4737.$$

Для поліетиленових зразків:

$$s_{ad}^2 = 2049/[13 - 6 - (5 - 1)] = 683.$$

Підставивши розраховану для результатів випробування поліпропіленових та поліетиленових зразків дисперсію адекватності в рівняння (5.17), отримаємо розрахункове значення критерію Фішера.

Для поліпропіленових зразків:

$$\Phi_{розр} = 4737/876 = 5,41.$$

Для поліетиленових зразків:

$$\Phi_{розр} = 683/112 = 6,10.$$

Порівнюючи знайдений критерій Фішера з табличним ( $5,41 < 9,10$  – при випробуванні поліпропіленових зразків;  $6,10 < 9,10$  – при випробуванні поліетиленових зразків), при вибраній надійній ймовірності, можна стверджувати, що рівняння регресії (5.14)-(5.15) є адекватними з 95%-ою надійною ймовірністю [220].

Для одержання натуральних рівнянь підставимо значення кодованого фактора  $X$ , згідно з виразом (5.4), у рівняння (5.14)-(5.15) і одержимо функції залежності витрат потужності на утворення одиниці вільної поверхні перероблених зразків з поліпропілену та поліетилену  $w$  від частоти обертання валків профілю Рело  $n$  та кута між осями обертання зубчастих валків та валків профілю Рело  $\alpha$ .

Функція залежності потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні, при переробці зразків:

– з поліпропілену:

$$w_{пп} = 4689 + 8,44 \cdot (n - 100) + 58,04 \cdot (\alpha - 45) + 0,14 \cdot (n - 100) \cdot (\alpha - 45) - 0,16 \cdot (n - 100)^2 - 0,1 \cdot (\alpha - 45)^2. \quad (5.18)$$

– з поліетилену:

$$w_{пе} = 7355 + 36,32 \cdot (n - 100) + 90,3 \cdot (\alpha - 45) + 0,7 \cdot (n - 100) \cdot (\alpha - 45) + 0,22 \cdot (n - 100)^2 - 0,72 \cdot (\alpha - 45)^2. \quad (5.19)$$

Отримані рівняння дозволяють описати зміну витрат потужності при утворенні одиниці вільної поверхні в результаті переробки поліпропіленових та поліетиленових зразків від конструктивних та технологічних параметрів пристрою із валками профілю Рело, а саме від частоти обертання валків та кута між осями обертання зубчастих валків і валків профілю Рело.

Ці залежності можна використовувати при розрахунках технологічних та конструктивних параметрів обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості.

### 5.3.3. Аналіз результатів експериментальних досліджень

На рис. 5.5-5.6 зображено графіки залежності витрат потужності при утворенні одиниці вільної поверхні від параметрів пристрою із валками Рело та від взаємного розташування валкових пристроїв, яке визначається кутом між осями обертання зубчастих валків та валків профілю Рело.

Як видно з рис. 5.6, при використанні валків профілю Рело, як і при використанні зубчастих валків, потужність, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні матеріалу, збільшується зі збільшенням частоти обертання валків.

Встановлено, що питома потужність, яка витрачається на утворення одиниці вільної поверхні полімерних відходів, в результаті збільшення частоти обертання валків вдвічі (з  $60 \text{ хв}^{-1}$  до  $120 \text{ хв}^{-1}$ ) зростає на 40 % при переробці поліпропіленових та на 25 % при переробці поліетиленових відходів. Таку різницю в зміні питомої потужності можна пояснити тим, що для поліетилену характерна більша доля пластичної деформації, ніж для поліпропілену. У зв'язку з цим, при однакових швидкостях деформації, що відповідають, наприклад, частоті обертання валків  $120 \text{ хв}^{-1}$ , структура поліетилену більше піддається деформації, ніж структура поліпропілену. В результаті, граничне навантаження для руйнування поліетиленових відходів не так суттєво залежить від швидкості деформації.

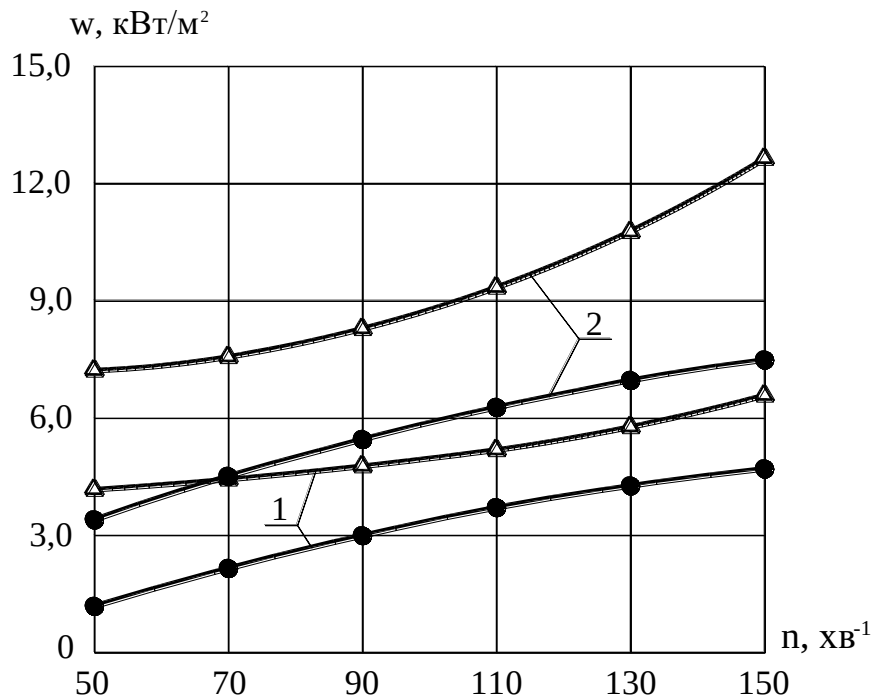


**Рис. 5.5.** Залежність витрат потужності при утворенні одиниці вільної поверхні полімерного зразка від частоти обертання валків:

1 – кут між осями обертання валкових пристроїв  $\alpha = 20^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 60^\circ$ ;

● – поліетиленовий зразок; —△— – поліпропіленовий зразок

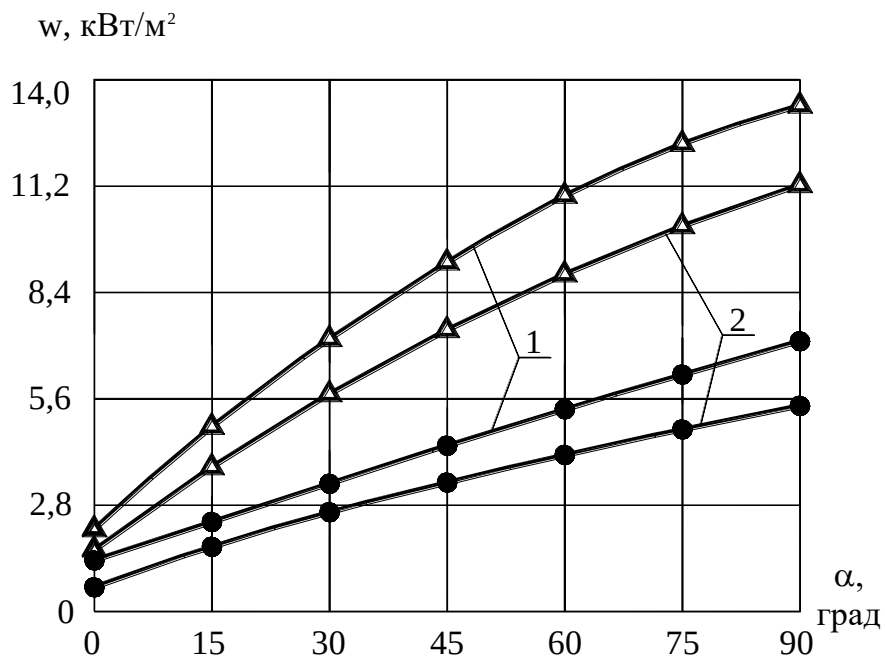


**Рис. 5.6.** Залежність витрат потужності при утворенні одиниці вільної поверхні полімерного зразка від кута подачі: 1 – частота обертання  $150 \text{ хв}^{-1}$ ;

2 – частота обертання  $50 \text{ хв}^{-1}$ ; ● – поліетиленовий зразок;

—△— – поліпропіленовий зразок

Як видно з рис. 5.6, кут між вісями обертання зубчастих валків та валків профілю Рело  $\alpha$  має значний вплив на величину потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімерного матеріалу. Це пояснюється тим, що від взаємного розташування валкових пристроїв залежить кут дії зсувних деформацій відносно напрямку попередньої орієнтації структури полімеру, а, як відомо з [214, 215, 218], фізико-механічні характеристики полімеру в перпендикулярному до орієнтації його структури напрямку є найнижчими, а отже, й руйнуючі навантаження зсуву в перпендикулярному напрямку до орієнтації структури полімеру є мінімальними.

#### **5.4. Експериментальні дослідження руйнування полімерних відходів на голкофрезовому пристрої**

##### **5.4.1. Загальні положення**

Як зазначалось раніше, окремий вузол експериментальної установки послідовно здійснює певний вплив на полімерні відходи. Відповідно, на кожній стадії експериментальних досліджень було отримано різні значення потужності, що витрачається на утворення одиниці площі вільної поверхні переробленого полімеру.

Так, на першій стадії переробки, коли полімерні зразки пропускалися між зубчастими валками, потужність, що витрачалася на утворення одиниці площі вільної поверхні зразків, була найбільшою. Трохи менше витрачалося потужності при утворенні одиниці вільної поверхні полімерних зразків на другій стадії переробки, коли зразки пропускалися між валками профілю Рело. Найменші витрати потужності при утворенні одиниці вільної поверхні перероблених полімерних зразків, спостерігалися на третій стадії переробки, коли зразки оброблювалися голкофрезною, у результаті чого відбувалася повна їх дезінтеграція на частинки з орієнтованою структурою.

Для перших двох стадій переробки полімерних зразків проводилися експериментальні дослідження, за допомогою яких отримано функціональні

залежності потужності, яке витрачається на утворення одиниці вільної поверхні перероблених зразків, від конструктивних та технологічних параметрів відповідних вузлів.

Мінімізація витрат потужності при утворенні одиниці площі вільної поверхні полімерних зразків на кожній стадії переробки дозволила визначити раціональні конструктивні та технологічні параметри окремих вузлів експериментальної установки. Але пристрої, що досліджувалися, не дозволяють отримувати необхідний кінцевий результат, тобто параметри, що були визначені вище, дозволяють мінімізувати витрати потужності на максимальну орієнтацію структури полімеру та часткове її руйнування в поперечному до орієнтації напрямку.

Для визначення раціональних конструктивних параметрів усіх вузлів обладнання та ефективних технологічних режимів його роботи, при яких забезпечується мінімальне споживання енергії для утворення одиниці вільної поверхні полімерних матеріалів проведено експериментальні дослідження повного циклу переробки полімерних відходів.

Звичайно, на відміну від попередніх двох моделей, ця модель буде менш точною і описуватиме тільки загальні тенденції, але її цілком достатньо для виконання передпроектних розрахунків.

#### **5.4.2. Опис експериментального пристрою та планування експериментальних досліджень**

Дослідження остаточного руйнування полімерних зразків за допомогою голкофрези проводилися на пристрої, схему якого наведено на рис. 5.7.

На цей пристрій подавалися пластично послаблені на попередніх двох пристроях полімерні зразки, які за допомогою голкофрези (додаток Р, рис. Р.1) подрібнювалися на частинки різних розмірів та форми (додаток Р, рис. Р.2-Р.3). Якщо полімерні зразки на попередніх двох пристроях послабилися недостатньо, то частинки перероблених на голкофрезі відходів можуть бути занадто малими або занадто великими.



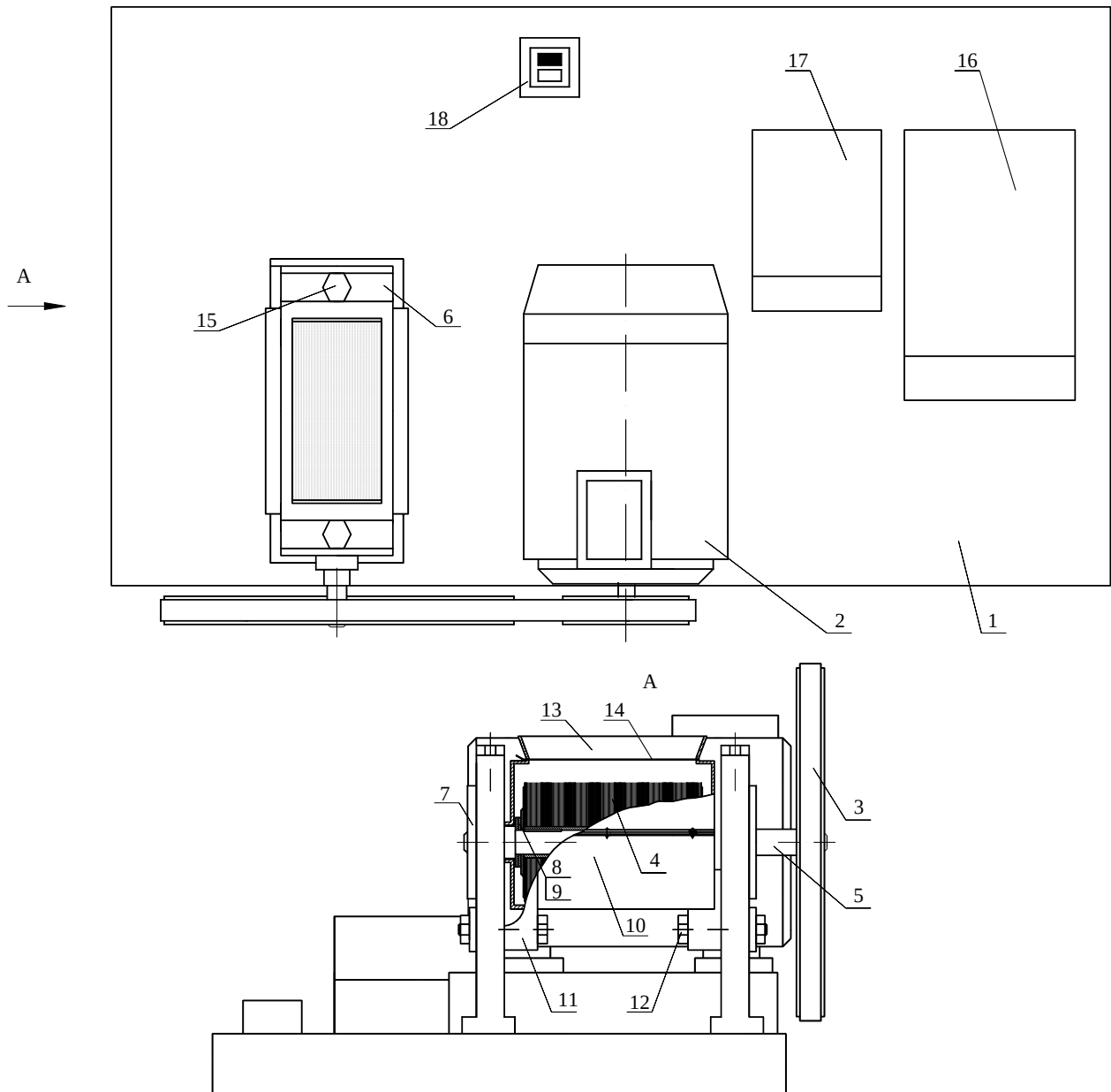


**Рис. 5.7. Експериментальна голкофрезова установка: 1 – плита; 2 – електродвигун; 3 – пасова передача; 4 – голкофреза; 5 – вал; 6 – стойки; 7 – підшипникові вузли; 8 – шайби; 9 – гайки; 10 – камера завантаження; 11 – спеціальні фіксатори; 12 – болти; 13 – люк камери завантаження; 14 – заслонка; 15 – регулювальні болти; 16 – пристрій для вимірювання потужності; 17 – трансформатор; 18 – вимикач**

Експериментальний голкофрезовий пристрій містить плиту 1, на якій розміщено електродвигун (АІР) 2, від якого через пасову передачу 3 передається обертання голкофрези 4. Голкофреза 4 закріплена на валу 5, що

монтується між двома стойками 6, в яких розміщено підшипникові вузли 7. Фіксація голкофрези 4 на валу 5 здійснюється за допомогою шайб 8 та гайок 9.

Закріплена на валу 5 голкофреза 4 поміщається в камеру 10, що монтується на спеціальних фіксаторах 11, які кріпляться до стійок 6 за допомогою болтів 12.

В камері 10 зверху передбачений отвір 13 для завантаження попередньо послабленого та частково зруйнованого на попередніх двох пристроях полімерного матеріалу. Для запобігання викиданню полімерного матеріалу через завантажувальний отвір 13, він закривається заслонкою 14.

Відстань між нижніми голками голкофрези 4 і днищем камери 10 можна регулювати болтами 15.

Для визначення потужності, що витрачається на переробку полімерного зразка, використовується пристрій для вимірювання потужності 16, який під'єднаний через трансформатор 17 до двигуна 2.

Запуск експериментальної установки здійснюється за допомогою вимикача 18.

За контрольований параметр для експериментальних досліджень процесу переробки полімерного матеріалу було вибрано потужність, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні переробленого матеріалу.

З метою дослідження зміни потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні подрібненого полімерного матеріалу, відповідно до розробленої у розділі 4 методики проектування обладнання для переробки полімерних відходів, було вибрано такі шість факторів:

- крок зубців валкового пристрою  $t$ , м;
- частота обертання зубчастих валків  $n_Z$ ,  $\text{хв}^{-1}$ ;
- частота обертання валків профілю Рело  $n_R$ ,  $\text{хв}^{-1}$ ;
- кут між осями обертання зубчастих валків та валків профілю Рело  $\alpha$ ;
- частота обертання голкофрези  $n_G$ ,  $\text{хв}^{-1}$ ;
- відстань між голкофрезою та ножами  $l$ , м.

Діапазон варіювання цих факторів вибирався на основі даних, отриманих із попередніх експериментальних вимірювань, дані наведено в таблиці 5.5.

Зразки для випробувань виготовлялися з полівінілхлориду, характеристики якого наведено в таблиці 3.2.

При обробці результатів багатофакторного експерименту як функцію будемо використовувати поліномом сьомого порядку. Для запису умов експерименту і обробки експериментальних даних рівні факторів кодувалися.

При кодуванні значень факторів, вплив яких досліджувався, верхній рівень позначали як  $+1$ , нижній як  $-1$ , а нульовий як  $0$ . Кодування факторів  $x_i$  визначалося виразом (5.4).

Таблиця 5.5

## Рівні та інтервали зміни факторів

| Позначення | Фактори                                              | Рівні варіювання |      |      |      |          | Інтервал варіювання |
|------------|------------------------------------------------------|------------------|------|------|------|----------|---------------------|
|            |                                                      | $-1,414$         | $-1$ | $0$  | $+1$ | $+1,414$ |                     |
| 1          | 2                                                    | 3                | 4    | 5    | 6    | 7        | 8                   |
| X1         | Частота обертання зубчастих валків, $\text{хв}^{-1}$ | 30               | 50   | 100  | 150  | 170      | 50                  |
| X2         | Крок зубців, мм                                      | 4,5              | 6    | 9,0  | 12   | 13,5     | 3                   |
| X3         | Частота обертання валків Рело, $\text{хв}^{-1}$      | 30               | 50   | 100  | 150  | 170      | 50                  |
| X4         | Кут подачі                                           | 0                | 15   | 45   | 75   | 90       | 30                  |
| X5         | Частота обертання голкофрези, $\text{хв}^{-1}$       | 300              | 500  | 1000 | 1500 | 1700     | 500                 |
| X6         | Відстань між голкофрезою та ножами, мм               | 0,3              | 0,5  | 1,5  | 2,0  | 2,2      | 0,5                 |

Матрицю плану для композиційного ротатбельного планування другого порядку наведено в табл. Р.1 (додаток Р).

Після реалізації робочої матриці ми отримали значення витрат потужності при утворенні одиниці вільної поверхні (додаток Р, табл. Р. 1) для зразків, виготовлених з полівінілхлориду.

Експериментальні дослідження проводилися за допомогою технології нелінійної оптимізації, яка дозволяє швидко та ефективно вирішувати

багатопараметричні задачі для необмеженої кількості змінних. Як об'єкт оптимізації може використовуватися будь-який об'єкт: математична модель, натуральний об'єкт, статистичні дані тощо. Програму розроблено з використанням мови програмування Java; вона може використовуватися в різних операційних системах [252]. У результаті обробки результатів експериментальних досліджень за допомогою цієї програми було отримано таке рівняння регресії в натуральній формі:

$$\begin{aligned}
 w = & 2,865 + 0,096 \frac{n_z - 100}{50} + 0,655 \frac{n_R - 100}{50} - 0,480 \frac{t - 9}{3} + 1,22 \frac{\alpha - 45}{45} + 0,52 \frac{n_G - 1000}{500} - \\
 & - 0,54 \frac{l - 1,25}{0,75} - 0,285 \frac{n_z - 100}{50} \frac{n_R - 100}{50} - 1,49 \cdot 10^{-8} \frac{n_z - 100}{50} \frac{t - 9}{3} - 1,35 \frac{n_z - 100}{50} \frac{\alpha - 45}{45} + \\
 & + 7,45 \cdot 10^{-8} \frac{n_z - 100}{50} \frac{n_G - 1000}{500} - 1,49 \cdot 10^{-8} \frac{n_z - 100}{50} \frac{l - 1,25}{0,75} - 1,49 \cdot 10^{-8} \frac{n_R - 100}{50} \frac{t - 9}{3} - \\
 & - 0,06 \cdot \frac{n_R - 100}{50} \frac{\alpha - 45}{45} - 2,24 \cdot 10^{-8} \frac{n_R - 100}{50} \frac{n_G - 1000}{500} - 3,73 \cdot 10^{-9} \frac{t - 9}{3} \frac{\alpha - 45}{45} + \\
 & + 4,47 \cdot 10^{-8} \frac{t - 9}{3} \frac{n_G - 1000}{500} + 9,31 \cdot 10^{-9} \frac{t - 9}{3} \frac{l - 1,25}{0,75} - 2,24 \cdot 10^{-8} \frac{\alpha - 45}{45} \frac{n_G - 1000}{500} + \\
 & + 2,61 \cdot 10^{-8} \frac{\alpha - 45}{45} \frac{l - 1,25}{0,75} - 0,25 \frac{n_z - 100}{50} - 0,63 \frac{n_R - 100}{50} + 0,12 \frac{t - 9}{3} - 0,25 \frac{\alpha - 45}{45} + 0,50 \frac{n_G - 1000}{500} + \\
 & + 0,12 \frac{l - 1,25}{0,75}.
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

Рівняння (5.20) може використовуватися для оптимізації конструктивних параметрів перероблювального обладнання та технологічних режимів його роботи для забезпечення мінімального значення потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні подрібнених полімерних відходів.

У результаті оптимізації конструктивних та технологічних параметрів обладнання для переробки полімерних відходів ми отримали такі значення параметрів валкових пристроїв та голкофрези: частота обертання зубчастого валка  $n_Z = 148 \text{ хв}^{-1}$ , валка профілю Рело  $n_R = 85 \text{ хв}^{-1}$ , голкофрези  $n_G = 600 \text{ хв}^{-1}$ , крок зубців  $t = 4,8 \text{ мм}$ , кут подачі пластично послаблених полімерних відходів на валки профілю Рело  $\alpha = 0^\circ$ , відстань між голкофрезою та ножами  $l = 0,8 \text{ мм}$ . Спроектвавши і виготовивши перероблювальний пристрій за оптимізованими факторами, отримаємо мінімальне значення потужності, що витрачається на

утворення одиниці вільної поверхні при переробці полівінілхлориду (марка ОПЛП-2 – використовуються для лиття низу взуття), яке становить  $2,62 \text{ кВт/м}^2$ .

### **Висновки до розділу 5**

1. Розроблено та виготовлено експериментальну установку для визначення потужності, що витрачається на орієнтацію структури та руйнування полімерного матеріалу, на якій проводилися дослідження впливу конструктивних параметрів перероблювального обладнання та технологічних режимів його роботи на витрату потужності для утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімеру.

2. Встановлено, що під час обробки полімерного матеріалу між зубчастими валками за допомогою розтягувальних та стискальних навантажень створюється напружено-деформований стан, у результаті якого структура полімерного матеріалу спочатку витягується в поперечному до його подачі напрямку, а потім, під впливом напружень стиску, що виникають в результаті входження валків у зачеплення, на вершинах зубців утворюються розриви поперек орієнтації структури матеріалу. Цей факт говорить про залежність довжини частинок перероблених відходів від кроку зубців валкового пристрою.

3. Встановлено, що під час обробки полімерного матеріалу між валками профілю Рело за допомогою стискальних та зсувних навантажень створюється напружено-деформований стан, у результаті якого в орієнтованій структурі полімерного матеріалу вздовж її орієнтації утворюються розриви, швидкість зростання яких різко збільшується при незначному збільшенні навантаження.

4. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що збільшення частоти обертання зубчастих валків та зменшення кроку зубців приводить до зменшення витрат потужності при утворенні одиниці вільної поверхні.

5. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при використанні валків профілю Рело, як і при використанні зубчастих валків, потужність, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні, збільшується

зі збільшенням частоти обертання валків. Так, в результаті збільшення частоти обертання валків вдвічі (з  $60 \text{ хв}^{-1}$  до  $120 \text{ хв}^{-1}$ ) питома потужність при переробці поліпропіленових відходів зростає на 40 %, а при переробці поліетиленових відходів – на 25 %. Це говорить про те, що граничне навантаження для руйнування поліетиленових відходів не суттєво залежить від швидкості деформації, як граничне навантаження для руйнування поліпропіленових відходів.

6. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що кут між вісями обертання зубчастих валків та валків профілю Рело має значний вплив на величину потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімерного матеріалу. Це пояснюється тим, що від взаємного розташування валкових пристроїв залежить кут дії зсувних деформацій відносно напрямку попередньої орієнтації структури полімеру, а, як встановлено в попередніх розділах, фізико-механічні характеристики полімеру в перпендикулярному до орієнтації його структури напрямку є найнижчими, тому у випадку паралельного обертання валків руйнування відбувається при мінімальних навантаженнях.

7. Вперше проведено шестифакторний експеримент, який передбачав дослідження впливу конструктивних параметрів перероблювального обладнання (кроку зубців, кута між вісями обертання валків, відстані між ножом і голкофрезою) та технологічних режимів його роботи (частоти обертання зубчастих валків, валків профілю Рело та голкофрези) на потужність, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні переробленого полімерного матеріалу.

8. Вперше визначено раціональні конструктивні параметри обладнання (крок зубців, кут між вісями обертання валків, відстань між ножом і голкофрезою) для переробки полімерних відходів та ефективні технологічні режими його роботи (частоту обертання зубчастих валків, валків профілю Рело та голкофрези), які забезпечують мінімальне споживання потужності при утворенні одиниці вільної поверхні.

## РОЗДІЛ 6

### ПРОЕКТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЛИТТЯ НИЗУ ВЗУТТЯ ІЗ СУМІШІ ПОЛІМЕРУ І ЧАСТИНОК ПЕРЕРОБЛЕНИХ ВІДХОДІВ

#### 6.1. Загальні положення

Сьогодні перероблені полімерні відходи можна використовувати в більшості технологічних процесів легкої промисловості, включаючи лиття під тиском, компресійне пресування, екструзію та каландрування. Найбільш прийнятними технологічним процесами є ті, що мають широкий діапазон технологічних параметрів, тобто такі, у яких непотрібне влучання у вузькі рамки специфікацій. Тому вторинно перероблений полімерний матеріал бажано використовувати при виробництві нових товарів легкої промисловості, які отримують литтям під тиском або екструзією. Інші способи формування полімерних виробів легкої промисловості можна застосовувати тільки в тих випадках, коли вторинний полімер має властивості, близькі до оригінального [94]. Найбільш перспективною на сьогодні технологією отримання полімерних виробів із використанням значної частки перероблених полімерних відходів є лиття під тиском полімерних виробів при введенні в них вторинних полімерів як з'єднувального матеріалу.

Полімерні вироби, що армуються подрібненими полімерним матеріалом, мають підвищені фізико-механічні характеристики [253], тому що основні напруження при впливові зовнішніх навантажень сприймаються саме полімерним наповнювачем і найбільша жорсткість та міцність виробу забезпечується вздовж напрямку орієнтації частинок наповнювача.

Розраховане та спроектоване в дисертації обладнання для переробки полімерних відходів дозволяє отримувати частинки, які можна використовувати як наповнювач при виробництві нових полімерних виробів легкої промисловості, тим більше, що частинки перероблених полімерних відходів володіють анізотропією фізико-механічних властивостей, тобто мають властивості подібні до армувальних волокон.

Для виробництва полімерних виробів легкої промисловості (деталей низу взуття, корпусів валіз та інших виробів) із використанням перероблених полімерних відходів необхідно розробити литтєву оснастку, що дозволяє використовувати перероблений полімер як наповнювач або сполучний елемент.

Для армованих виробів можна визначити домінантний фактор, що впливає на експлуатаційні властивості виробів, – це орієнтація частинок наповнювача. Всі інші параметри, такі як зміна тиску і температури, і навіть кристалізація, мають другорядне значення. Таким чином, відомі принципи конструювання прес-форм для лиття під тиском для мінімізації дефектів мають обмежену значимість, у той же час, на передній план виходять зовсім інші залежності.

Оскільки під час заповнення прес-форми полімерним матеріалом частинки наповнювача будуть мати певну орієнтацію, то властивості матеріалу, що переробляється, будуть мати анізотропний характер. У результаті використання наповнювачів з'являється локально різний розподіл жорсткості і усадки, що залежить від орієнтації частинок наповнювача по площі поверхні і товщині стінок виробу.

Розуміння процесів, що відбуваються при формуванні структури матеріалу із наповнювачем, дозволить конструювати і проектувати литтєву оснастку для отримання полімерних виробів легкої промисловості з підвищеними експлуатаційними властивостями [254]. Для цього передусім слід змоделювати заповнення порожнини прес-форми полімерним матеріалом із включеннями частинок перероблених відходів.

## **6.2. Математична модель руху розплаву полімеру в порожнині прес-форми**

Течія в'язкої рідини підпорядковується закону Ньютона про лінійний зв'язок між тензорами напружень і тензорами швидкостей, який з необхідною для нашої задачі точністю описується рівняннями Нав'є-Стокса [175, 255]:

$$\partial \bar{\mathbf{V}} / \partial t + (\bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{V}} = \bar{\mathbf{F}} - \text{grad } P / \rho + \nu \cdot \nabla^2 \bar{\mathbf{V}}, \quad (6.1)$$



де  $\bar{\mathbf{V}}$  – вектор швидкості в окремій точці полімерного середовища, м/с;  $\bar{\mathbf{F}}$  – головний вектор об'ємних сил, Н;  $\nu$  – кінематична в'язкість полімеру, м<sup>2</sup>/с;  $P$  – тиск в окремій точці розплаву полімеру, Па;  $\rho$  – густина полімерного середовища, кг/м<sup>3</sup>.

Тиск  $P$  визначається з урахуванням припущення про те, що в будь-якій точці ньютонівської в'язкої рідини тиск дорівнює середньому арифметичному трьох нормальних напружень, що прикладені до взаємно перпендикулярних площадок у певній точці середовища, взятому зі зворотнім знаком:

$$-(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3 = P, \quad (6.2)$$

де  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  – нормальні напруження, що прикладені до взаємно перпендикулярних площадок у певній точці середовища.

Оскільки в роботі розглянуто стаціонарне поле густини, тобто  $\partial\rho/\partial t = 0$ , то рівняння неперервності [173-176] приймає вигляд:

$$\operatorname{div}(\rho \cdot \bar{\mathbf{V}}) = 0. \quad (6.3)$$

Припущення щодо стаціонарності поля густини базується на тому, що полімерне середовище майже не стискається, тобто міжмолекулярні відстані не змінюються. Якщо рух полімерного середовища в прес-формі здійснюється з порівняно невеликою швидкістю, то можна припустити, що густина постійна в кожній точці розплаву полімеру, а це дозволяє отримати рівняння нестисливості для в'язкого середовища:

$$\operatorname{div}(\bar{\mathbf{V}}) = 0. \quad (6.4)$$

Запишемо рівняння руху (6.1) для розплаву полімеру в декартових координатах (в проекціях  $x$  та  $y$ ):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \cdot \nabla^2 u; \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \cdot \nabla^2 v, \quad (6.5)$$

де  $u$ ,  $v$  – проекції вектора швидкості на осі  $x$  і  $y$ ;  $F_x$ ,  $F_y$  – проекції головного вектора об'ємних сил на вісі  $x$  і  $y$ ;  $t$  – час;  $\nu$  – кінематична в'язкість розплаву полімеру, що дорівнює відношенню динамічної в'язкості  $\mu$  до постійної густини  $\rho$ .

Запишемо умову нестисливості розплаву полімеру в декартових координатах (в проекціях  $x$  та  $y$ ):

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y = 0. \quad (6.6)$$

Проекції головного вектора об'ємних сил можна визначити за другим законом Ньютона:

$$F_x = \rho \cdot S \cdot h \cdot \partial v_x / \partial t, \quad F_y = \rho \cdot S \cdot h \cdot \partial v_y / \partial t, \quad (6.7)$$

де  $S$  – площа вздовж вісьового перерізу порожнини прес-форми для лиття полімерних виробів легкої промисловості,  $\text{м}^2$ ;  $h$  – висота прес-форми,  $\text{м}^2$ .

Через те, що на цьому етапі розглядається плоска задача, тобто рух розплаву полімеру відбувається в площині вісьового перерізу порожнини прес-форми, висота  $h$  та, відповідно, проекції головного вектора об'ємних сил  $F_x$ ,  $F_y$ , дорівнюють нулю. З урахуванням цього та умови нестисливості (6.6), система рівнянь руху розплаву полімеру в порожнині прес-форми (6.5) запишеться таким чином:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right]; \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right], \quad (6.8)$$

де  $p$  – відношення тиску  $P$  до постійної густини  $\rho$  (надалі просто “тиск”).

Для визначення тиску скористаємося рівнянням Пуассона:

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = -\frac{\partial D}{\partial t} - u \frac{\partial D}{\partial x} - v \frac{\partial D}{\partial y} + \nu \cdot \nabla^2 D, \quad (6.9)$$

де  $D$  – дивергенція вектора швидкості, яка визначається таким співвідношенням:

$$D = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y. \quad (6.10)$$

Отже, система рівнянь (6.8) та рівняння (6.9) є основними для визначення полів швидкості та тиску. Якщо врахувати припущення, що потік в'язкої рідини є нестисливим, тобто врахувати умову (6.6), то рівняння (6.9) перетвориться на рівняння Лапласа для тиску  $p$ :

$$\nabla^2 p = 0. \quad (6.11)$$

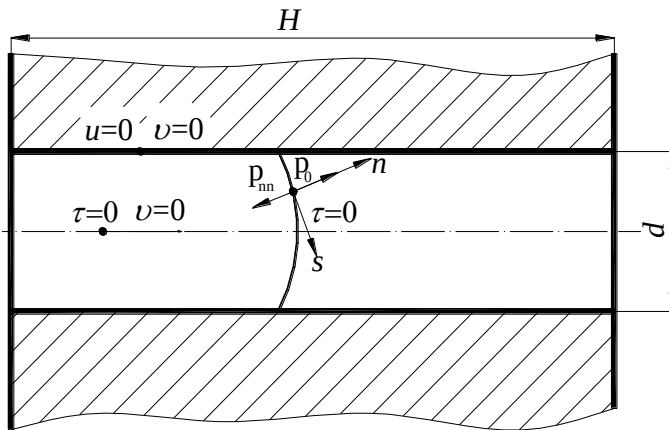


**Рис. 6.1. Граничні умови для моделі заповнення порожнини прес-форми полімерним розплавом**

Додамо до них граничні умови на вісі симетрії, на границі входження в канал, на твердих поверхнях порожнини прес-форми, на вільній поверхні полімерного розплаву (рис. 6.1).

1. Граничні умови на вісі симетрії. Відповідно до [175, 176], будемо вважати, що на вісі симетрії радіальна швидкість  $v$  і тангенціальне напруження  $\tau$  дорівнюють нулю.

2. Граничні умови біля твердих стінок. Відповідно до [176], приймемо, що в точках, де розплав полімеру дотикається до твердої нерухомої стінки, швидкість його прямує до нуля, тобто в точках дотику полімерного розплаву з твердою нерухомою стінкою нормальна і дотична складові швидкості дорівнюють нулю:  $u = 0$ ,  $v = 0$  (рис. 6.1). Граничні умови для тиску біля твердих стінок і на вісі симетрії невідомі, їх можна знайти із системи рівнянь (6.8) підставленням в них граничних швидкостей.

3. Граничні умови на границі втікання. Відповідно до [173], тут задається один із компонентів вектора швидкості. Початковими умовами задачі є значення швидкостей і тиску в початковий момент часу.

4. Граничні умови на вільній поверхні. На вільній поверхні, де передбачається, що полімерний розплав витікає з області, що розглядається, ставляться так звані “м’які” граничні умови, або умови “зносу”. Тут передбачається рівність нулю нормальних похідних тиску і компонент швидкості:

$$\frac{\partial p_n}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (6.12)$$

У цій роботі розглядаються порівняно повільні рухи в’язких рідин, а відповідно до теорії в’язкого середовища [175] і враховуючи повільний рух щільного розплаву полімеру, рівняння (6.8) можна записати таким чином:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \nu \cdot \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - \frac{\partial u}{\partial t}; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \nu \cdot \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] - \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (6.13)$$

Якщо використати гіпотезу квазістаціонарності [176], тобто весь процес руху полімерного розплаву розбити на кінцеву кількість стаціонарних задач, то систему рівнянь (6.13) можна представити таким чином:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \nu \cdot \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right]; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \nu \cdot \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right]. \quad (6.14)$$

Розв'язувати рівняння (6.11) та систему рівнянь (6.14) із заданими граничними умовами будемо за допомогою скінченнорізницевого методу маркерів і комірок [198].

Метод маркерів і комірок являє собою числовий підхід до розрахунку динаміки неусталених течій в'язкого нестисливого середовища. У ньому використовується скінченнорізницева схема для вирішення рівняння нерозривності та рівнянь руху суцільного середовища [175, 176]. Цим методом можна розраховувати задачі руху в'язкого полімерного розплаву, при цьому положення полімерного матеріалу відзначається маркерами. Такі маркери переміщуються разом із матеріалом по ейлеревій розрахунковій сітці.

У методі маркерів і комірок усі диференціальні рівняння та граничні умови записуються у скінченних різницях на сітці фіксованих комірок, що покриває область течії полімерного розплаву. Час також розбивається на скінченне число інтервалів. В об'єм полімеру та на його поверхню наноситься система маркерів, що безпосередньо зв'язані з полімерним матеріалом. Ці маркери можуть переміщуватися по ейлеревій сітці з локальною швидкістю полімеру, показуючи його положення у певний момент часу відповідно до рівняння Лагранжа:

$$dx/dt = u, \quad dy/dt = v. \quad (6.15)$$

У такий спосіб маркери вводяться тільки для візуалізації плину розплаву полімеру. Вони показують, які комірки містять полімерний матеріал (заповнені комірки), які не містять (порожні комірки). Їхня основна задача – візуалізація потоку полімерного розплаву. Типова комірка представлена на рис. 6.2.

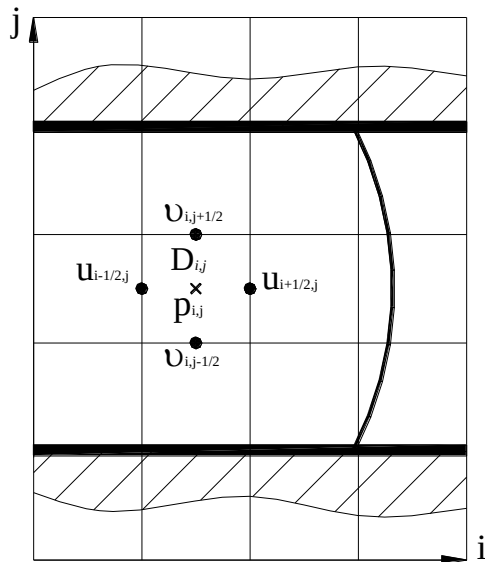


**Рис. 6.2. Розрахункова схема**

Для протікання розплаву полімеру через цю комірку повинна виконуватися умова нестисливості, тобто відстань між маркерами, що знаходяться в межах елементарної комірки, не повинна змінюватися в процесі течії.

У кожній комірці визначаються три незалежні змінні  $u$ ,  $v$  та  $p$  і кожна з них центрується в окремих точках сітки. Тиск  $p$  та дивергенція  $D$  задаються в центрі  $i, j$  кожної комірки.

Горизонтальна складова швидкості  $u_{i+1/2,j}$  визначається тільки на вертикальних границях комірок  $(x_{i+1/2}, y_j)$  і, аналогічно, вертикальна складова швидкості  $v_{i,j+1/2}$  визначається тільки на горизонтальних границях комірок  $(x_i, y_{j+1/2})$ . Надалі, щоб уникнути півцілих індексів, швидкості  $u_{i+1/2,j}$  і  $v_{i,j+1/2}$  будемо позначати  $u_{i,j}$  і  $v_{i,j}$ , тобто віднесемо індексацію швидкостей до центра, пам'ятаючи, що вони центровані на серединах сторін комірки.

Як зазначалося раніше, граничні умови біля твердих стінок містять нормальні похідні тиску. Для їх задовільнення необхідно увести фіктивні комірки, які розташовані за межами фізичної твердої границі [256].

По ейлеревій сітці розподіляються маркери, що рухаються з локальними швидкостями. У результаті конфігурація в'язкої рідини визначається розподілом маркерів по ейлеревій сітці, яка складається з чотирьох типів комірок [176]: граничні комірки, в яких виконуються умови біля твердих стінок, границь втікання, осі симетрії; повні комірки, які містять маркери та оточені іншими повними комірками; порожні комірки, які не містять маркерів; поверхневі комірки, які містять маркери, але межують із порожніми комірками.

Використовуючи [173, 175], запишемо диференціальні рівняння руху (6.14), що описують плин розплаву полімеру, у скінченнорізницевої формі, замінюючи диференціальні оператори їхніми різницевиими аналогами:

$$\frac{p_{i,j} - p_{i+1,j}}{h} + \nu \cdot \left[ \frac{u_{i+1,j} - 2 \cdot u_{i,j} + u_{i-1,j}}{h^2} + \frac{u_{i,j+1} - 2 \cdot u_{i,j} + u_{i,j-1}}{h^2} \right] = 0, \quad (6.16)$$

$$\frac{p_{i,j} - p_{i,j+1}}{h} + \nu \cdot \left[ \frac{v_{i+1,j} - 2 \cdot v_{i,j} + v_{i-1,j}}{h^2} + \frac{v_{i,j+1} - 2 \cdot v_{i,j} + v_{i,j-1}}{h^2} \right] = 0. \quad (6.17)$$

Скінченнорізницевий аналог рівняння нерозривності (6.6) запишемо у вигляді:

$$D_{i,j} = (u_{i,j} - u_{i-1,j} + v_{i,j} - v_{i,j-1})/h = 0. \quad (6.18)$$

Поле тиску відповідно до рівняння (6.11), в різницевої формі запишеться так:

$$(p_{i+1,j} - 2 \cdot p_{i,j} + p_{i-1,j})/h^2 + (p_{i,j+1} - 2 \cdot p_{i,j} + p_{i,j-1})/h^2 = 0. \quad (6.19)$$

Аналогічно в скінчених різницях запишемо граничні умови для комірок біля твердих стінок, на границі втікання, на осі симетрії та на вільній поверхні, що межує з повітрям [256].

Наведені вище вирази утворюють повну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення всіх невідомих у різних типах комірок – граничних, повних та поверхневих. Для розв’язання згаданих систем рівнянь доцільно використовувати ітераційні методи, що враховують спеціальний вигляд таких систем і є зручними для реалізації на ЕОМ [174].

В роботі використано ітераційний метод Лібмана [257], з проведенням послідовних релаксацій:

$$x^k = x^{k-1} + \omega \cdot (\mathbf{f} - \mathbf{A} \cdot x^{k-1}), \quad (6.20)$$

де  $\omega$  – релаксаційний параметр, який приймає значення від 0 до 2. При  $\omega > 1$  процес називають “верхньою” релаксацією, при  $\omega < 1$  процес називають “нижньою” релаксацією.

Результати спостережень за процесами, що відбуваються при формуванні структури матеріалу із наповнювачем, дають можливість конструювати і

проекувати литтєву оснастку для отримання полімерних виробів легкої промисловості з підвищеними експлуатаційними властивостями.

### 6.3. Моделювання заповнення порожнини прес-форми розплавом полімеру із включеннями

Під час впорскування розплаву полімеру через літник у порожнину прес-форми, він починає розподілятися в радіальному напрямку [257]. Оскільки периметр фронту течії збільшується, то розплав піддається еластичному розширенню під прямим кутом до напрямку течії. У той час, як порожнина прес-форми заповнюється розплавом, у напрямку її ширини встановлюється профіль потоку (рис. 6.3). Найбільша швидкість розплаву полімеру в середині потоку, а по краях вона зменшується аж до нуля через адгезію з холодними стінками прес-форми. Внаслідок цього розплав піддається зусиллям зсуву, які й створюють опір течії і тим самим тиск лиття.

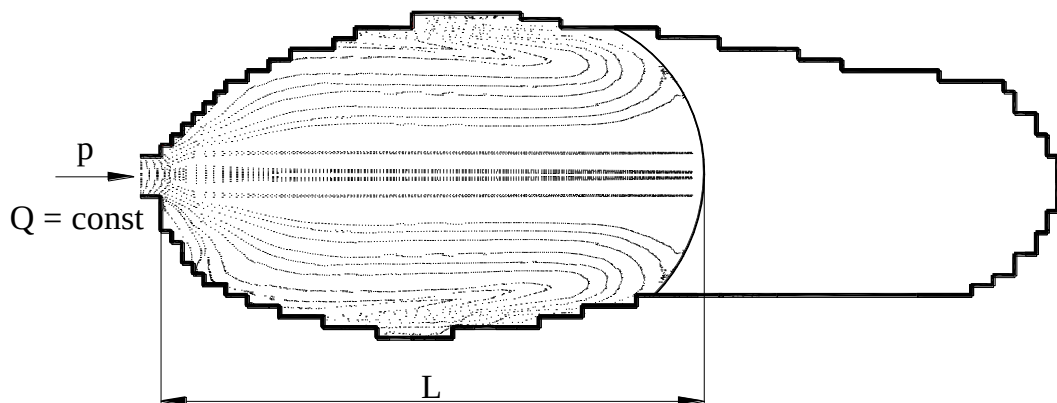


**Рис. 6.3. Моделювання заповнення розплавом полімеру порожнини прес-форми для лиття підшов**

Зсув матеріалу, проте, не є однорідним відносно товщини стінки. Більше того, поблизу стінки існує яскраво виражений зсувний шар, у той час як у центрі розплав тече швидше і майже не схильний до зсуву. Частина розплаву, яка дуже швидко тече вперед у середньому шарі, врешті-решт, направляється “фонтаноподібним” фронтом течії у безпосередню близькість до стінки прес-

форми і тим самим підпадає під вплив напружень зсуву. Початкова орієнтація частинок наповнювача не впливає на їх кінцеву орієнтацію.

Таким чином, орієнтація включень формується у результаті розширення потоку розплаву полімеру, “фонтаноподібної” течії фронту розплаву та під впливом напружень зсуву (рис. 6.4).

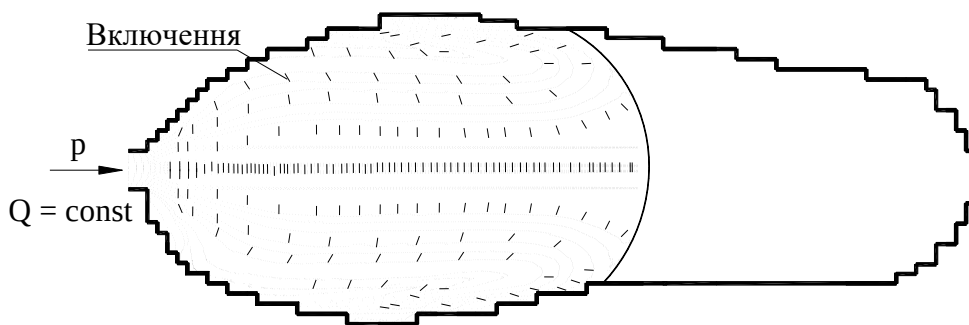


**Рис. 6.4. Моделювання заповнення порожнини прес-форми розплавом полімеру із наповнювачем**

Як видно з рис. 6.4, у порожнині прес-форми процеси формування орієнтації частинок наповнювача накладаються один на одного. Розплав разом із включеннями, потрапляючи через літник у порожнину, отримує спочатку яскраво виражену поперечну орієнтацію, потім він разом із потоком у центрі порожнини переміщується в напрямку фронту розплаву, не відчуваячи при цьому практично ніякої зміни орієнтації, тобто включення, як і раніше, орієнтовані поперек напрямку потоку [258]. На фронті розплаву розплав із включеннями перенаправляється до стінок прес-форми і внаслідок цього потрапляє у зсувний потік, який переорієнтовує включення. Таким чином, внаслідок обох процесів у полімерному виробі виникають два шари [259], в кожному з яких основний напрямок частинок повернутий на  $90^0$  відносно іншого шару.

Механічні властивості виробу будуть залежати від товщини цих шарів і від відповідного кута орієнтації включень. У тих місцях, де переважають периферійні шари, орієнтація включень спрямована вздовж течії, а ближче до центру потоку розплаву кут орієнтації включень збільшується до  $90^0$ . Таким чином, біля стінок прес-форми формується такий шар полімеру, в якому







Шнеки 3 і 5, обертаючись, рухаються в напрямку від прес-форми 1. У результаті цього частинки перероблених відходів потрапляють у впускний канал 6 прес-форми 1, а гомогенний розплав полімеру заповнює зону дозування матеріального циліндру 4, що знаходиться перед шнеком 5. Забезпечивши необхідний об'єм частинок відходів і розплав полімеру, шнеки 3 і 5 зупиняються і починають рухатися без обертання в протилежному напрямку зі швидкостями, які забезпечують рівномірний розподіл частинок в об'ємі підосви.

#### **6.4.2. Визначення параметрів пристрою та режимів подачі перероблених відходів у впускний канал прес-форми**

Для переміщення полімерних відходів найбільш зручним і простим в експлуатації є шнековий конвеєр (рис. 6.7). Даний пристрій транспортує перероблені полімерні частинки до впускного каналу прес-форми.

Сьогодні не достатньо глибоко досліджені процеси, що пов'язані з рухом нерозплавленого полімерного матеріалу в матеріальному циліндрі. В більшості роботах досліджується процес лиття під тиском та процеси заповнення прес-форм і формування виробів [97, 173, 254]. При цьому досить незначна увага приділяється переміщенню полімерного матеріалу без його гомогенізації.

Транспортування добре сипучих полімерних матеріалів, що мають достатньо велику насипну вагу, не є досить серйозною проблемою. Але транспортування частинок полімеру різних за формою та розмірами (подрібнені відходи) становить досить складну задачу.

Після потрапляння частинок полімерного матеріалу в канал шнека механізм переміщення матеріалу стає примусовим. Сили ваги все ще можуть відігравати незначну роль, але сили проштовхування переважають.

На матеріал, що транспортується діють такі сили (рис. 6.8):  $F_b$  – сила тертя, що діє з боку корпусу на полімерні частинки, і змушує її рухатися по гвинтовому каналу шнека;  $F_{r1}$  і  $F_{r2}$  – реакції відкинутих кусків спресованих

частинок;  $F_{n1}$  і  $F_{n2}$  – нормальні сили, що діють на корку збоку стінок шнека;  $F_s$  – нормальна сила, що діє на частинки полімеру з боку серцевини шнеку у випадку, якщо ця серцевина є конічною;  $F_{s1}$  і  $F_{s2}$  – сили тертя, відповідно, з боку штовхаючої та передньої стінки шнека;  $F_k$  – сила тертя, що діє на частинки збоку днища каналу.

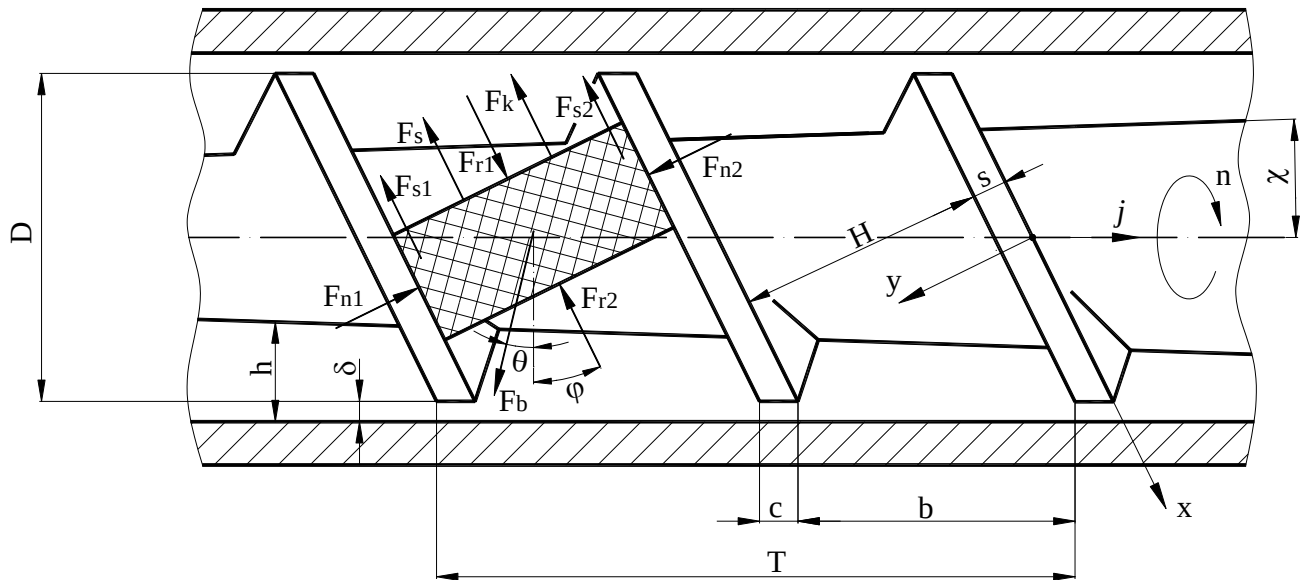


**Рис. 6.8. Розрахункова схема сил, діючих на полімерні частинки**

Вперше повний аналіз переміщення твердих частинок в традиційному одношнековому екструдері був виконаний в роботах [263]. Аналіз, що представляється в даній роботі, є розширений з врахуванням усіх зазначених вище сил [264, 265].

При моделюванні переміщення частинок полімеру в матеріальному циліндрі основне припущення полягає в тому, що тверді частинки, ущільнюючись, утворюють конгломерати, в яких відсутні деформації зсуву, а ущільнення частинок є в'язкопружним. На конгломерати частинок діють сили тертя, які виникають між ними та поверхнями черв'яка і матеріального циліндра [177]. До вказаного припущення додаємо ще такі: конгломерати частинок являють собою неперервний потік; суцільний шар частинок контактує зі всією поверхнею каналу; нехтуємо зазором над гребенем, гравітаційними силами та кривизною каналу.

Розглянемо механізм руху згрупованих частинок перероблених полімерних відходів у гвинтовому каналі черв'яка (шнека), що обертається в середині матеріального циліндру (рис. 6.9).

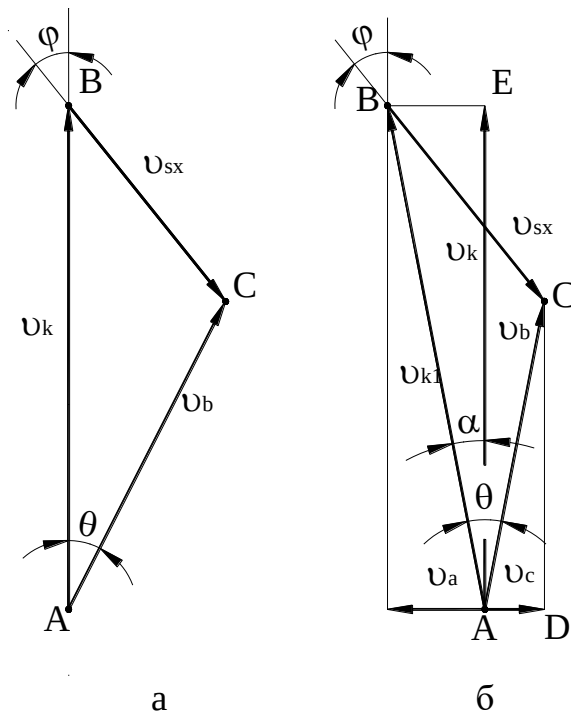


**Рис. 6.9. План швидкостей:**  
**а – шнек тільки обертається;**  
**б – шнек обертається і переміщається**  
**вздовж вісі**

Виберемо точку А (деяку точку конгломерату частинок), яка в початковий момент часу співпадає з відповідною точкою гвинтового каналу. Прийmemo, що шнек обертається за годинниковою стрілкою, якщо дивитися з кінця матеріального циліндру. Тоді точка каналу шнека буде рухатися знизу до гори зі швидкістю  $v_k$  і за час  $t_{ab}$  переміститься на відстань АВ. Одночасно під дією сили тертя між частинками матеріалу і внутрішньою стінкою матеріального циліндра частинки переміщуються з точки А в точку С зі швидкістю  $v_b$ .

Відповідно, вздовж каналу частинки просунуться вниз по каналу на відстань ВС зі швидкістю  $v_{sx}$  ( $x$  – вісь, що спрямована вздовж вісі розгортки гвинтового каналу), яка визначається кутом нахилу гвинтової лінії гребеня  $\varphi$ . Таким чином, кут переміщення конгломератів частинок перероблених відходів  $\theta$  є кутом між швидкістю руху шнека і швидкістю корки  $v_b$  відносно стінки матеріального циліндра.

У випадку коли шнек крім обертання має ще вісьове переміщення план швидкостей будується таким чином (рис. 6.9 б). Як видно з рис. 6.9 б точка А перемістилася у точку В за час  $t_{ab}$ , але рухалась зі швидкістю  $v_{k1}$ , яка складається з тангенціальної (колової)  $v_k$  і аксіальної (вздовж осі шнека)  $v_a$  швидкостей. Кут  $\alpha$  між  $v_k$  і  $v_{k1}$  визначається з такого рівняння

$$\operatorname{tg} \alpha = v_a / v_k, \quad (6.21)$$

де  $v_k = \pi D n$  – колова швидкість шнека;  $n$  – частота обертання шнека,  $\text{с}^{-1}$ ;  $D$  – діаметр шнека, м.

Зрозуміло, що на швидкість  $v_{sx}$ , з якою частинки полімеру переміщуються вздовж каналу, швидкість вісьового переміщення шнека не впливає, тому визначити її можна з трикутника  $ABC$  (рис. 6.9 а):

$$v_{sx} = v_k \cdot \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \varphi)} = \pi D n \cdot \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \varphi)}. \quad (6.22)$$

У випадку однозахідного шнека, тобто  $i = 1$ , об'ємну швидкість переміщення матеріалу можна визначити з такого рівняння:

$$Q = v_{sx} H \cdot h, \quad (6.23)$$

де  $H$  – ширина каналу шнека, м;  $h$  – глибина гвинтового каналу, м.

Підставивши в рівняння (6.23) формулу для визначення швидкості  $v_{sx}$  та вираз для визначення ширина каналу  $H$ , що був отриманий в роботі [264], отримаємо:

$$Q = \pi D n \cdot \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \varphi)} \pi D h \cdot \sin \varphi = \pi^2 D^2 h n \frac{\sin \theta \cdot \sin \varphi}{\sin(\theta + \varphi)}. \quad (6.24)$$

Кут переміщення матеріалу  $\theta$  визначимо розглянувши усталений рух та припускаючи, що при цьому сили тертя, які діють на конгломерати частинок з боку гвинтового каналу ( $F_{s1}$ ,  $F_{s2}$ ,  $F_k$ ) і сили тертя, які діють з боку внутрішньої поверхні матеріального циліндру ( $F_b$ ) можуть бути зв'язані таким співвідношенням [263]:

$$F_{\Sigma} = F_{s1} + F_s + F_k = F_b \cos(\theta + \varphi), \quad (6.25)$$

Припустивши, що реакція стінок каналу шнека і матеріального циліндра однакова, для визначення кута переміщення  $\theta$  можна скористатися таким рівнянням [97]:

$$\theta = \arcsin \left( \sqrt{1 + f_s^2 - k^2} / [1 + f_s^2] \right) - \varphi, \quad (6.26)$$

де

$$k = H/i \cdot f_s \cdot \ln(P/P_0) + f_s/f_b \cdot (1 + 2h/H), \quad (6.27)$$

$P$  – поле тиску вздовж гвинтового каналу шнека, Па;  $P_0$  – тиск на початку гвинтового каналу, Па;  $f_b, f_s$  – коефіцієнт тертя між полімерними частинками та, відповідно, внутрішньою стінкою матеріального циліндра і стінками гвинтового каналу шнека.

Вираз для визначення поля тиску вздовж гвинтового каналу шнека отримаємо на основі рівняння балансу сил в повздовжньому та поперечному напрямках каналу. Перед побудовою рівняння балансу сил визначимо усі сили, що діють на елемент конгломерату частинок під час його руху вздовж каналу шнека.

Силу тертя, що діє на матеріал збоку стінки матеріального циліндра і змушує її пересуватися вздовж гвинтового каналу шнека, можна визначити з такого рівняння:

$$F_b = f_b P_b H dx = f_b K_s P H dx, \quad (6.28)$$

де  $P_b$  – тиск збоку матеріалу на стінку матеріального циліндра, Па;  $P$  – питомий тиск конгломерату частинок перероблених відходів, Па;  $K_s = P_b/P$  – коефіцієнт, що характеризує анізотропію поля тиску.

Коефіцієнт  $K_s$  також можна визначити з такого рівняння [263]:

$$K_s = \frac{1 - \sin(\arctg f)}{1 + \sin(\arctg f)}, \quad (6.29)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя між частинками полімерного матеріалу.

Вісьова і тангенціальна компоненти  $F_b$  відповідно можна визначити в такий спосіб:

$$\begin{aligned} F_{bj} &= f_b P_b H \cdot \sin \theta \cdot dx = f_b K_s P H \cdot \sin \theta \cdot dx, \\ F_{b\theta} &= f_b P_b H \cdot \cos \theta \cdot dx = f_b K_s P H \cdot \cos \theta \cdot dx. \end{aligned} \quad (6.30)$$

Реакції відкинутих кусків спресованих частинок можна визначити помноживши питомий тиск на площу поперечного перерізу каналу, тобто:

$$F_{r1} = H \cdot h \cdot P; \quad F_{r2} = H \cdot (h - dx \cdot \operatorname{tg} \chi) \cdot (P + dP). \quad (6.31)$$

Якщо серцевина шнека є конічною, то вздовж його довжини глибина гвинтового каналу плавно зменшується, тобто будемо мати результуючу силу  $F_r$ , що дорівнює різниці між реакціями відкинутих кусків:

$$F_r = F_{r2} - F_{r1} = H \cdot (h - dx \cdot \operatorname{tg} \chi) \cdot (P + dP) - H \cdot h \cdot P = dP \cdot H(h - dx \cdot \operatorname{tg} \chi) - P \cdot H \cdot dx \cdot \operatorname{tg} \chi. \quad (6.32)$$

Нормальні сили, що діють з боку стінок каналу шнеку на частинки, можна визначити таким чином:

$$F_{n2} = P_n h dx = PK_s h dx; \quad F_{n1} = PK_s h dx, \quad (6.33)$$

де  $F_{n1}$  – нормальна сила, що діє з боку передньої стінки каналу шнека, Н;  $F_{n2}$  – нормальна сила, що діє з боку штовхаючої стінки каналу шнека, Н.

Крім того, в шнеках з конічною серцевинною збоку останньої діє додаткова нормальна сила  $F_s$ , яку визначимо з такого рівняння [263]:

$$F_s = PK_s H \chi dx. \quad (6.34)$$

Сили тертя, що діють на матеріал збоку штовхаючої і передньої стінки каналу шнека, відповідно, дорівнюють:

$$F_{s2} = F_{n2} \cdot f_s = PK_s h f_s dx, \quad F_{s1} = F_{n1} \cdot f_s = (PK_s h dx + F^*) f_s. \quad (6.35)$$

Сила тертя, що діє на матеріал збоку дна каналу, дорівнює:

$$F_k = PK_s H f_s dx. \quad (6.36)$$

При нормальній роботі шнекового конвеєра сума проекцій всіх сил на вісь шнека має дорівнювати нулю, тобто:

$$(F_b)_j + (F_r)_j + (F_s)_j + (F_{n1} - F_{n2})_j + (F_{s1} - F_{s2})_j + (F_k)_j = 0. \quad (6.37)$$

Вісьові компоненти сил отримаємо, перемножуючи їх на  $\sin \varphi$ ,  $\sin \bar{\varphi}$ ,  $\sin \varphi_s$  (рис. 6.10). Сили, що діють в площині дна каналу, перемножимо на  $\sin \varphi_s$ ; сили, що діють в площинах бокових поверхонь каналу, перемножимо на  $\sin \bar{\varphi}$ ; сили, що діють в площині дотику матеріалу та стінки матеріального циліндру, перемножимо на  $\sin \varphi$ :

$$F_b \cdot \sin \varphi + F_r \cdot \sin \bar{\varphi} + F_s \cdot \sin \varphi_s + (F_{n1} - F_{n2}) \cdot \sin \bar{\varphi} + (F_{s1} - F_{s2}) \cdot \sin \bar{\varphi} + F_k \cdot \sin \varphi_s = 0. \quad (6.38)$$

Запишемо рівняння рівноваги в моментах відносно осі шнека. Для цього слід кожену силу перемножити на відповідне значення радіусу.



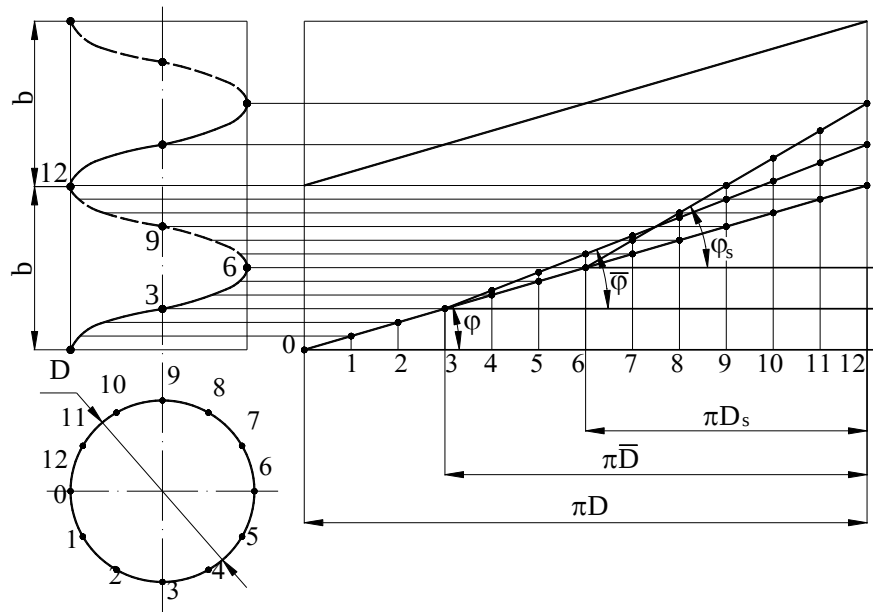


**Рис. 6.10. Розгортка гвинтової лінії шнека**

Якщо сили прикладені в площині дна гвинтового каналу шнека, то діаметр дорівнює  $D_s = D - 2h$ , якщо сили прикладені в площинах бокових поверхонь каналу, то діаметр дорівнює  $\bar{D} = D - h$ . З урахуванням сказаного вище рівняння рівноваги в моментах відносно осі шнека запишеться в такий спосіб:

$$0,5 \cdot [(F_b)_\theta \cdot D - (F_r)_\theta \cdot \bar{D} - (F_s)_\theta \cdot D_s - (F_{n1} - F_{n2})_\theta \cdot \bar{D} - (F_{s1} - F_{s2})_\theta \cdot \bar{D} - (F_k)_\theta \cdot D_s] = 0. \quad (6.39)$$

Аналогічно, тангенціальні компоненти сил отримаємо множенням модуля відповідного вектору сили на  $\cos \varphi$ ,  $\cos \bar{\varphi}$ ,  $\cos \varphi_s$  залежно від площини дії сили (рис. 6.10).

$$F_b \cdot \cos \varphi \cdot D - F_r \cdot \cos \bar{\varphi} \cdot \bar{D} - F_s \cdot \cos \varphi_s \cdot D_s - (F_{n1} - F_{n2}) \cdot \cos \bar{\varphi} \cdot \bar{D} - (F_{s1} - F_{s2}) \cdot \cos \bar{\varphi} \cdot \bar{D} - F_k \cdot \cos \varphi_s \cdot D_s = 0. \quad (6.40)$$

Перетворюючи рівняння (6.38), (6.40) і виконуючи інтегрування в межах відстані транспортування полімерних відходів, отримаємо вираз для визначення тиску на виході:

$$P_2 = P_1 \cdot \exp \left[ \int_{z_1}^{z_2} (B_1 - A_1 K) / (A_2 K + B_2) dz \right], \quad (6.41)$$

де  $P_1$  – тиск на початку транспортування полімерних відходів, тобто на відстані  $z_1=0$ ;  $P_2$  – тиск наприкінці транспортування, тобто на відстані  $z_2$ ;

$$\begin{aligned}
A_1 &= Hf_b K_b \sin \theta - H\chi \sin \bar{\varphi} + 2hK_s f_s \sin \varphi + Hf_s K_s \sin \varphi (1 + \chi/f_s) / \sqrt{1 + \chi^2}, \\
B_1 &= Hf_b K_b \cos \theta + H\chi \cos \bar{\varphi} \frac{\bar{D}}{D} - 2hK_s f_s \sin \varphi \cdot \operatorname{ctg} \bar{\varphi} \frac{\bar{D}}{D} - Hf_s K_s \left(1 + \frac{\chi}{f_s}\right) \frac{D_s \operatorname{ctg} \varphi_s}{D \sqrt{1 + \chi^2}}, \\
B_2 &= \frac{Hh\bar{D} \cos \bar{\varphi}}{D}, \quad K = \frac{\bar{D} \sin \bar{\varphi} + f_s \cos \bar{\varphi}}{D \cos \bar{\varphi} - f_s \sin \bar{\varphi}}, \quad \bar{\varphi} = \operatorname{arctg} \left( \frac{b}{\pi \bar{D}} \right), \quad \varphi_s = \operatorname{arctg} \left( \frac{b}{\pi D_s} \right).
\end{aligned}$$

Рівняння (6.41) розв'яжемо числовим методом. Для спрощення моделі замінимо конічну серцевину ступеневою циліндричною, тобто підставимо в рівняннях  $\chi = 0$ . Припускаючи, що конгломерати частинок перероблених відходів є ізотропним середовищем, тобто  $K_s = K_b = 1$ , отримаємо такий вираз:

$$P_{i+1} = P_i \cdot \exp[(B_1 - A_1 K) / (A_2 K + B_2) \cdot \Delta z]. \quad (6.42)$$

де

$$\begin{aligned}
A_1 &= Hf_b \sin \theta + 2hf_s \sin \varphi + Hf_s \sin \varphi; \\
B_1 &= Hf_b \cos \theta - 2hf_s \sin \varphi \cdot \operatorname{ctg} \bar{\varphi} \cdot \bar{D} / D - Hf_s \cdot \operatorname{ctg} \varphi_s D_s / D; \\
B_2 &= Hh\bar{D} \cos \bar{\varphi} / D; \quad K = \bar{D} / D \cdot (\sin \bar{\varphi} + f_s \cos \bar{\varphi}) / (\cos \bar{\varphi} - f_s \sin \bar{\varphi}).
\end{aligned}$$

В результаті проведених в роботі теоретичних досліджень, для яких використовувалися дані з робіт [263, 266], встановлено, що вплив співвідношення коефіцієнтів тертя між полімером і циліндром та між полімером і шнеком на об'ємну швидкість переміщення матеріалу є суттєвим (рис. 6.11, 6.12). Отриманні результати добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень, що наведені в [266].

Так, для руху полімерних частинок при великому куті підйому гвинтового каналу вимагається більш сприятливе співвідношення коефіцієнтів тертя, ніж для малих кутів (рис. 6.11). Наприклад, якщо кут підйому близький до  $90^\circ$ , то стійкій процес транспортування частинок перероблених відходів у впускний канал прес-форми можна забезпечити тільки з таким шнеком, щоб коефіцієнт тертя між ним і полімерним матеріалом був близьким до нуля. Зрозуміло, що такі умови не реальні. З другого боку, по мірі зменшення кута підйому гвинтового каналу стають прийнятними більші значення співвідношення коефіцієнтів тертя (рис. 6.12).

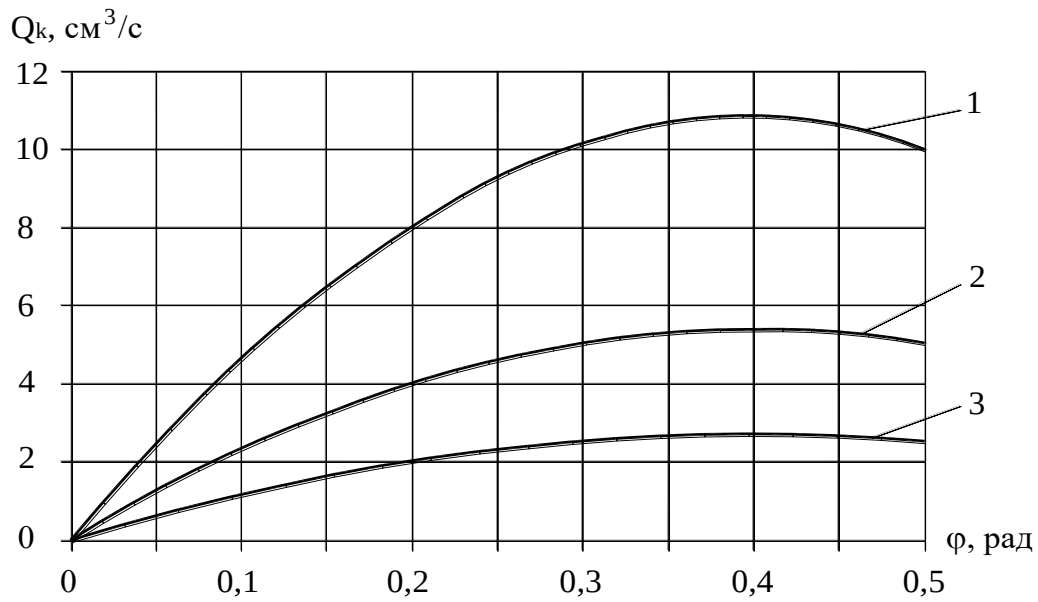


**Рис. 6.11. Графіки залежності об'ємної швидкості переміщення частинок від кута підйому гвинтового каналу: 1 –  $n = 100 \text{ хв}^{-1}$ ; 2 –  $n = 50 \text{ хв}^{-1}$ ; 3 –  $n = 25 \text{ хв}^{-1}$**

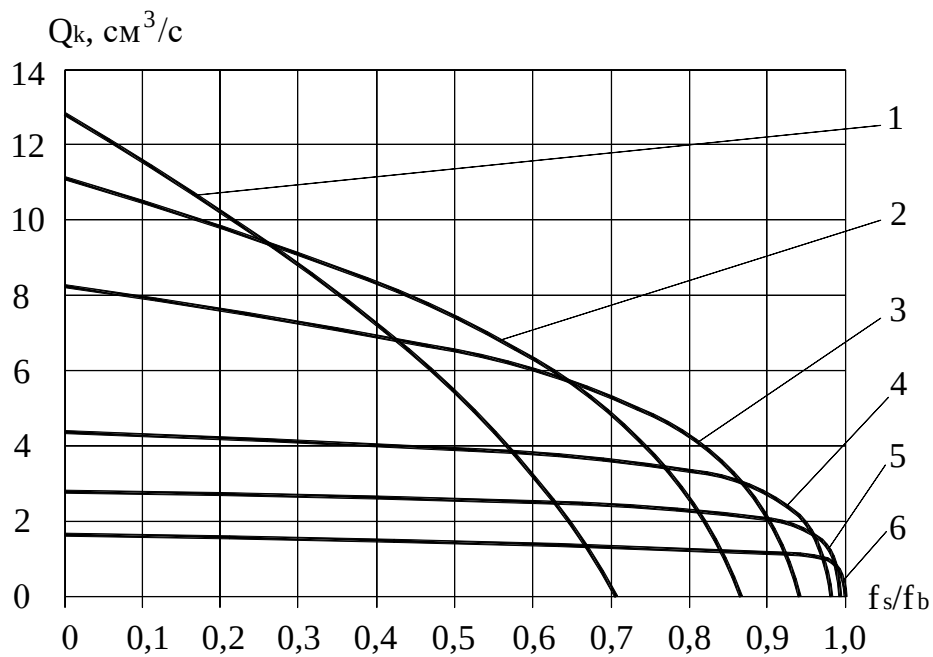


**Рис. 6.12. Графіки залежності об'ємної швидкості переміщення частинок від співвідношення коефіцієнтів тертя: 1 – кут підйому гвинтового каналу  $\phi = 45^\circ$ ; 2 –  $\phi = 30^\circ$ ; 3 –  $\phi = 20^\circ$ ; 4 –  $\phi = 10^\circ$ ; 5 –  $\phi = 6^\circ$ ; 6 –  $\phi = 3^\circ$**

Наприклад, шнек з кутом підйому гвинтового каналу  $\varphi = 10^\circ$  при співвідношенні коефіцієнтів тертя  $f_s/f_b = 0,2$  буде забезпечувати вдвічі меншу об'ємну швидкість, ніж шнек з кутом нарізки  $\varphi = 60^\circ$ , а при співвідношенні коефіцієнтів тертя  $f_s/f_b = 0,65$  буде забезпечувати навпаки вдвічі більшу.

Проведений аналіз показав, що при малих кутах підйому гвинтового каналу створюються кращі умови для транспортування перероблених частинок полімерного матеріалу і цей кут має лежати в діапазоні між  $19^\circ$  (0,33 рад) та  $24^\circ$  (0,42 рад). Отримані результати добре узгоджуються з [263, 266].

Отже, розроблені вище аналітичні залежності можна використовувати для визначення раціональних конструктивних параметрів пристрою для транспортування полімерних частинок та ефективних режимів подачі їх у впускний канал прес-форми, при яких забезпечується необхідний розподіл частинок в об'ємі підосви. Наприклад, змінити об'ємну швидкість подачі частинок полімеру у впускний канал прес-форми можна змінюючи: шорсткість поверхонь шнеку та внутрішніх стінок матеріального циліндру (застосування антифрикційного покриття, використання каталітичної конверсії поверхонь – J-Tech або Dyna-blue); площу тертя (добавити певні елементи або нарізати канавки); температуру матеріального циліндру та радіус торця по зовнішньому діаметру гребеня.

## **6.5. Експериментальні дослідження впливу концентрації, орієнтації та довжини частинок наповнювача на експлуатаційні властивості підосов**

### **6.5.1. Планування експериментальних досліджень**

На основі проведеного аналізу апріорної інформації було визначено контрольовані параметри, що характеризують експлуатаційні властивості полімерних зразків, – це міцність на розрив  $\sigma_p$  та кількість циклів багаторазового згину  $N$ , що руйнують зразок.

За основні фактори були вибрані такі: концентрація перероблених полімерних відходів  $C$  у полімерному зразкові, який варіювали в межах від 0%

до 15%, та кут орієнтації частинок перероблених полімерних відходів у полімерному зразку  $\alpha_c$ , який варіювали в межах від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

Полімерні зразки виготовлялися з полімерного матеріалу ПВХ, пластикату ОПЛП-2, в який додавалися перероблені поліпропіленові відходи [267].

Для матеріалу, з якого виготовлялися дослідні зразки, визначені найбільш раціональні технологічні параметри лиття під тиском: витрати матеріалу на вході в порожнину  $V_0 = 0,0009 \text{ м}^3/\text{с}$ ; температура вприскування розплаву –  $T_0 = 140^\circ\text{C}$ ; температура стінок прес-форми  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ .

Заготовки з полівінілхлориду на зразки для випробування отримували литтям під тиском на термопластавтоматі моделі Б2С/14Е. Для одержання заготовок для зразків однакової товщини їх обробляли на обладнанні ДН-2-0. Товщина зразків, відповідно до вимог стандартів випробування [268, 269], має бути однаковою по всій площині зразків.

Після вирівнювання заготовок по товщині за допомогою спеціально виготовлених різаків на пресі ПВГ-8-0 із заготовок вирубали зразки, які мали розміри та форму, відповідні до вимог стандартів випробування [268, 269].

Концентрація частинок перероблених полімерів варіювалася в процесі заповнення прес-форми, а орієнтація частинок варіювалася при вирубці зразків із відлітої заготовки шляхом зміни кута вирубки.

Випробування на міцність проводилися на пристрої РТ-250 М відповідно до [268], схема пристрою наведена на рис. 6.13.

Витривалість полімерних зразків при багаторазовому згинанні визначали згідно з [269] на експериментальному пристрої типу Торренса. Схему випробування полімерних зразків на витривалість наведено на рис. 6.14.

Дослідження багатофакторного процесу (факторів  $\geq 2$ ) вимагає проведення великої кількості дослідів. Тому доводиться вирішувати задачу планування експерименту, що полягає у встановленні мінімально необхідного числа дослідів. Планування експериментів значно знижує число дослідів, необхідних для одержання моделі розглянутого процесу [220].

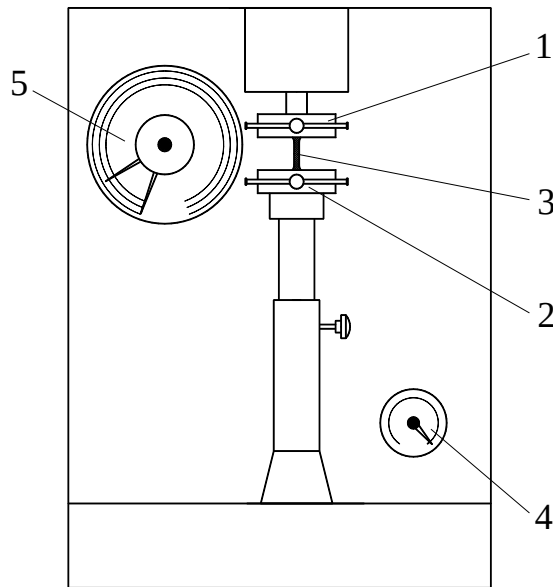


**Рис. 6.13. Схема пристрою для випробування зразків на міцність:**  
**1 – нерухомий захват; 2 – рухомий захват; 3 – полімерний зразок;**  
**4 – шкала для встановлення швидкості захвату; 5 – шкала навантажень**

Для проведення експериментальних досліджень впливу концентрації частинок перероблених полімерних відходів  $C$  у дослідному зразку та їх орієнтації  $\alpha_c$  відносно напрямку дії навантажень розтягу та згину на експлуатаційні властивості зразка будемо планувати експериментальні випробування, варіюючи фактори на трьох рівнях, а для цього найбільш ефективним є ротатабельний план другого порядку (план Бокса).

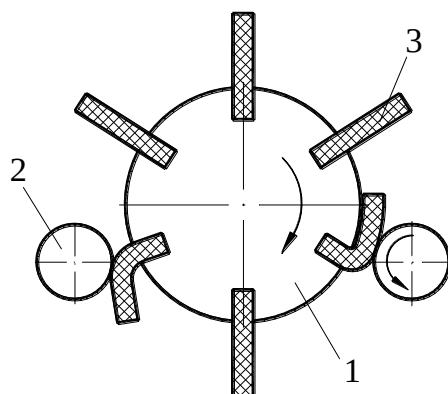


**Рис. 6.14. Схема випробування зразків на витривалість:**  
**1 – диск; 2 – притисні ролики; 3 – полімерні зразки**

Для отримання точної моделі контрольованих параметрів використано алгебраїчний поліном другого порядку [220]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2, \quad (6.43)$$

де  $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{11}, b_{22}$  – коефіцієнти регресії;  $x_1, x_2$  – змінні фактори, відповідно, концентрація включень  $C$  та кут їх орієнтації відносно напрямку дії навантажень  $\alpha_c$ .

Для зручності обробки експериментальних даних рівні факторів, що варіюються, кодувались. Прийняті такі фактори, що варіюються: концентрація включень  $X_1$  та кут орієнтації включень  $X_2$ .

При кодуванні значень  $X_1, X_2$  верхній рівень позначають як +1, нижній як -1, а нульовий як 0. Кодування фактора  $X_i$  визначається виразом [221]:

$$x_i = (X_i - X_{0i}) / \varepsilon_i, \quad (6.44)$$

де  $i$  – номер фактора;  $X_i$  – натуральне значення  $i$ -го фактора;  $X_{0i}$  – натуральне значення нульового рівня  $i$ -го фактора;  $\varepsilon_i$  – інтервал зміни  $i$ -го фактора.

Експериментальні дослідження міцності на розрив втомної витривалості полімерного зразка при різних значеннях концентрації та орієнтації включень у зразку проводилися на рівнях варіювання та з інтервалами, які наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Рівні та інтервали зміни факторів

| Позначення | Фактори                       | Рівні варіювання |      |      |      |         | Інтервал варіювання |
|------------|-------------------------------|------------------|------|------|------|---------|---------------------|
|            |                               | - 1,414          | - 1  | 0    | + 1  | + 1,414 |                     |
| X1         | Концентрація включень         | 0,01             | 0,03 | 0,08 | 0,13 | 0,15    | 0,05                |
| X2         | Кут орієнтації включень, град | 0                | 15   | 45   | 75   | 90      | 30                  |

Визначення необхідного числа вимірів, що нейтралізує можливі випадкові помилки при відомій надійній ймовірності, здійснювалося відповідно до [220]. Прийнято, що загальна величина помилки вимірів не повинна перевищувати 5%.

У результаті було встановлено, що в кожному досліді необхідно проводити чотири паралельних виміри.

### 6.5.2. Експериментальні випробування та обробка отриманих результатів

Матрицю плану для композиційного ротатбельного планування другого порядку наведено в табл. С.1 (додаток С).

Після реалізації робочої матриці (додаток С, табл. С.1), при чотирьох паралельних дослідях, ми отримали значення міцності полімерного зразка на розрив та кількості циклів багаторазового згину, що передують руйнуванню (додаток С, табл. С. 2-С. 3).

Для аналізу результатів досліджень визначалася дисперсія помилки кожного досліду [220]:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / [n_n - 1], \quad (6.45)$$

де  $n_n$  – кількість спостережень (кількість повторень досліду);  $y_i$  – значення параметра оптимізації для окремого спостереження;  $\bar{y}$  – середнє значення параметра.

Отримані значення дисперсій наведені у табл. С. 2-С.3 (додаток С).

Аналіз результатів дослідів показав, що у четвертому досліді при випробуванні зразків на міцність дисперсія помітно вища, ніж в інших дослідях ( $s_8^2 = 0,86$ ). У зв'язку з цим виникла необхідність перевірки однорідності дисперсій. Перевірка проводилася з урахуванням критерію Кохрена:

$$G_{расч} = s_{\max}^2 / \sum_{i=1}^N s_i^2, \quad (6.46)$$

де  $N$  – число дослідів.

Підставляючи значення дисперсій у формулу (6.46), отримали:



$$G_{расч} = s_{\max}^2 / \sum_{i=1}^N s_i^2 = 0,86/5,87 = 0,15.$$

Розрахункове значення критерію менше за табличне ( $0,15 < 0,32$ ), тому з 95%-ою надійною ймовірністю можна стверджувати, що всі дисперсії помилок однорідні [220].

Аналогічно міркуємо відносно результатів вимірювання кількості згинань, що руйнують полімерний зразок.

Перевірка однорідності дисперсій при випробуванні полімерного зразка:

$$G_{расч} = s_{\max}^2 / \sum_{i=1}^N s_i^2 = 0,11/0,69 = 0,16$$

встановила, що  $0,16 < 0,32$ , тому з 95%-ою надійною ймовірністю можна стверджувати, що всі дисперсії помилок однорідні [220].

Коефіцієнти рівняння регресії (6.43) отримано за допомогою матричного методу [220]. Розраховані значення коефіцієнтів регресії наведено у табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Значення коефіцієнтів рівняння регресії

| Коефіцієнт \ Матеріал | Міцність на розрив | Кількість згинів |
|-----------------------|--------------------|------------------|
| $b_0$                 | 52,05              | 9,38             |
| $b_1$                 | 0,37               | 0,07             |
| $b_2$                 | -4,58              | -0,83            |
| $b_{12}$              | -0,33              | -0,06            |
| $b_{11}$              | -1,93              | -0,35            |
| $b_{22}$              | -2,34              | -0,44            |

Підставляючи значення коефіцієнтів у (6.43), отримаємо рівняння регресії:

– для випробувань на міцність:

$$y_m(x_1, x_2) = 52,05 + 0,37 \cdot x_1 - 4,58 \cdot x_2 - 0,33 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,93 \cdot x_1^2 - 2,43 \cdot x_2^2. \quad (6.47)$$

– для випробувань на багаторазове згинання:

$$y_b(x_1, x_2) = 9,38 + 0,07 \cdot x_1 - 0,83 \cdot x_2 - 0,06 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,35 \cdot x_1^2 - 0,44 \cdot x_2^2. \quad (6.48)$$

Проведемо перевірку значущості коефіцієнтів рівняння регресії. Наявність інформації про значущість коефіцієнтів дозволяє спростити рівняння.

З метою оцінки значущості коефіцієнтів регресії визначено довірчі інтервали [220]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 0,894 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; & \Delta b_i &= \pm 0,707 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; \\ \Delta b_{ii} &= \pm 0,759 \cdot s_{\{\bar{y}\}}; & \Delta b_{ij} &= \pm s_{\{\bar{y}\}}, \end{aligned} \right\} \quad (6.49)$$

де  $s_{\{\bar{y}\}}^2$  – помилка середнього значення паралельних вимірів, яка визначалася згідно з [220].

При випробуванні полімерних зразків на міцність помилка середнього значення паралельних вимірів знаходилася таким чином:

$$s_{\{\bar{y}\}}^2 = s_{\{y\}}^2 / n_n = \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{n_n} (y_{u,i} - \bar{y}_u)^2 / \left[ n_n \cdot \sum_{i=1}^N (n-1) \right] = 0,254/4 = 0,064.$$

При випробуванні полімерних зразків на втомну витривалість помилка середнього значення паралельних вимірів знаходилася таким чином:

$$s_{\{\bar{y}\}}^2 = s_{\{y\}}^2 / n_n = \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{n_n} (y_{u,i} - \bar{y}_u)^2 / \left[ n_n \cdot \sum_{i=1}^N (n-1) \right] = 0,004/4 = 0,001,$$

де  $s_{\{y\}}^2$  – дисперсія відтворення;  $y_{u,i}$  – поточне значення паралельного вимірювання на  $u$ -му рівні варіювання ступеня витягування та температури;  $\bar{y}_u$  – середнє значення міцності полімерного зразка на  $u$ -му рівні варіювання;  $n_n$  – кількість паралельних вимірювань кожного дослідження;  $n$  – кількість досліджень (або кількість рівнів варіювання).

Після підстановки помилки середнього значення паралельних вимірів у рівняння (6.49) було отримано довірчі інтервали коефіцієнтів регресії.

При випробуванні на міцність довірчі інтервали коефіцієнтів регресії дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 0,225; & \Delta b_1 &= \Delta b_2 = \pm 0,178; \\ \Delta b_{12} &= \pm 0,178; & \Delta b_{11} &= \Delta b_{22} = \pm 0,191. \end{aligned} \right\}$$

При випробуванні на втомну витривалість довірчі інтервали коефіцієнтів регресії дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 0,03; & \Delta b_1 &= \Delta b_2 = \pm 0,021; \\ \Delta b_{12} &= \pm 0,03; & \Delta b_{11} &= \Delta b_{22} = \pm 0,023. \end{aligned} \right\}$$

Порівняння абсолютної величини коефіцієнтів і відповідних довірчих інтервалів показало, що всі коефіцієнти статично значимі і тому рівняння регресії (6.47), (6.48) не спрощуються.

Адекватність отриманого рівняння регресії реальним процесам перевірялася за допомогою критерію Фішера:

$$\Phi = s_{ad}^2 / s_{\{y\}}^2, \quad (6.50)$$

де  $s_{ad}^2$  – залишкова дисперсія (або дисперсія адекватності).

Згідно з [220], залишкова дисперсія визначається з рівняння:

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n n \cdot (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{n - k - (n_0 - 1)}, \quad (6.51)$$

де  $\hat{y}_u$  – розрахункове значення параметра оптимізації;  $k = 6$  – число коефіцієнтів рівняння;  $n_0 = 5$  – число повторень нульового дослідження.

Підставивши значення (додаток С, табл. С. 2-С. 3) в рівняння (6.51), отримаємо дисперсію адекватності для результатів випробування полімерного зразка на міцність:

$$s_{ad}^2 = \frac{5,21}{13 - 6 - (5 - 1)} = 1,74.$$

Далі визначалося розрахункове значення критерію Фішера:

$$\Phi_{розр} = \frac{1,74}{0,25} = 6,96.$$

Підставивши значення (додаток С, табл. С. 2-С. 3) в рівняння (6.51), отримаємо дисперсію адекватності для результатів випробування полімерного зразка на витривалість:

$$s_{ad}^2 = \frac{0,082}{13 - 6 - (5 - 1)} = 0,027$$

та значення критерію Фішера:

$$\Phi_{розр} = \frac{0,027}{0,004} = 6,75.$$

Порівнюючи знайдений критерій Фішера з табличним ( $6,96 < 9,10$  – при випробуванні полімерних зразків на міцність;  $6,75 < 9,10$  – при випробуванні полімерних зразків на втомну витривалість), при вибраній надійній ймовірності, можна стверджувати, що рівняння регресії (6.47), (6.48) є адекватними з 95%-ою надійною ймовірністю [221].

Для одержання натуральних рівнянь підставимо значення кодованого фактора  $X$ , згідно з виразом (6.44), у рівняння (6.47), (6.48) і одержимо функції залежності міцності та витривалості полімерних зразків від концентрації частинок перероблених відходів  $C$  та орієнтації їх щодо напрямку дії навантажень  $\alpha_c$ .

Функція залежності міцності зразків:

$$\begin{aligned} \sigma_p = & 52,05 + 0,37 \cdot \frac{C - 0,08}{0,05} - 4,58 \cdot \frac{\alpha - 45}{30} - 0,33 \cdot \frac{C - 0,08}{0,05} \cdot \frac{\alpha - 45}{30} - \\ & - 1,93 \cdot \left( \frac{C - 0,08}{0,05} \right)^2 - 2,43 \cdot \left( \frac{\alpha - 45}{30} \right)^2. \end{aligned} \quad (6.52)$$

Функція залежності витривалості зразків:

$$\begin{aligned} N = & 9,38 + 0,07 \cdot \frac{C - 0,08}{0,05} - 0,83 \cdot \frac{\alpha - 45}{30} - 0,06 \cdot \frac{C - 0,08}{0,05} \cdot \frac{\alpha - 45}{30} - \\ & - 0,35 \cdot \left( \frac{C - 0,08}{0,05} \right)^2 - 0,44 \cdot \left( \frac{\alpha - 45}{30} \right)^2. \end{aligned} \quad (6.53)$$

Отримані рівняння дозволяють визначати експлуатаційні властивості полімерного матеріалу від концентрації та орієнтації частинок перероблених полімерних відходів, що використовуються як наповнювач для армування полімерних виробів. Ці залежності можна використовувати при розрахунках технологічних та конструктивних параметрів оснастки для лиття під тиском полімерних виробів легкої промисловості.

### 6.5.3. Аналіз результатів експериментальних випробувань

За отриманими рівняннями побудовано графіки залежностей експлуатаційних властивостей полімерного зразка від концентрації та орієнтації частинок наповнювача в ньому (рис. 6.15-6.18).

Як видно з рис. 6.15, міцність на розрив полімерних зразків із включенням частинок перероблених відходів спочатку збільшується зі збільшенням концентрації їх у зразку, але потім, після досягнення 13 % концентрації, починає зменшуватися, що зумовлено нехваткою матеріалу матриці для зв'язування цих частинок.

Згідно з рис. 6.16, на міцність суттєвий вплив також має орієнтація частинок наповнювача відносно напрямку дії навантажень. Так, максимальна міцність на розрив відповідає орієнтації вздовж дії навантажень,  $\alpha_c = 0$ , а мінімальна – поперек дії навантажень,  $\alpha_c = 90$ .

Як видно з рис. 6.17, кількість циклів згинань, що передують руйнуванню полімерного зразка, також спочатку зростає зі збільшенням концентрації частинок перероблених відходів до значення 10 %, після досягнення якого витривалість полімерного зразка починає зменшуватися, що зумовлено нехваткою матеріалу матриці для зв'язування цих частинок.

З рис. 6.18 видно, що орієнтація частинок у полімерному зразкові відносно напрямку дії навантажень відчутно впливає на втомну витривалість зразка.

Максимальна кількість циклів згинань, що руйнують зразок, відповідає орієнтації вздовж дії навантажень, мінімальна кількість циклів згинання – поперек дії навантажень.

Отже, концентрація та орієнтація частинок перероблених полімерних відходів в готовому виробі суттєво впливає на його експлуатаційні характеристики. Тому при отриманні литтям під тиском полімерних виробів легкої промисловості з підвищеними фізико-механічними властивостями варто додавати включення та орієнтувати їх у напрямку дії навантажень під час експлуатації виробу.

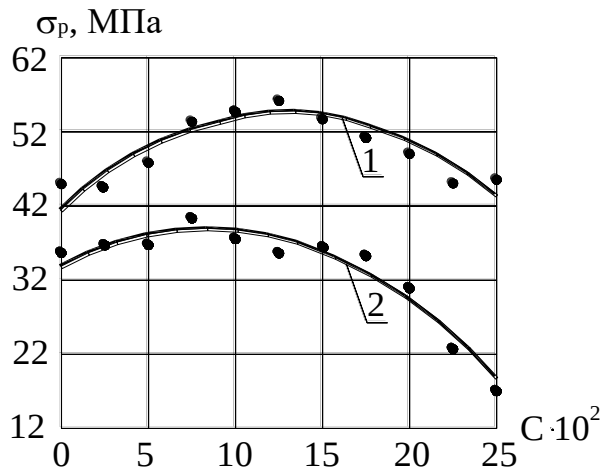


**Рис. 6.15. Залежність міцності на розрив від концентрації включень:**  
1 –  $\alpha_c = 0$ ; 2 –  $\alpha_c = 90$

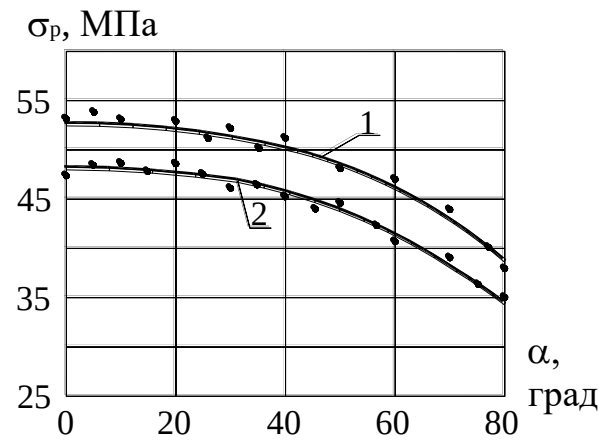


**Рис. 6.16. Залежність міцності на розрив від орієнтації включень:**  
1 –  $C = 0,05$ ; 2 –  $C = 0,015$

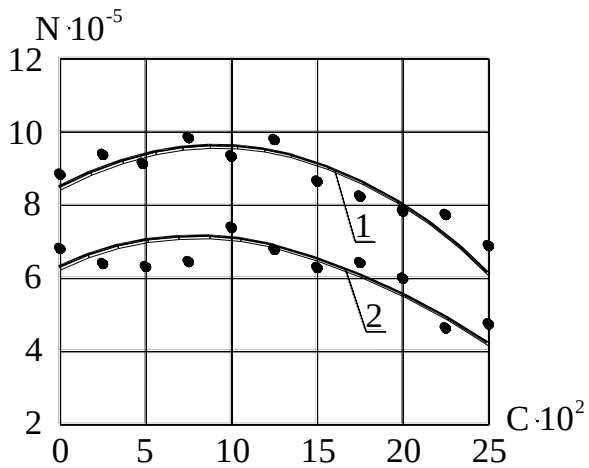


**Рис. 6.17. Залежність витривалості від концентрації включень:**  
1 –  $\alpha_c = 0$ ; 2 –  $\alpha_c = 90$

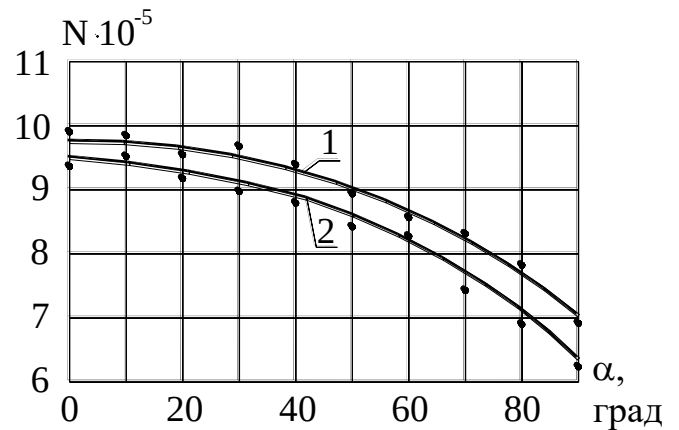


**Рис. 6.18. Залежність втомної витривалості від орієнтації включень:**  
1 –  $C = 0,05$ ; 2 –  $C = 0,015$

Крім того, необхідно зауважити, що в полімерні вироби додаються частинки перероблених полімерних відходів, що дозволяє економити на їх утилізації. Тобто, використання перероблених полімерних відходів на спроектованому і виготовленому в рамках дисертаційного дослідження обладнанні, при литті полімерних виробів легкої промисловості, наприклад, низу взуття, дає можливість зменшити забруднення навколишнього середовища, витрати на утилізацію, витрати первинного полімерного матеріалу та збільшити якість виробів.

Варто зазначити, що просторове розташування частинок переробленого полімерного матеріалу у виробках легкої промисловості зазвичай відрізняється від прямолінійного і відхиляється від напрямку дії механічних навантажень в готовому виробі. Це призводить до появи трансверсальних і зсувних напружень в напрямках, що призводять до можливого порушення адгезійного контакту між частинками і матрицею (основним матеріалом виробу). Важливо, щоб ці напруження не перевищували рівень адгезійного контакту (при зсуві або відриві), що може ініціювати локальне руйнування і привести до зниження механічних властивостей виробів.

Для забезпечення концентрації 10 % частинок перероблених відходів у подошві чоловічих черевиків та рівномірного їх розподілу по подошві при об'ємній швидкості заповнення прес-форми розплавом полімеру  $250 \text{ см}^3/\text{с}$  необхідно подавати частинки у впускний канал прес-форми зі швидкістю близько  $25 \text{ см}^3/\text{с}$ , яка забезпечується такими параметрами шнекового конвеєру: діаметр шнека  $D = 0,05 \text{ м}$ ; частота його обертання  $n = 80 \text{ хв}^{-1}$ ; глибина гвинтового каналу  $h = 0,006 \text{ м}$ ; кут гвинтового каналу  $\varphi = 45^\circ$ ; співвідношення коефіцієнта тертя між полімерними частинками і стінками гвинтового каналу шнека та коефіцієнта тертя між полімерними частинками і внутрішньою стінкою матеріального циліндра  $f_s / f_b = 0,6$ .

#### **6.5.4. Експериментальне дослідження впливу довжини частинок перероблених відходів на експлуатаційні властивості підошов**

Особливістю полімерних виробів, виготовлених із додаванням частинок перероблених полімерних відходів є яскраво виражена анізотропія їх механічних властивостей, що визначається орієнтацією частинок в матриці в одному або декількох напрямках. Вибір орієнтації, концентрації та розмірів цих частинок зумовлюється розподілом напружень в процесі експлуатації полімерних виробів легкої промисловості. Це дає можливість оптимізувати структуру матеріалу за ваговими характеристиками, що дозволяє отримувати полімерні вироби з мінімізованою матеріаломісткістю.

Загальною і важливою майже для всіх видів наповнених полімерних виробів характеристикою є довжина частинок перероблених полімерних відходів, що зумовлена конструктивними і технологічними параметрами перероблювального обладнання.

Основним коректним методом оцінки фізико-механічних властивостей наповнених полімерів може служити визначення міцності при розтягу. Цей метод отримав сьогодні широке поширення і у нас, і за кордоном. В процесі розтягу наповнених полімерних виробів частинки сприймають розтягувальне навантаження, а основний полімер (матриця) – зсувне. Отже, полімер, що оточує частинки, повинен витримувати величину зсувного навантаження, рівну розтягувальному навантаженню частинки.

Міцність полімеру значно нижче міцності частинки з орієнтованою структурою. Для забезпечення високої міцності наповнених полімерних виробів згідно до [270] співвідношення довжини частинки до її поперечного розміру  $l/d$  повинно бути не меншим 10.

З метою визначення впливу розмірів частинок перероблених відходів з полівінілхлориду на фізико-механічні властивості підошов для взуття, виготовленої із полівінілхлориду, проводилися експериментальні дослідження залежностей між напруженнями розтягу і деформаціями підошви для взуття при



різних значеннях розмірів частинок. Дослідження проводилися для підошов із полівінілхлориду із включенням коротких ( $l/d = 4...6$ ) і довгих ( $l/d = 8...10$ ) частинок переробленого полівінілхлориду. Поперечний розмір частинок дорівнював близько 1 мм.

На рис. 6.19 наведений графік залежності напруження розтягу від деформації полімерних зразків, вирізаних з наповненої підошви вздовж і поперек орієнтації частинок з полівінілхлориду довгої фракції.

Як видно з рис. 6.19 вплив довжини частинок на властивості підошви суттєвий. Таким чином, підвищення експлуатаційних властивостей полімерних виробів легкої промисловості можна забезпечити шляхом наповнення їх довгими частинками, які необхідно орієнтувати вздовж напрямку дії навантажень в процесі експлуатації цих виробів. Для забезпечення більшої піддатливості полімерного виробу без його розриву слід орієнтувати довгі частинки поперек

На рис. 6.20 наведений графік залежності напруження розтягу від деформації полімерних зразків, вирізаних з наповненої підошви вздовж і поперек орієнтації частинок з полівінілхлориду короткої фракції.

З рис. 6.20 видно, що, чим коротші частинки наповнювача, тим менше його ефективність. При коротких частинках матриця ні за яких обставин не може передати частинкам напруження, достатнє для їх руйнування. Таким чином армувальна здатність коротких частинок (збільшення експлуатаційних властивостей полімерного виробу) досить низька. Особливо якщо врахувати орієнтацію частинок, яка при литті або екструзії полімерних виробів не буває ідеальною. Структура полімерних виробів із наповненням частинками короткої фракції хаотична. Перевагою використання як наповнювачів частинок короткої фракції є можливість більш швидкої переробки полімеру у вироби.

В додатку Т наведені протоколи випробувань полімерних зразків з полівінілхлориду.

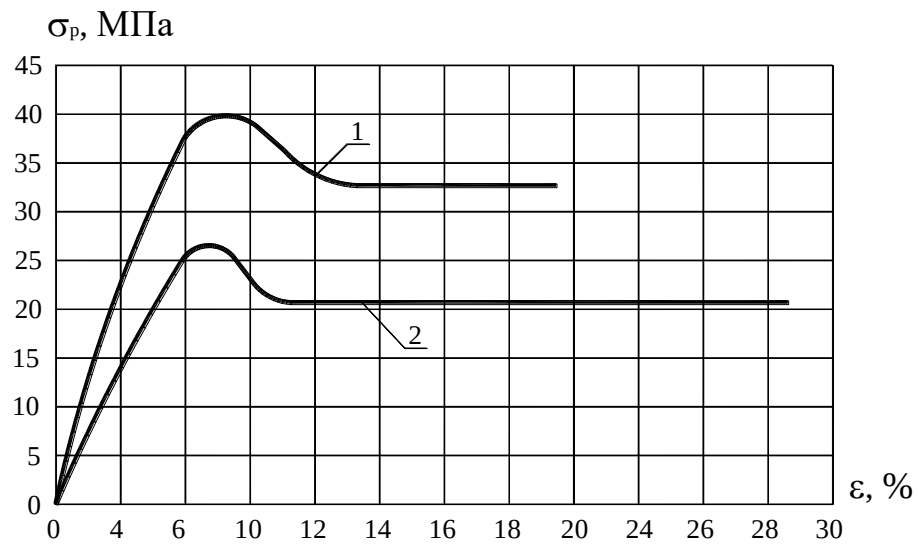


**Рис. 6.19.** Діаграма розриву полімерних зразків, наповнених довгими частинками полівінілхлориду: 1 – вздовж орієнтації частинок; 2 – поперек орієнтації частинок

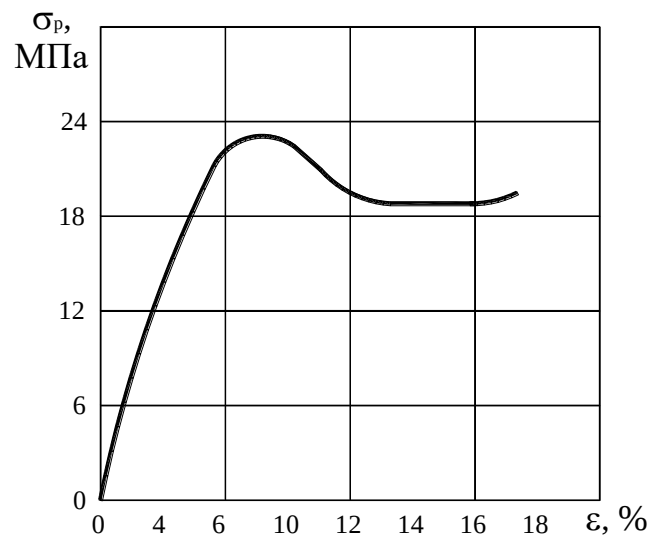


**Рис. 6.20.** Діаграма розриву полімерних зразків, наповнених короткими частинками полівінілхлориду

В додатку У наведені акти впровадження та розрахунок економічного ефекту від впровадження результатів дисертаційної роботи на Хмельницькому взуттєвому підприємстві ПП “Кредо” з очікуваним економічним ефектом 136800 грн; на Хмельницькій взуттєвій фабриці ТОВ “Взутекс” з очікуваним економічним ефектом 128887 грн та на Київському підприємстві ТОВ “Таланлеглопром” з очікуваним економічним ефектом 203840 грн.

### **Висновки до розділу 6**

1. Вперше розроблено математичну модель руху суміші полімерного матеріалу з частинками перероблених полімерних відходів у процесі заповнення порожнини прес-форми, яка, на відміну від наявних, дозволяє спостерігати за формуванням структури полімерного виробу із включеннями, що дає можливість конструювати і проектувати литтєву оснастку для отримання виробів легкої промисловості з підвищеними експлуатаційними властивостями.

2. Спроековано і виготовлено прес-форму для експериментальних досліджень впливу її конструктивних параметрів та технологічних режимів лиття під тиском на формування структури підошви із включенням частинок полімерних відходів; проведено спостереження за процесом заповнення прес-форми та формування структури підошви із суміші полівінілхлориду та частинок перероблених відходів з полівінілхлориду.

3. Розроблені аналітичні залежності, що пов’язують параметри пристрою для транспортування частинок перероблених полімерних відходів у впускний канал прес-форми з об’ємною швидкістю подачі цих частинок, можна використовувати для визначення раціональних конструктивних параметрів пристрою та ефективних режимів транспортування, при яких забезпечуються необхідні концентрація та розподіл частинок в об’ємі підошви.

4. Проведені експериментальні випробування підошов, отриманих литтям під тиском із суміші ПВХ і частинок переробленого полівінілхлориду, на розривну міцність та втомну витривалість показали, що концентрація та орієнтація частинок перероблених полімерних відходів у готовому виробі

суттєво впливає на його експлуатаційні характеристики.

5. Встановлено, що при 10%-ій концентрації частинок перероблених відходів з полівінілхлориду в процесі лиття під тиском підошов їхня міцність і витривалість вздовж орієнтації частинок збільшується, відповідно, на 28 % та 14 %, а поперек орієнтації – на 9 % та 12 %. При збільшенні концентрації перероблених відходів більше, ніж на 15 % міцність та витривалість підошви знижується.

6. Для забезпечення концентрації 10 % частинок перероблених відходів у підошві чоловічих черевиків та рівномірного їх розподілу по підошві при об'ємній швидкості заповнення прес-форми розплавом полімеру  $250 \text{ см}^3/\text{с}$  необхідно подавати частинки у впускний канал прес-форми зі швидкістю близько  $25 \text{ см}^3/\text{с}$ , яка забезпечується такими параметрами шнекового конвеєру: діаметр шнека  $D = 0,05 \text{ м}$ ; частота обертання  $n = 80 \text{ хв}^{-1}$ ; глибина гвинтового каналу  $h = 0,006 \text{ м}$ ; кут гвинтового каналу  $\varphi = 45^\circ$ ; співвідношення коефіцієнта тертя між полімерними частинками і стінками гвинтового каналу шнека до коефіцієнта тертя між полімерними частинками і внутрішньою стінкою матеріального циліндра становить  $f_s / f_b = 0,6$ .

## ВИСНОВКИ

1. Отримали розвиток наукові підходи до проектування перероблювального обладнання, на основі яких вперше запропоновано технологічне обладнання системи «Переробка-Виготовлення» для руйнування полімерних відходів, яке послідовно створює в них певний напружено-деформований стан, в результаті чого утворюються полімерні частинки з орієнтованою структурою, використання яких при виробництві виробів легкої промисловості дозволяє покращити їх експлуатаційні властивості.

2. Отримала розвиток структурна модель полімерного матеріалу, яка описує закономірності формування фізико-механічних характеристик під впливом механічного і температурного полів, що створюються технологічним обладнанням для переробки полімерних відходів. Результати експериментальних досліджень, що проводилися для поліетиленових та поліпропіленових зразків, і результати аналітичних досліджень задовільно узгоджуються (відносне відхилення не перевищує 16 %), що дозволяє говорити про коректність розробленої структурної моделі.

3. Вперше розроблено математичну модель напружено-деформованого стану полімеру при дії на нього робочих органів перероблювального обладнання та температури, в результаті чого запропоновано метод визначення граничних значень деформацій, швидкостей деформацій та напружень, які має створити обладнання в полімерному матеріалі для орієнтації його структури та руйнування. За допомогою згаданого вище методу визначено граничні значення попередньої деформації і відповідного напруження для поліетилену, поліпропілену і полівінілхлориду, які повинні забезпечуватися пристроєм із зубчастими валками, а також визначено граничні значення швидкостей деформацій для згаданих матеріалів, які повинні забезпечуватися пристроєм із валками профілю Рело.

4. Вперше розроблено метод проектування обладнання для переробки полімерних відходів, який передбачає визначення раціональних конструктивних

параметрів та ефективних технологічних режимів роботи перероблювального обладнання, при яких забезпечуються такі значення граничних деформацій та відповідних напружень, при яких полімерні відходи перетворюються на частинки із орієнтованою структурою та анізотропними фізико-механічними властивостями. Метод проектування технологічного обладнання був переданий для впровадження на Київському взуттєвому підприємстві ТОВ «Таланлегпром».

5. Вперше визначено раціональні конструктивні параметри робочих органів технологічного обладнання для переробки полімерних відходів та ефективні режими його роботи, при яких створюються граничні деформації, необхідні для забезпечення руйнування полімеру на частинки з високо орієнтованою структурою. Так, для забезпечення граничної деформації попереднього розтягу на зубчастих валках для переробки відходів легкої промисловості товщиною від 1 мм до 4 мм визначено такі параметри: крок та висоту зубців, відповідно, 3 %...6 % та 4 %...7 % від діаметру валків; кут профілю зубців від  $60^0$  до  $80^0$ . Для забезпечення руйнівної деформації зсуву для відходів товщиною від 0,8 мм до 1,5 мм на валках профілю Рело ексцентриситет має становити 12 %...28 % від базового діаметру. Розроблене обладнання для переробки полімерних відходів було впроваджено у виробництво на взуттєвому підприємстві ПП «Кредо» (м. Хмельницький).

6. Розроблено та виготовлено експериментальну установку для визначення питомої потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні перероблених полімерних відходів. В результаті проведених експериментів вперше отримано залежності, що пов'язують питому потужність, яка витрачається на утворення одиниці вільної поверхні перероблених полімерних відходів з конструктивними параметрами перероблювального обладнання, а саме з кроком зубців, з кутом між осями обертання зубчастих валків та валків профілю Рело; та з технологічними параметрами – з частотою обертання валків і голкофрези. За допомогою отриманих залежностей визначено такі ефективні параметри перероблювального обладнання: частота обертання зубчастих валків  $n_Z = 148$  об/хв, валків профілю Рело  $n_R = 85$  об/хв, голкофрези  $n_G = 600$  об/хв; крок зубців  $t = 4,8$  мм; кут між осями обертання зубчастих валків і валків

профілю Рело  $\alpha = 0^0$ ; при яких значення потужності, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні, найменша. Діапазон ефективних значень температур нагрівання, при яких на руйнування полімерного матеріалу витрачається мінімум енергії, становить від 70 % до 85 % від температури плавлення матеріалу. Проведений аналіз отриманих результатів дозволив запропонувати спосіб зменшення витрат електроенергії, на який був отриманий патент України. Розроблені і виготовлені експериментальні установки впроваджено в навчальний процес кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету.

7. Вперше розроблено і виготовлено прес-форму, спроектовано пристрій для подачі частинок полімерних відходів у впускний канал прес-форми та визначено технологічні режими її заповнення полімерним матеріалом із додаванням частинок перероблених полімерних відходів, що забезпечує рівномірний розподіл частинок в об'ємі підошви та необхідну їх орієнтацію в тих місцях підошви, які найбільш навантажені в процесі її експлуатації, а саме: в пучковій та каблучній зонах. Модернізовані прес-форми впроваджено у виробництво на Хмельницькому взуттєвому підприємстві ТОВ «Взутекс». Розроблена конструкція прес-форм захищена патентом України на корисну модель.

8. Визначено вплив концентрації та орієнтації частинок перероблених полімерних відходів різної форми і розмірів на експлуатаційні властивості підошов для взуття при дії навантажень розтягу вздовж та поперек напрямку орієнтації частинок у підошві. В результаті встановлено, що зменшення кута орієнтації частинок  $\alpha_c$  відносно напрямку дії навантажень з  $90^0$  до  $0$  збільшує міцність підошви на розрив на 57 %, а кількість циклів згину, що передують руйнуванню від втоми, – на 38 %; збільшення концентрації переробленого поліетилену до 10 % збільшує міцність підошви в напрямку орієнтації частинок на 28 %, а поперек – на 9 %, кількість циклів згину підошви, що передують руйнуванню від втоми, в напрямку орієнтації – на 14 %, а поперек – на 12 %, тоді

як збільшення концентрації частинок більше ніж на 15 % призводить до зменшення міцності та витривалості подошви.

9. Для збільшення міцності на розрив необхідно орієнтувати довгі частинками вздовж напрямку дії навантажень, а для збільшення піддатливості полімерного виробу без його розриву слід орієнтувати довгі частинки поперек напрямку дії навантажень. Структура полімерних виробів із наповненням частинками короткої фракції хаотична, тому єдиною перевагою використання короткофракційних частинок є економія основного матеріалу та можливість більш швидкої переробки полімерної суміші у виріб.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фізико-хімічні перетворення в процесах рециклінгу вторинних конденсаційних полімерів та їх сумішей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.06 - технологія полімерних і композиційних матеріалів : захист 25.03.2014 / Б. М. Савченко ; наук. конс. В. О. Пахаренко ; КНУТД. - К. : КНУТД, 2014.
2. Розвиток наукових основ технологій рециклінгу полімерних відходів у матеріали і деталі взуття та інші вироби легкої промисловості : дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.18. – Технологія взуття, шкіряних виробів і хутра : захищена 19.04.2012 / І. А. Мандзюк; наук. конс. М.Є. Скиба ; КНУТД-Хмельницький : ХНУ, 2012.
3. Зайнуллин Х. Н. Обращение с отходами производства и потребления / Х. Н. Зайнуллин, Р. Ф. Абдрахманов, У. Г. Ибатуллин – Уфа: Диалог, 2005. – 202 с.
4. Арашкевич Д. А. Вторичная переработка отходов пластмасс и специальные роторные дробилки /. Д. А. Арашкевич // Пластические массы. – 2003. – № 5. – С. 234-247.
5. Белобородова Т.Г. Универсальная установка измельчения «мягких» полимерных отходов / Т. Г. Белобородова, А. К. Панов, К. С. Минскер // Пластические массы. – 2002. – №7. – С. 46-48.
6. Місяць В.П. Розвиток наукових основ проектування обладнання для подрібнення відходів термопластичних і гумових матеріалів легкої промисловості : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.10 - машини легкої промисловості / В.П. Місяць. – К. : КНУТД, 2008. – 403 с.
7. Мікульонок І.О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини: монографія / І.О. Мікульонок – К.: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. – 265 с.
8. Мікульонок І.О. Процеси та обладнання перероблення термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології / І.О. Мікульонок – К. : НТУУ «КПІ», 2009. – 388 с.

9. Поташников Ю.М. Утилизация отходов производства и потребления: учебн. пос. / Ю.М. Поташников – Тверь.: Издательство ТГТУ (Тверской государственный технический университет), 2004. – 107 с.

10. Шарагин Н.С. Переработка отходов кожевенного производства – технологический и экономический аспекты проблемы / Н.С. Шарагин, А.М. Авидов // Кожевенно-обувная промышленность. – 2003. – №8. – С.24-25.

11. Гайдук В. В. Неизбежные отходы и реальные доходы / В. В. Гайдук // Кожевенно-обувная промышленность. – 2004. – №3. – С. 17-18.

12. Чурсин В.И. Химико-технологические методы утилизации кожевенной стружки: экономия и экология / В.И. Чурсин // Кожевенно-обувная промышленность. – 1998. – №1. – С.40-48.

13. Hertwing K. Production and Application Kollagen of Leather / K. Hertwing // Bonded Leather. – 2008. – №9. – P.181-186.

14. Erickson Paul R. Wet blue staving the green solution / Paul R. Erickson // World Leather. – 2007. – №7. – P. 57-69.

15. Гаврилова О. Е. Применение перспективных полимерных материалов в легкой промышленности для повышения качества изделий / О. Е. Гаврилова, Л. Л. Никитина // Вестник Казанского технологического университета. – Т.20, № 13. – 2014. – С.96-99.

16. Никитина Л.Л. Проблемы и перспективы производства кожгалантерейных изделий из полимерных материалов. Часть 1 / Л.Л. Никитина, О.Е. Гаврилова // Вестник Казанского технологического университета. – № 6. – 2014. – С. 88–90.

17. Никитина Л.Л. Проблемы и перспективы производства кожгалантерейных изделий из полимерных материалов. Часть 2 / Л.Л. Никитина, О.Е. Гаврилова // Вестник Казанского технологического университета. – Т.17, № 16. – 2014. – С. 116-119.

18. Никитина Л. Л. Современные полимерные материалы, применяемые для низа обуви / Л. Л. Никитина, Г. И. Гарипова, О. Е. Гаврилова // Вестник Казанского технологического университета. – № 6. – 2011. – С. 150-154.

19. Гаврилова О.Е. Влияние качества пластмассовой фурнитуры на качество изделий легкой промышленности / О.Е.Гаврилова, Л.Л.Никитина // Вестник Казанского технологического университета. – № 22. – 2013. – С.164–166.

20. Кутьин В.А. О разволокнении голя кожевенных отходов / В.А. Кутьин, А.Н. Михайлов // Кожевенно-обувная промышленность. – 1961. – №9.– С. 36-43

21. Михайловський Ю.Б. Розробка голкофрезових подрібнювачів для переробки текстильних відходів легкої промисловості : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.10 – машини легкої промисловості / Ю.Б. Михайловський – К. : Державна академія легкої промисловості, 1999. – 114 с.

22. Кутьин В.А. Предел прочности и межволоконные связи кожи / В.А. Кутьин // Известия вузов. Технология легкой промышленности.– 1959.– №4.– С.33-50.

23. Скиба М.Е. Основные конструктивные параметры устройства для ослабления отходов кож перед разволокнением / М.Е. Скиба, Г.А. Пискорский, А.Б. Гуменюк // Депонированные научные работы ВИНТИ, № 2, 1995.

24. Скиба М.Є. Наукові основи ресурсозберігаючих технологій переробки відходів натуральних шкір у матеріали та вироби взуттєвого виробництва: дис... д-ра техн. наук: 05.19.06 – технологія взуттєвих та шкіряних виробів / М.Є. Скиба – К. : КНУТД, 2004. – 417 с.

25. Блинов В.В., Коростелев С.Б., Новокшанов Ю.В., Пшеничников Ю.М., Руднев А.В. Чивелев В.Д., Шевченко В.И., изобретатели. Машина для измельчения покрышек. Патент России, № 2492045, 2006.

26. Кривоножкин М.И., Завацкий В.И., изобретатели. Устройство для измельчения вязких материалов. Авторское свидетельство СССР, № 265766, 1970.

27. Денисов М.В., Денисов А.М., Литвин Н.К., изобретатели. Устройство для утилизации отходов резинотехнических изделий. Патент России, № 2153415, 2000.

28. Ермилов В.П. изобретатель. Устройство для измельчения резинотканеметаллокордных отходов. Патент России, № 2053852, 1996.

29. Петров Ю.Г., Петров Е.Г., Благодарный В.А., изобретатели. Устройство для измельчения материалов. Авторское свидетельство СССР, № 1799616, 1993.
30. Швайгер Хельмут, Пинц Альвин, Мюллер Герт, Шмандра Анджело, изобретатели. Устройство для измельчения. Патент России, № 2305007, 2007.
31. Свиначев Б.М., Москвичев А.Ф., изобретатели. Роторная дробилка. Патент России, № 2081702, 1997.
32. Соловьев Е.М. Исследование процессов резания резин / Е.М. Соловьев // Каучук и резина. – 1972. – №6. – С.14-16.
33. Зуев Ю.С. Разрушение эластомеров в условиях, характерных для эксплуатации / Ю.С. Зуев. – М. : Химия, 1980. – 288 с.
34. Легоцкий С.С., Ворончихин А.И., Лаптев Л.Н., Ермилов В.В., Владимиров С.М., изобретатели. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы. Авторское свидетельство СССР, № 1158636, 1985.
35. Кустов П.Ф., изобретатель. Устройство для измельчения материалов. Авторское свидетельство СССР, № 1502088, 1989.
36. Панов А.К., Биктимиров Ф.В., Петров П.И., Ибраков М.Ш., Шулаев Н.С., Белобородова Т.Г., изобретатели. Устройство для измельчения отходов пластмасс. Патент России, № 2116196, 1998.
37. Кабашев Р. А., Ли С. В., Рабат О. Ж. Кабашев А. Р., изобретатели. Валковая дробилка. Патент Республики Казахстан, № 29666, 2013.
38. Иванов А. В., Штернис В. И., Буянова И. В., изобретатели. Вальцовый измельчитель. Авторское свидетельство СССР, № 1604464, 1990.
39. Иванов А.В., Штернис В.И., Буянова И.В., изобретатели. Мукомольный вальцовый станок. Авторское свидетельство СССР, № 1597210, 1990.
40. Заяць В.В. Математичне моделювання процесів подрібнення полімерних матеріалів у роторних дискових подрібнювачах / В.В. Заяць // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №2. – С. 12-16.
41. Хлюпин Н.А., Городецкий В.Н., Тигина О.В., Кузнецова И. А., Соловьев Е. М., Колобов Н. Н., Дуросов С. М., изобретатели. Валковый измельчитель. Авторское свидетельство СССР, № 1303184, 1987.

42. Городецкий В.Н., Хлюпин Н.А., Кузнецова И.А., Тигина О.В., Соловьев Е.М., Никитина А.В., изобретатели. Валковый измельчитель. Авторское свидетельство СССР, № 1611440, 1990.

43. Егоров А.Д., Мизинов В.Е., Ушаков С.Г., Гришин Л.П., изобретатели. Валковая мельница. Авторское свидетельство СССР, № 975065, 1982.

44. Кошелев Н.Е., Соловьев Е.М., Басаргин Б.Н., Чуксин А.К., Щербаков И.Ф., изобретатели. Машина для измельчения покрышек. Авторское свидетельство СССР, № 1399140, 1988.

45. Кошелев Н.Е., Тафинцев В.К., Рожков В.Ф., Голиков В.Н., Соснов В.Н., изобретатели. Устройство для измельчения крупногабаритных резиновых отходов. Авторское свидетельство СССР, № 1348190, 1987.

46. Баронский Ю.Я., Голиков В.Н., Соснов В.Н., Кобызева К.Г., Гридчин М.И., изобретатели. Установка для резки отходов шинного производства. Авторское свидетельство СССР, № 952320, 1982.

47. Ялына В.Ф., Пономаренко В.М., изобретатели. Устройство для измельчения. Авторское свидетельство СССР, № 1558686, 1990.

48. Илона Татаи, Густав Гюндиш, Геза Сетш, Элемер Лантош, изобретатели. Устройство для измельчения резиновых отходов. Авторское свидетельство СССР, № 1122211, 1984.

49. Якимчук М.В., Иванова Л.І., Горчаков О.І., винахідники. Молоткова дробарка для подрібнення виробів з полімерних матеріалів. Патент України на корисну модель, № 81759, 2013.

50. Курманський О.П., Михайловський Ю.Б., винахідники. Пристрій для переробки зношених автомобільних покришок. Деклараційний патент України на винахід, № 45636, 2002.

51. Сотонин Н.Я., Тетерин С.Н., Сотонин С.Н., изобретатели. Устройство для измельчения. Авторское свидетельство СССР, № 1052255, 1983.

52. Порчхидзе Л.В., Двали З.В., Джаошвили Г.С., Сушинский В.В., Туквадзе Я.Д., изобретатели. Установка для уничтожения носителей информации. Авторское свидетельство СССР, № 1622010, 1991.

53. Морозов А.Д., Морозов В.А., Галыбин Г.М., Емельянов Д.П., изобретатели. Устройство для резки невулканизованных резинотканевых отходов. Авторское свидетельство СССР, № 957957, 1982.

54. Николаев А.И., изобретатель. Измельчитель. Авторское свидетельство СССР, № 1450856, 1989.

55. Скиба М.Є., Михайловський Ю.Б., Головка Г.С., Філіпченко Е.О., Іщук В.І., Місяць В.П., винахідники. Пристрій для переробки відходів гуми, штучної і натуральної шкіри. Деклараційний патент України, № 68978, 2004.

56. Місяць В.П., Михайловський Ю.Б., винахідники. Пристрій для подрібнення відходів полімерів. Деклараційний патент України, № 70163, 2004.

57. Скиба М.Є., Михайловський Ю.Б., Головка Г.С., Філіпченко Е.О., Місяць В.П., винахідники. Валковий подрібнювач автомобільних покришок. Деклараційний патент України, № 71531, 2004.

58. Ворончихин Н.З., Подыниглазов А.А., Опалев Е.В., Соловьев Н. Г., изобретатели. Измельчитель сучьев. Авторское свидетельство СССР, № 1063456, 1989.

59. Адигамов К.А., Лемешко М.А., Иванков Н.Ф., Станкевич И.В., Чегринцев В.Н., изобретатели. Устройство для измельчения резины. Авторское свидетельство СССР, № 1245440, 1986.

60. Конищев Н.И., изобретатель. Измельчитель материалов. Авторское свидетельство СССР, № 986492, 1989.

61. Гуревич Е.Н., Землицкий В.Е., Свидзинский Е.Р., Дуганова А.В., изобретатели. Устройство для переработки отходов пластмасс. Авторское свидетельство СССР, № 772583, 1980.

62. Нечахин Н.В., Пен Ю.Н., Царев И.В., Копытов Р.Ф., Барабанов Г.Л., Лебедев Н.А., Змиева Л.В., Герасимова Л.И., изобретатели. Устройство для разволокнения материала. Авторское свидетельство СССР, № 1663068, 1991.

63. Вторичные материальные ресурсы в легкой промышленности (образование и использование) : Справочник / под ред. И.А.. Калинина – М. : Экономика, 1993. – 663 с.

64. Петракова Н.Н. Переработка текстильных отходов и вторичного сырья / Н.Н. Петракова, Д.Г. Урисова, Е.В. Чернев – М. : Легкпробытиздат, 1998. – 240 с.

65. Ашкин Н.М. Кордочесание волокнистых материалов / Н.М. Ашкин – М. : Легкая промышленность и бытовое обслуживание, 2003. – 144 с.

66. Исаев В.В. Исследование механических и технологических характеристик и разработка конструкций основных рабочих органов высокоскоростных гребнечесальных машин: дис. ... канд.техн.наук : 05.02.13 / Владимир Владимирович Исаев – Ленинград, 1994. – 237 с.

67. Куклина А.А. Исследование динамики корочесальных машин для шерсти: дис. ... канд.техн.наук : 05.02.13 / Алла Александровна Куклина – Ленинград, 1995. – 204 с.

68. Труевцев Н.И. Механическая технология волокнистых материалов / Н.И. Труевцев, Н.Н. Труевцев – М. : Легкая индустрия, 1999. – 608 с.

69. Ипатов А.М. Теоретические основы обработки лубяных культур / А.М. Ипатов – М. : Легпромбытиздат, 1989. – 144 с.

70. Пахаренко В.А. Наполненные термопласты: Справочник / В.А. Пахаренко, В.Г. Зверлин, Е.М. Кириенко; под ред. Ю.С. Липатова. – К. : Техніка, 1996. – 182 с.

71. Головка Г.С., Михайловський Ю.Б., Скиба М.Є., винахідники. Молотковий подрібнювач еластомерів в вискоеластичному стані. Патент України на корисну модель, № 16319, 2006.

72. Севостьянов В.С., Романович А.А., Платонов В.С., Козка В.П., изобретатели. Пресс-валковый измельчитель. Патент Российской Федерации, № 2030213, 1995.

73. Расмус Транберг, Ларсен Мортен, изобретатели. Валковая мельница. Патент Российской Федерации, № 2481157, 2013.

74. Балдин Г. В., изобретатель. Валковая мельница с качающимися прижимаемыми вальцами. Патент Российской Федерации, № 2023509, 1991.

75. Пантелеев В.А.; Безбородов С.М.; Шенаев В.М.; Быков В.В., Усов В.П., изобретатели. Валковая мельница. Патент Российской Федерации, № 2081703, 1997.

76. Савиных П.А., Казаков В.А., Исупов А.Ю., изобретатели. Вальцовая плющилка для зерна патента. Патент Российской Федерации, № 2511308, 2010.

77. Некрашевич В.Ф., Ковалев И.В., изобретатели. Вальцовая плющилка для размалывания зерна. Патент Российской Федерации, № 2072657, 2011.

78. Патцельт Норберт, изобретатель. Валковая дробилка. Патент Российской Федерации, № 2454279, 2012.

79. Дышлевой И.В., Рудякевич В.Е., Руденко Л.Г., Хазнаферов М.В., Николенко Н.Н., изобретатели. Валковая дробилка. Патент Российской Федерации, № 2033262, 1995.

80. Шашков И.В. Валковое оборудование и технология непрерывной переработки отходов пленочных термопластов : монография / И.В. Шашков, А.С. Клинков, П.С. Беляев, М.В. Соколов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 136 с.

81. Тимушкин Н.В., изобретатель. Вальцовый станок. Патент Российской Федерации, № 2113280, 1998.

82. Старостин В.В., изобретатель. Мукомольный вальцовый станок патенту. Патент Российской Федерации, № 2140322, 1999.

83. Круць М.Ф., Заяць Б.Й., Ліщинський П.С., винахідники. Валкова дробарка спеціальна. Патент України, № 12256, 2006.

84. Мирный А.Н., Разнощик В.В., изобретатели. Установка для прокату компоста. Авторское свидетельство СССР, № 556832, 1977.

85. Круць М.Ф., Заяць Б.Й., Ліщинський П.С., винахідники. Валкова дробарка з валково-зубчастим механізмом ламання. Патент України. № 13389, 2006.

86. Потапов Н.В., Нарядчиков А.Н., изобретатели. Трехвалковая краскотерка. Авторское свидетельство СССР, № 895495, 1982.

87. Мікульонок І.О., Витвицький В.М., Малащук Н.С., винахідники. Конусна дробарка. Патент України, № 90402, 2014.

88. Львутин И.Г., Вавилов А.В., Петлах Я.С., изобретатели. Устройство для измельчения древесины. Авторское свидетельство СССР, № 729055, 1980.



89. Одоевцев В.Д., Сорокин Я.Г., Кавешников Н.А., изобретатели. Установка для измельчения резиновых отходов. Авторское свидетельство СССР, № 1763211, 1992.

90. Юров Н.С., Москвин М.И., изобретатели. Устройство для измельчения полимерных листовых материалов. Авторское свидетельство СССР, № 1000103, 1983.

91. Кольцов М.В., Грибанов А.В., Кольцова Н.М., изобретатели. Валковая мельница. Авторское свидетельство СССР, № 936998, 1982.

92. Скиба М.Є. Моделювання процесу подрібнення та послаблення структури композиційного матеріалу у валковому механізмі з профілем трикутника рьоло / М.Є. Скиба, Ю.Б. Михайловський, Г.С. Головка // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2004. – №1. – Т.9. – С. 34-39..

93. Белобородова Т.Г. Разработка конструкции и метода расчета установки для измельчения полимерных отходов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т.Г. Белобородова – Уфа : Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2001. – 19 с.

94. Мантия Ф. Ла. Вторичная переработка пластмасс / Ф. Ла. Мантия; под. ред. Г.Е. Зайкова; пер. с англ. – СПб. : Профессия, 2006. – 400 с.

95. Gertsakis J. Design for Plastics Recycling / J. Gertsakis, C. Harris, M. Hoskin, E. Kosior // Centre for Design at RMIT. – Melbourne, 1991. – P. 124-130.

96. Жмыхов И.Н. Процессы и оборудование производства волокнистых пленочных материалов / И.Н. Жмыхов, Л.С. Гальбрайх, А.В. Акулич, Л.А. Щербина. – Минск : Вышэйшая школа, 2013. – 592 с.

97. Оссвальд Т.А. Литье пластмасс под давлением / Т.А. Оссвальд, Л.-Ш. Тунг, П.Дж. Грэмман; под. ред. Э.Л. Калинчева. – СПб. : Профессия, 2006. – 712с.

98. Бобович Б.Б. Неметаллические конструкционные материалы / Б.Б. Бобович – М. : МГИУ – 2009. – 384 с.

99. Андреева А. В. Основы физикохимии и технологии композитов: учебное пособие для вузов / А. В. Андреева. – М. : КИПРЖР, 2001. – 192 с.

100. Батаев А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение / А. А. Батаев, В. А. Батаев. – Новосибирск : НГТУ, 2002. – 384 с.
101. Каргин В.А. Краткие очерки по физико-химии полимеров / В.А. Каргин, Г.Л. Слонимский – Л. : Химия, 1987. – 231 с.
102. Hosemann R. Röntgenographische Untersuchungen der Ordnungszustände in Polymeren / R. Hosemann // *Bunsenges phys. chem.* – 1990. – Bd.74. – H.8/9. – S. 755-767.
103. Гросберг А.Ю. Статистическая физика макромолекул / А.Ю. Гросберг, А.Р. Хохлов – М. : Наука, 1989. – 344 с.
104. Вайнштейн Б.К. Кристаллография и кристаллохимия / Б.К. Вайнштейн – М. : Наука 1996. – 326 с.
105. Цветков В.Н. Новейшие методы исследования полимеров / В.Н. Цветков – М. : Мир, 1976. – 446 с.
106. Уорд И. Механические свойства твердых полимеров / И. Уорд – М. : Химия, 1985. – 350 с.
107. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л. Нильсен – М. : Химия, 1978. – 312 с.
108. Огибалов П.М. Механика полимеров / П.М. Огибалов, В.А. Ломакин, Б.П. Кишкин – М. : МГУ, 1975. – 528 с.
109. Миллер Р.Л. Свойства кристаллов и сферолитов / Р.Л. Миллер // Кристаллические полиолефины. Строение и свойства – М. : Мир, 1978, Т.2. – С. 165-241.
110. Kavesh S. Lamellar and Intertamellar Structure in Melt-Crystallized Polyethylene / S. Kavesh, I.M. Schultz // *J. Polym. Sci.* – 1991. – Part. 2. – V. 9. – №1. – P. 85-114.
111. Привалко В.П. Молекулярное строение и свойства полимеров / В.П. Привалко – Л.: Химия, 1976. – 240 с.
112. Андрианова Г. П. Физикохимия полиолефинов / Г. П. Андрианова – М. : Химия, 1994. – 238 с.

113. Самуэльс Р.И. Структура, морфология деформаций и механические свойства волокон изотактического поли пропилена / Р.И. Самуэльс // Физика полимеров. – М. : Мир, 1989. – С. 199-141.

114. Гаспарян К.А. Дифрактометрическое изучение процессов перехода от сферолитного надмолекулярного порядка к ориентационному / К.А. Гаспарян, Я.П. Голоубек, В.Г. Баранов, С.Я. Френкель // Высокомолекулярные соединения. – 1973. – Т.10. – №1. – С. 86-95.

115. Френкель С.Я. Особенности ориентационного надмолекулярного порядка, образующегося при растяжении сферолитных пленок полиэтилена высокого давления / С.Я. Френкель, В.Г. Баранов, К.А. Гаспарян, Р.О. Зурабян, Э.С. Эдилян // Высокомолекулярные соединения. – 1978. – Т. XI. – № 6. – С.1247-1256.

116. Петерлин А.В. Механические свойства и фибриллярная структура / А.В. Петерлин // Сверхвысокомодульные полимеры. – Л. : Химия, 1983. – С. 205-240.

117. Марихин В.А. Надмолекулярная структура полимеров / В.А. Марихин, Л.П. Мясникова – Л. : Химия, 1978. – 240 с.

118. Перепечко И.И. Акустические методы исследования полимеров / И.И. Перепечко – М.; Химия, 1984. – 296 с.

119. Келлер А. Кристаллы длинноцепочечных полимеров / А. Келлер // Успехи физ. наук. – 1981. – Т.105. – № 4. – С. 421-434.

120. Hess K. Kenntnis der Feinstruktur der poll fasern / К. Hess, Н. Kissing // Naturwiss. – 1993. – Bd. 31. – S. 171-178.

121. Журков С.Н. Электронно-микроскопическое изучение процесса ориентирования поликапроамида / С.Н. Журков, В.А. Марихин, Л.П. Мясникова, А.И. Слуцкер // Высокомолекулярные соединения. – 1975. – Т. 7. – № 6. – С. 1041-1045.

122. Prevorsek D.C. Nylon 6 fibers: Changes in structure between moderate and high draw rations / D.C. Prevorsek, P.V. Harget, A.C. Reimschuessel, R.K. Sharta // J. Macromol. Sci. – 1988. – Vol. B8. – № 12. – P. 127-156.

123. Peterlin A. Morphology and fracture of drawn crystalline polymers / A. Peterlin // J. Macromol. Sci. Phys. – 1993. – vol. B8. – №.12. – P.83-89.

124. Журков С.Н. Влияние нагружения на надмолекулярную структуру ориентированных полимеров / С.Н. Журков, А.И. Слуцкер, А.А. Ястребинский // Докл. АН СССР. – 1968. – Т. 153. – № 2. – С. 303-305.

125. Кениг Дж. Новейшие инструментальные методы исследования структуры полимеров / Дж. Кениг – М. : Мир, 1982. – 264 с.

126. Петерлин А. Структура и свойства кристаллических полимеров / А. Петерлин // Химия и технология полимеров – 1976. – № 10. – С. 49-73.

127. Цобкалло Е.С. Характеристики механических свойств деформированных волокнистых материалов, методы их оценки и прогнозирования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.19.01 / Цобкалло Екатерина Сергеевна. – СПб., 2001. – 468.

128. Журков С.Н. Изучение механических превращений в полиэтилене методом инфракрасной спектроскопии / С.Н. Журков, И.Н. Новак, Б.Я. Левин, А.В. Савицкий, В.И. Веттегрень // Высокомолекулярные соединения. – 1965. – Т. 7. – № 7 – С. 1203-1208.

129. Кулик В.Б. Напряжения в полимерных кристаллах, вызываемые внутренней атомно-молекулярной динамикой: дис. ...канд.физ.-мат.наук : 01.04.07 / Виталий Борисович Кулик – Санкт-Петербург, 2009. – 127 с.

130. Peterlin A. Crystallization From a Strained Melt or Solution / A. Peterlin // Polym., Eng. a Sci. – 1986. – V.16, № 3. – P. 126-137.

131. Слуцкер А.И. Ориентированное состояние / А.И. Слуцкер // Энциклопедия полимеров. – М. : Сов. энциклопедия, 1984. – Т. 2. – С. 515-528.

132. Слонимский Г.Л. К вопросу о влиянии типа и размера элементов надмолекулярной структуры полимера на его механические свойства / Г.Л. Слонимский, В.И. Павлов // Высокомолекулярные соединения. – 1965. – Т.7, №7. – С. 1279-1282.

133. Петерлин А. Пластическая деформация полимерных тел с волокнистой структурой: Препринты международного симпозиума по хим. волокнам / А. Петерлин – Калинин: 1984. – № 7. – С. 39-72.

134. Куксенко В.С. Изучение плотности межкристалльных прослоек в ориентированных полимерах / В.С. Куксенко, А.И. Слуцкер // Физика твердого тела. – 1978. – Т.10, № 3. – С. 838-847.

135. Регель В.Р. Кинематическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский – М. : Наука, 1984. – 560 с.

136. Журков С.Н. Связь упругой деформации ориентированных полимеров с их строением / С.Н. Журков, А.И. Слуцкер, А.А. Ястребинский // Физика твердого тела. – 1984. – Т.6. – № 6. – С. 3601-3614.

137. Clark E.S. Superdraun Crystalline Polymers: A new Class of High-Strength Fiber / E.S. Clark, L.S. Scott // Polymer Eng. Sci. – 1994. – V.14. – P. 682-693.

138. Kardos L. The Potential Mechanical Response of Macromolecular Systems-A Composite Analogy / L. Kardos, J. Raison // Polymer Eng. Sci. – 1995. – Vol.15. – P. 183-191.

139. Dobb M.G. Supramolecular Structure of a High-Modulus Polyaromatic Fiber (Kevlar 49) / M.G. Dobb, D.J. Johnson, B.P. Savill // J. Polym. Sci. – 1997. – V.15. – P. 2201-2218.

140. Бартнев, Г.М. Физика полимеров / Г.М. Бартнев, С.Я. Френкель. – Л. : Химия, 1990. – 429 с.

141. Reneker D.H. Effect of Polymeric Structure on the Permeation Rate in Standard Reference Material Sulfur Dioxide Permeation Tubes / D.H. Reneker, G.M. Martin, R.J. Rubin, J.P. Colson // Polym. Eng. Sci. – 1975. – V.15. – № 1. – P. 11-15.

142. Москатов К.А. Структура полиамида 6 и его свойства / К.А. Москатов, А.В. Одинокоев // Высокомолекулярные соединения. – 1985. – № 11. – С. 243-249.

143. Одинокоев А.В. Влияние надмолекулярной структуры термопласта на его свойства / А.В. Одинокоев // Высокомолекулярные соединения. – 1985. – Т.6. – № 8. – С. 46-58.

144. Одинокоев А. В. Исследование влияния надмолекулярной структуры на физико-механические свойства полимеров : дис. ... канд. физ-мат. наук : 01.02.04 / Александр Владимирович Одинокоев – М., 1986. – 132 с.

145. Bondi A. On the Predictability of the High-Frequency Elastic Modulus of Crystalline Polymers as Function of Crystallinity / A. Bondi // J. Polymer Sci. – 1997. – Pt. A-2. – V.5. – № 1. – P. 83-87.

146. Kerner E.H. The elastic and thermo elastic properties of composite media / E.H. Kerner // Pros. Phys. Sos. – 1986. – V. 69. – P. 808-813.

147. Хашин Э. Модули упругости гетерогенных материалов / Э. Хашин // Прикладная механика. – М. : Мир, 1962. – № 1. – С. 159-67.

148. Halpin S.C. Module of Crystalline Polymers Employing Composite Theory / S.C. Halpin, S.L. Kardos // J. Appl. Phys. – 1972. – V.43. – P. 2235-2247.

149. Lindenmeyer P.M. Some relationships between physical properties and morphology of heterogeneous polymeric systems / P.M. Lindenmeyer // J. Polymer Sci. – 1978. – V. 64. – P. 181-187.

150. Hill R. Theory of mechanical properties of fiber-strengthened materials: 1. Elastic behavior / R. Hill // J. Mech. and Phys. Sol. – 1978. – V.12. – P. 199-212.

151. Эшелби Дж. Континуальная теория дислокаций / Дж. Эшелби – М. : Иностранная литература, 1983. – 247 с.

152. Halpin J.C. Elastic module of oriented polymers / J.C. Halpin // J. Composite Mater. – 1989. – V.3. – P. 732-745.

153. Tsai S.W. A general theory of strength for tropic materials / S.W. Tsai, E.M. Wu // J. Comp. Mater. – 1987. – V.5. – P. 58-61.

154. Lewis T.B. Dynamic Mechanical Property Particulate-Filled Composites / T.B. Lewis, L.E. Nilsen // J. Appl. Polym. Sci. – 1984. – V.14. – P. 1449-1458.

155. Захариадес А.Е. Современные достижения технологии получения полиэтилена в свёрхориентированном состоянии методом твердофазной экструзии / А.Е. Захариадес, Б.Г. Мид, Р.С. Портер // Сверхвысокомодульные полимеры. – М. : Химия, 1983. – С. 63-89.

156. Kroner E. Berechnung der elasttschen Konstanten des Vielkr talss aus den Konstanten des Einkristalls / E. Kroner // Z. Phys. – 1978. – V. 151. – P. 504-512.

157. Кострицкий В.В. Исследование и прогнозирование физико-механических свойств ориентированных полиэтилентерефталатных пленок: дис. ... канд. техн. наук : 01.02.04 / Валерий Всеволодович Кострицкий. – К., 1982. – 259 с.

158. Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов / Г.А. Ванин – Киев : Наукова думка, 1985. – 304 с.

159. Розовский М.И. Некоторые свойства специальных операторов, применяемых в теории ползучести / М.И. Розовский // Прикладная математика и механика. – 1959. – Т. 23. – № 5. – С. 978-981.

160. Вундерлих, Б. Физика макромолекул. в 3 томах / Б. Вундерлих ; пер. с англ. Ю.К. Годовского. – М. : Мир, 1984. – Т. 1, Т. 2, Т. 3. – 623 с., 574 с., 484 с.

161. Pakula T. / Studies of  $\alpha$  relaxation process in spherulitic and nonspherulitic samples of isotactic polypropylene with different molecular ordering / T. Pakula, M. Pluta, M. Kryszewski // Polymery. – 1978. – V. 23. – № 9. – P. 286-292.

162. Майникова Н.Ф. Методы и средства неразрушающего теплового контроля структурных превращений в полимерных материалах : Монография / Н.Ф. Майникова, С.В. Мищенко, Н.П. Жуков, И.В. Рогов. – Тамбов : ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 320 с.

163. Ягфаров М.Ш. О природе вторичной кристаллизации в полимерах / М.Ш. Ягфаров // Высокомолекулярные соединения. – 1988. – Т. 30. – № 1. – С. 79-85.

164. Аскадский А.А. Химическое строение и физические свойства полимеров / А.А. Аскадский, Ю.И. Матвеев. – М. : Химия, 1983. – 248 с.

165. Кулезнев В.Н. Химия и физика полимеров / В.Н. Кулезнев, В.А. Шершнев. – М. : Высшая школа, 1988. – 312 с.

166. Иржак В.И. Сетчатые полимеры / В.И. Иржак, Б.А. Розенберг, Н.С. Ениколопан. – М. : Наука, 1979. – 180 с.

167. Андреева А.В. Основы физико-химии и технологии композитов / А.В. Андреева. – М. : Радиотехника, 2001. – 301 с.

168. Гуль В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнев. – М. : Высшая школа, 1979. – 352 с.

169. Ван Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров / Д.В. Ван Кревелен ; пер. с англ., под ред. А.Я. Малкина. – М. : Химия, 1976. – 416 с.

170. Трилор, Л. Введение в науку о полимерах / Л. Трилор ; пер. с англ. – М. : Мир, 1973. – 238 с.

171. Шур А.М. Высокомолекулярные соединения / А.М. Шур. – М. : Высшая школа, 1981. – 656 с.

172. Барамбойм Н.К. Механохимия высокомолекулярных соединений / Н.К. Барамбойм. – М. : Химия, 1978. – 384 с.

173. Kulik T. Modeling a process of filling the mold during injection molding of polymeric parts / T. Kulik, O. Synyuk , B. Zlotenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 5/1 (89). – P. 70-77.

174. Синюк О.М. Числове моделювання процесу заповнення порожнини прес-форми складної конфігурації / О.М. Синюк, М.Є. Скиба, Б.М. Злотенко // Вісник Технологічного університету Поділля. Технічні науки, 2004. – № 5. – С. 49-52.

175. Synyuk O. Improvement of Footwear Moulding Machines for the Production of the Advanced Reliability Items / O. Synyuk, M. Skyba // The eleventh world congress in Mechanism and Machine Science (1-4 April 2004). – Tianjin (China) : Editor Tian Huang School of Mechanical Engineering Tianjin University, 2004. – V. 5. – P. 2212-2216.

176. Skyba M. Improvement of press-forms for polymeric items moulding / M. Skyba, O. Synyuk // Archives of foundry. Polish Academy of Sciences branch Katowice foundry commission, Katowice (Poland), 2004. – V. 4. – № 12. – P. 235-248.

177. Лапшин В.В. Основы переработки термопластов литьем под давлением / В.В. Лапшин. – М. : Химия, 1974. – 270 с.

178. Кострицкий В.В. Структурно-механическая модель аморфно-кристаллических полимеров / В.В. Кострицкий // Механика композитных материалов. – Рига : Зинатне, 1990. – № 4. – С. 585-593.



179. Synyuk O. Formation of the model of the polymer material structure during orientational drawig / O. Synyuk, M. Skyba, T. Romanets // Actual problems of modern science [collective monograph], UTP University of Sciences and Technology in Bydgoszcz, Poland, 2017. – P. 395-413.

180. Скиба М.Є. Структурно-механічна модель полімерних виробів, отриманих литтям під тиском / М.Є. Скиба, О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету, 2014. – №6 (219). – С. 27-33.

181. Разумова М. А. Основы векторного і тензорного аналізу: навчальний посібник / М. А. Разумова, В. М. Хотяїнцев. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2011. – 216 с.

182. Лурье А. И. Теория упругости / А. И. Лурье. – М. : Наука, 1970. – 940 с.

183. Снеддон И.Н. Классическая теория упругости / И.Н. Снеддон, Д.С. Берри, под. ред. Э.И. Григолюка. – М. : Мосгорсоннархоз, 1961. – 220 с.

184. Синюк О.М. Модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – №3 (237). – С. 181-188.

185. Argon A. S. The Physics of Deformation and Fracture of Polymers / A. S. Argon – New York : Cambridge University Pres, 2013. – 511 p.

186. Капаччио Дж. Вытяжка и гидростатическая экструзия сверхвысокомолекулярных полимеров / Дж. Капаччио, А. Г. Гибсон, И. М. Уорд // Сверхвысокомолекулярные полимеры. – Л. : 1983. – С. 12-62.

187. James E. Compositional gradients surrounding spherulites in obsidian and their relationship to spherulite growth and lava cooling / E. James, S. Kenneth, B. Watkins, J. Watkins, M. Hesse, N. Miller // Springer – 2012. – № 4. – P. 229-243.

188. Stoclet G. WAXS study of the structural reorganization of semi-crystalline polylactide under tensile drawing / G. Stoclet, R. Seguela, C. Vanmansart, C. Rochas, J.-M. Lefebvre // Polymer Journal. –2012. – Volume 53. – Issue 2. – P. 519-528.

189. Grub D.T. A structural model for high-modulus polyethylene derived from entanglement concepts / D.T. Grub // Polymer Physics. – 1983. – Volume 21. – Issue 2. – P. 165-188.

190. Koseki Yu. Crystalline structure and molecular mobility of PVDF chains in PVDF/PMMA blend films analyzed by solid-state F MAS NMR spectroscopy / Yu Koseki, Keitaro Aimi, Shinji Ando // *Polymer Journal* – 2012. – № 44. – P. 757-763.

191. Синюк О.М. Визначення пружних властивостей аморфно-кристалічних полімерів сферолітної структури / О.М. Синюк // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2016. – № 6. – С. 77-86.

192. Баранов В.Г. Наблюдение прямой генетической связи между сферолитным и ориентационным надмолекулярным порядком / В.Г. Баранов, К.А. Гаспарян, С.Я. Френкель // *Докл. АН СССР*. – 1973. - Т. 183. – № 1. – С. 137-140.

193. Каргин В. А. Изучение процессов растяжения и сокращения пленок полиэтилена со сферолитными структурами / В. А. Каргин, В. И. Селихова, П. С. Маркова // *Высокомолекулярные соединения*. – Сер. А. – 1969. – Т. 7. – № 9. – С. 1495-1499.

194. Охлопкова Т. А. Микроскопические исследования деформации растяжения сферолитных структур в полимерных композиционных материалах / Т. А. Охлопкова, Р. В. Борисов, А. А. Охлопкова, А. А. Дьяконов, А. П. Васильев, С. Н. Миронова // *Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова*. – 2015. – № 3 (47). – С. 75-87.

195. Wen T. Epitaxial crystallization of olefin block copolymers (OBCs) on uniaxially oriented isotactic polypropylene and high-density polyethylene films / T. Wen, Y. Zhou, G. Liu, F. Wang, X. Zhang, D. Wang, H. Chen, K. Walton, G. Marchand, J. Loos // *Polymer Journal*. – 2012. – Volume 53. – Issue 2. – P. 529-535.

196. Utracki L. A. *Polymer Blends Handbook* / L. A. Utracki, C. A. Wilkie – Netherlands : Springer, 2014. – 2378 p.

197. *Properties and Behavior of Polymers. Volume 2* / J. Bailey (Editor). – New Jersey : John Wiley & Sons, 2012. – 1591 p.

198. Brazel Christopher S. *Fundamental principles of polymeric materials* / Christopher S. Brazel, Stephen L. Rosen. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2012. – 407 p.

199. Fakirov S. Fundamentals of Polymer Science for Engineers / S. Fakirov. – Weinheim (Germany) : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017. – 385 p.
200. Синюк О. М. Метод розрахунку ефективних пружних властивостей полімерів з орієнтованою структурою / О. М. Синюк // Технічні науки і технології. – Чернігівський національний технологічний університет. – 2016. – № 4. – С. 16-25.
201. Перепелкин К. Е. Структура и структурная механика полимерных волокон: современные представления / К. Е. Перепелкин // Химические волокна. – 2009. – №1. – С. 11-20.
202. Синюк О.М. Моделювання зміни надмолекулярної структури полімерних матеріалів при орієнтаційній витяжці / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 6. – С. 45-50.
203. Подильчук Ю.Н. Трехмерные задачи теории упругости / Ю.Н. Подильчук // АН УССР, Институт механики – К. : Наук. думка. – 1979. – 240 с.
204. Подильчук Ю.Н. Точные аналитические решения пространственных граничных задач статики трансверсально-изотропного тела канонической формы / Ю.Н. Подильчук // Прикладная механика. – 1997. – № 10 (33). – С.3-30.
205. Джейл Ф.Х. Полимерные монокристаллы / Ф.Х. Джейл. – М.-Л. : Химия. – 1978. – 551 с.
206. Starkweather H.W. The heat of fusion of polytetrafluoroethylene / H.W. Starkweather, P. Zoller, G.A. Jones // Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition. – 1982. – V. 20. – P. 751-762.
207. Thompson A.B. The transitions of polyethylene terephthalate / A.B. Thompson, D.W. Woods // Trans Faraday Society Journal – 1995. – № 52. – P. 1383-1397.
208. Mehta A. Heat capacities of linear macromolecules / A. Mehta, R. C. Bopp, U. Gaur, B. Wunderlich // Journal of thermal analysis. – 1978. – Volume 13. – Issue 2. – P. 197-203.
209. Heffelfinger C.J. The Science and Technology of Polymer Films / C.J. Heffelfinger, K.L. Knox; Ed. O.J. Sweeting – New York : Wiley-Interscience, 1971. – 587 p.

210. Hawthorne J. M. Encyclopedia of Polymer Science / J.M. Hawthorne, C.J. Heffelfinger, K.L. Knox; Eds. F. Mark, N.G. Gaylord. – New York : Wiley-Interscience, 1969. – 1142 p.

211. Rodriguez F. Principles of Polymer Systems / F. Rodriguez, C. Cohen, Ch. K. Ober, L. Archer – Washington : CRC Press, 2014. – 810 p.

212. Samuels R. J. Polymer Structure: The Key to Process-Property Control / R. J. Samuels // Polymer Engineering and Science. – 1985. – № 25. – P. 862-874.

213. Синюк О.М. Визначення ефективних пружних властивостей орієнтованих полімерів в поперечному напрямку / О.М. Синюк, А.Ю. Михайловський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну, 2017. – №6 (116). – С. 139-148.

214. Синюк О.М. Визначення ефективних пружних властивостей орієнтованих полімерів в поперечному до орієнтації напрямку / О.М. Синюк, А.Ю. Михайловський // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції “VII Українсько-Польські наукові діалоги” (18-21 жовтня 2017). – Хмельницький-Меджибіж, 2017. – С. 112-113.

215. Синюк О.М. Визначення пружних властивостей полімерного матеріалу під час впливу на нього напружень зсуву / О.М. Синюк, Н.К. Медведчук. – Вісник Хмельницького національного університету. – 2017. – № 4. – С. 73-81.

216. Синюк О.М. Математична модель анізотропних властивостей полімерних матеріалів / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – №1. – С. 12-18.

217. Тагер А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер. – М. : Научный мир, 2007. – 576 с.

218. Синюк О.М. Експериментальні дослідження впливу температури та ступеня витяжки полімеру на його міцність / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету, 2017. – №6 (255). – С. 278-285.

219. Кострицкий В.В. Методика и испытательная установка для исследования динамических свойств полимерных материалов / В.В. Кострицкий // Заводская лаборатория. – 1990. – Т. 56. – № 5. – С. 98-102.

220. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров – М. : Легкая индустрия, 1974. – 263 с.

221. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1976. – 280 с.

222. Кострицкий В.В. Установка для исследования ползучести и долговечности пленок / В.В. Кострицкий, А.П. Грабовский // Заводская лаборатория. – 1981. – № 2. – С. 86-67.

223. Абрамов С.К. Резонансные методы исследования динамических свойств пластмасс / С.К. Абрамов – Ростов-на-Дону : Издательство Ростовского университета, 1978. – 135 с.

224. ГОСТ 20812-94. Пластмассы. Определение динамического модуля сдвига и тангенса угла механических потерь методом свободных крутильных колебаний. Москва. Дата переиздания 1998-01-01.

225. Гливенко, В.И. Интеграл Стилтеса / В.И. Гливенко. – 2-е изд., испр. – М. : URSS, 2007. – 216 с.

226. Ильюшин А.А. Основы математической теории термовязкоупругости / А.А. Ильюшин, В.Е. Победра – М. : Наука, 1970 – 281 с.

227. Ржаницын, А.Р. Теория ползучести / А.Р. Ржаницын – М. : Стройиздат, 1968. – 415 с

228. Малмейстер А.К. Сопротивление полимерных и композитных материалов / А.К. Малмейстер, В.П. Тамуж, Г.А. Тетерс. – 3-е изд., перераб. и доп. – Рига : Зинатне, 1980. – 571 с.

229. Гермелис А.А. Определение реологических характеристик полимерных материалов из статических кривых, кривых ползучести и релаксации / А.А. Гермелис, В.А. Латищенко // Механика полимеров. – 1967. – № 6. – С. 977-988.

230. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. В 10-ти т. Т. VII. Теория упругости: Учеб. пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – М.: Наука, 1987. – 248 с.

231.Блох В.И. Теория упругости / В.И. Блох.. – Харьков: Издательство Харьковского университета. – 1964. – 484 с.

232.Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела: Учеб. пособие / Ю.Н. Работнов – М. : Наука, 1988. – 712 с.

233.Качанов Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов – М.: Наука, 1969. – 420 с.

234.Вайткявичене А.-С. Э. Экспресс метод определения связи между показателями прочности клеевых соединений при сдвиге и расклеивании / А.-С. Э. Вайткявичене, В.-П. В. Пекарскас, В.Л. Раяукас // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 1983. – № 5. – С. 23-25.

235.Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. пособие / В.И. Самуль. – М.: Высш. школа, 1982. – 264 с.

236.Синюк О.М. Метод визначення ефективних властивостей багаточастотних полімерних матеріалів / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2015. – № 6 (231). – С. 54-62.

237.Синюк О.М. Метод визначення ефективних властивостей багаточастотних полімерних матеріалів / О.М. Синюк, А.Ю. Кравчук // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «VI Українсько-Польські наукові діалоги» (21-24 жовтня 2015). – Хмельницький-Яремче, 2015. – С. 19-21.

238.Кристенсен Р.М. Введение в механику композитов / Р.М. Кристенсен. Пер. с англ. А.И. Бейля, Н.П. Жмудя под ред. Ю.М. Тарнопольского. – М. : Мир, 1982. – 336 с.

239. Синюк О.М. Експериментальні дослідження руйнування поліетиленових та поліпропіленових плівок / О.М. Синюк // Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології». – Хмельницький : ХНУ, 2017. – № 4 (86). – С. 51-59.

240. Стефанов Ю.П. Численное исследование поведения упруго-идеальнопластических тел, содержащих неподвижную и распространяющуюся трещины, под действием квазистатических и динамических растягивающих нагрузок / Ю.П. Стефанов // Физическая мезомеханика – 1998. – Т. 1, № 2. – С. 81-93.

241.Ивлєв Д.Д. Механика пластических сред: В 2 т. Том 1. Теория идеальной пластичности / Д.Д. Ивлєв – М. : Физматлит, 2001. – 448 с.

242.Немирович-Данченко М.М. Применение конечно-разностного метода в переменных Лагранжа для расчета волновых полей в сложнопостроенных средах / М.М. Немирович-Данченко, Ю.П. Стефанов // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36, № 11. – С. 96-105.

243.Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упругохрупкопластичных материалов / Ю.П. Стефанов // Физическая мезомеханика – 2005. – Т. 8, № 3. – С. 129-142.

244.Ахмадєєв Н.Х. Динамическое разрушение твердых тел в волнах напряжений / Н.Х. Ахмадєєв. – Уфа : БФАН СССР, 1988. – 168 с.

245.Бурмістенков О.П. Числові методи математичного моделювання в створенні технологічної оснастки для лиття виробів з полімерних матеріалів: монографія / О.П. Бурмістенков, Б.М. Злотенко, М.Є. Скиба, О.М. Синюк. – Хмельницький : ПП Ковальський В.В, 2002. – 148 с.

246.Кострицкий В.В. Испытательная машина для определения качественных показателей пленочных полимерных, композиционных и текстильных материалов / В.В. Кострицкий, М.П. Березненко, Г.А. Ванин, В.В. Корзун // Заводская лаборатория. – 1994. – № 12. – С. 124-128.

247.Synyuk Oleh. Determination of rational structural parameters of device for polymer recycling / Oleh Synyuk // Scientific Journal of the TNTU, Ternopil : TNTU, 2017. – № 1. – P. 53-61.

248.Синюк О.Н. Расчет основных параметров устройства для переработки полимерных отходов / О.Н. Синюк, Т.И. Кулик // Вестник Витебского государственного технологического университета, 2017. – № 2 (33). – С. 78-87.

249.Синюк О.М. Зменшення витрат електроенергії для частотно-імпульсних приводів / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2013. – № 6. – С. 54-57.

250. Патент на корисну модель № 63705, Україна, МПК H02 P 27/04. Спосіб зменшення витрат електроенергії для приводів / Синюк О.М., Михайловський Ю.Б. – № u201004865; заяв. 23.04.2010; опубл. 25.10.2011; Бюл. № 20. – 2 с.

251. Кауш Г. Разрушение полимеров / Г. Кауш, пер. с англ. В.И. Участкина под. ред. С.Б. Ратнера, М. : Мир, 1981. – 440 с.

252. Михайловский Ю.Б. Поиск глобального оптимума для задач оптимального проектирования систем или определения оптимальных законов управления / Ю.Б. Михайловский // Режим доступа: [http://mdop.sourceforge.net/index\\_ru.html](http://mdop.sourceforge.net/index_ru.html).

253. Карван С. А. Розробка захисного форменого одягу для військовослужбовців / С. А. Карван, С. Л. Горященко, О. М. Синюк // Тези доповідей V міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки” (11-12 жовтня 2017). – Київ, 2017. – С. 145-147.

254. Злотенко Б. М. Научные основы проектирования технологического процесса литья изделий лёгкой промышленности с прогнозируемыми свойствами: дис. доктора техн. наук : 05.19.06 / Злотенко Борис Миколайович. – К., 2003. – 405 с.

255. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантереїній промисловості: монографія / О.П. Бурмістенков, Б.М. Злотенко, В.П. Коновал, І.В. Панасюк, М.Є. Скиба, О.М. Синюк. – Хмельницький : РВЦ ХНУ, 2007. – 255 с.

256. Синюк О.М. Проблема еволюції лінії контакту трьох фаз в процесі руху полімеру в прес-формі / О.М. Синюк // Збірник наукових праць міжнародної науково-технічної конференції молодих науковців «Сучасні технології в механіці» (21-23 квітня 2016 року). – Хмельницький: ХНУ, 2016. – С. 172-174.

257. Синюк О.М. Моделювання пружного відновлення струменя, що виходить з формуючої головки / О.М. Синюк // Вісник Херсонського національного технічного університету, 2016. – №4 (59). – С. 203-212.



258. Синюк О.М. Моделювання процесу заповнення розплавом полімеру порожнини прес-форми з армуючими елементами / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету, 2017. – №1 (245). – С. 251-257.

259. Синюк О.М. Використання полімерних відходів при литті двошарових підошв / О.М. Синюк // Матеріали міжнародної Українсько-Польської конференція “Techno and Design” (19-21 червня 2012). – Київ : Київський національний університет технологій та дизайну, 2012. – С.263-268.

260. Синюк О.М. Експериментальне дослідження процесу утворення спаїв та впливу орієнтації спаїв на експлуатаційні властивості полімерних виробів / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2005. – № 4. – Ч. 1. – Т. 2. – С. 245-248.

261. Синюк О. Розробка прес-форм для лиття полімерних виробів / О. Синюк // Технічно-економічне сприяння розвитку підприємництва: Зб. праць II міжнародної Польсько-Української наукової конференції (13-14 жовтня 2005 року). – Краків (Польща) : Краківська політехніка ім. Тадеуша Костюшки, 2005. – С. 287-296.

262. Патент на корисну модель № 10263, Україна, МПК В29 С 45/73. Ливарна форма для пластмас / Синюк О. М., Кулік Т. І., Злотенко Б. М. – № u200503001; заяв. 01.04.2005; опубл. 15.11.2005; Бюл. № 11. – 2 с.

263. Торнер Р. В. Оборудование заводов по переработке пластмасс / Р. В. Торнер, М. С. Акутин. – М.: Химия, 1986. – 400 с.

264. Скиба М.Є. Математичне моделювання впливу геометрії шнека та кінематичних параметрів його руху на переміщення гранульованого полімеру в процесі лиття під тиском / М.Є. Скиба, О.М. Синюк, А.Ю. Михайловський // Вісник Хмельницького національного університету, 2015. – №5 (229). – С. 38-45.

265. Синюк О.М. Вплив тертя на об'ємну продуктивність переміщення відходів полімерного матеріалу в шнековому конвеєрі / О.М. Синюк // Міжнародний науковий журнал “Проблеми трибології”, Хмельницький : ХНУ, 2016. – №2 (80). – С. 89-96.

266. Сагиров С. Н. Исследование и моделирование процесса движения полимера в одношнековом экструдере / С. Н. Сагиров // Фундаментальные исследования. Технические науки. – 2011. – № 12. – С. 179-183.

267. Скиба М.Є. Експериментальні дослідження впливу конструкції прес-форми взуттєвого виробництва на процес її заповнення полімерним матеріалом / М.Є. Скиба, Б.М. Злотенко, О.М. Синюк // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2002. – №3. – С. 9-12.

268. ГОСТ 422-75. Резина для низа обуви. Методы испытаний на многократный изгиб. Москва. Дата введения 1989-01-08.

269. ГОСТ 270-75. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. Москва. Дата введения 1997-01-01.

270. Зеленский Э. С. Армированные пластики – современные конструкционные материалы / Э.С. Зеленский А.М. Куперман, Ю.А. Горбаткина, В.Г. Иванова-Мумжиева, А.А. Берлин // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). – 2001. – Т. XLV. – № 2. – С. 56-74.

**ДОДАТОК А**  
**УСТАНОВКА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ**



**Рис. А.1. Установка для вимірювання тривалої міцності**

Таблиця А.1

Основні технічні характеристики вимірювального пристрою  
для дослідження в'язкопружного модуля полімерних матеріалів

| Технічна характеристика                                         | Технічні дані                  |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Діапазон вимірювальних навантажень, Н                           | 0...100                        |
| Гранична погрішність навантаження, що вимірюється, %            | $\pm 1$                        |
| Значення шкали індикатора деформації, мм                        | 50                             |
| Ціна поділки шкали індикатора деформації, мм                    | 0,01                           |
| Гранична похибка деформації, що вимірюється, поділка            | $\pm 1$                        |
| Переміщення нижнього захвата, мм                                | 50                             |
| Максимальна відстань між захватами, мм                          | 150                            |
| Гранична ширина зразків, мм                                     | 25                             |
| Діапазон вимірювальних температур, °С                           | 20...300                       |
| Ціна поділки шкали індикації температур, °С                     | 1                              |
| Гранична похибка відхилення від встановленої температури, °С    | $\pm 0,5$                      |
| Максимальне значення шкали датчика часу, год.                   | 1000                           |
| Погрішність виміру часу, с                                      | 0,1                            |
| Розміри установки (довжина $\times$ ширина $\times$ висота), мм | 855 $\times$ 470 $\times$ 1855 |

**ДОДАТОК Б**  
**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ**  
**ДОСЛІДЖЕНЬ ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОПРУЖНОГО МОДУЛЯ**  
**ПОЛІМЕРУ**

Таблиця Б.1

Матриця ротатбельного планування експерименту

| Номер<br>досліду | Матриця планування |         | Робоча матриця |                     |
|------------------|--------------------|---------|----------------|---------------------|
|                  | X1                 | X2      | $\lambda$      | $T, ^\circ\text{C}$ |
| 1.               | +                  | +       | 3,5            | 100                 |
| 2.               | –                  | +       | 1,5            | 100                 |
| 3.               | +                  | –       | 3,5            | 40                  |
| 4.               | –                  | –       | 1,5            | 40                  |
| 5.               | – 1,414            | 0       | 1              | 70                  |
| 6.               | + 1,414            | 0       | 4              | 70                  |
| 7.               | 0                  | – 1,414 | 2,5            | 28                  |
| 8.               | 0                  | + 1,414 | 2,5            | 112                 |
| 9.               | 0                  | 0       | 2,5            | 70                  |
| 10.              | 0                  | 0       | 2,5            | 70                  |
| 11.              | 0                  | 0       | 2,5            | 70                  |
| 12.              | 0                  | 0       | 2,5            | 70                  |
| 13.              | 0                  | 0       | 2,5            | 70                  |

Таблиця Б.2

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку дисперсій при розтягу поліпропіленових зразків поперек витяжки

| № п/п | Результати спостережень<br>(в'язкопружний модуль, МПа) |       |       |       | $\bar{y}$ | $s^2_{\text{пом}}$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|-------|--------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|       | $y_1$                                                  | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1     | 2                                                      | 3     | 4     | 5     | 6         | 7                  | 8                                | 9                          |
| 1     | 680                                                    | 679   | 676   | 677   | 678       | 1,83               | 10,00                            | 3,05                       |
| 2     | 978                                                    | 981   | 982   | 980   | 980       | 1,71               | 8,75                             | 6,15                       |
| 3     | 700                                                    | 702   | 699   | 703   | 701       | 1,83               | 10,00                            | 6,85                       |
| 4     | 1065                                                   | 1062  | 1066  | 1063  | 1064      | 1,82               | 10,00                            | 7,75                       |

Продовження таблиці Б.2

| 1        | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7     | 8     | 9     |
|----------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 5        | 1120 | 1124 | 1123 | 1121 | 1122 | 1,83  | 10,00 | 3,01  |
| 6        | 685  | 683  | 684  | 684  | 684  | 0,82  | 2,00  | 5,35  |
| 7        | 962  | 959  | 959  | 960  | 960  | 1,41  | 6,00  | 4,01  |
| 8        | 738  | 740  | 740  | 738  | 739  | 1,16  | 4,00  | 6,67  |
| 9        | 836  | 839  | 835  | 838  | 837  | 1,83  | 10,00 | 1,16  |
| 10       | 834  | 835  | 836  | 835  | 835  | 0,82  | 2,00  | 0,38  |
| 11       | 835  | 834  | 835  | 832  | 834  | 1,41  | 6,00  | 0,65  |
| 12       | 839  | 838  | 837  | 838  | 838  | 0,81  | 2,00  | 0,43  |
| 13       | 836  | 838  | 836  | 838  | 837  | 1,16  | 4,00  | 0,16  |
| $\Sigma$ |      |      |      |      |      | 18,44 | 84,75 | 45,62 |

Таблиця Б.3

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку дисперсій  
при розтягу при розтягу поліпропіленових зразків вздовж витяжки

| № п/п    | Результати спостережень<br>(в'язкопружний модуль, МПа) |       |       |       | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|----------|--------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|          | $y_1$                                                  | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1        | 1334                                                   | 1335  | 1336  | 1336  | 1335,25   | 0,96               | 2,75                             | 17,35                      |
| 2        | 987                                                    | 985   | 987   | 986   | 986,25    | 0,95               | 2,75                             | 10,46                      |
| 3        | 1569                                                   | 1567  | 1565  | 1566  | 1566,75   | 1,71               | 8,75                             | 0,75                       |
| 4        | 1135                                                   | 1129  | 1132  | 1133  | 1132,25   | 2,50               | 18,75                            | 3,70                       |
| 5        | 1045                                                   | 1039  | 1041  | 1042  | 1041,75   | 2,50               | 18,75                            | 14,21                      |
| 6        | 1870                                                   | 1865  | 1868  | 1869  | 1868,00   | 2,16               | 14,00                            | 19,91                      |
| 7        | 1282                                                   | 1278  | 1281  | 1280  | 1280,25   | 1,70               | 8,75                             | 5,70                       |
| 8        | 968                                                    | 964   | 966   | 962   | 965,00    | 2,58               | 20,00                            | 0,28                       |
| 9        | 1297                                                   | 1293  | 1298  | 1296  | 1296,00   | 2,16               | 14,00                            | 0,05                       |
| 10       | 1290                                                   | 1291  | 1286  | 1286  | 1288,25   | 2,63               | 20,75                            | 0,66                       |
| 11       | 1310                                                   | 1314  | 1308  | 1307  | 1309,75   | 3,10               | 28,75                            | 0,72                       |
| 12       | 1308                                                   | 1308  | 1304  | 1305  | 1306,25   | 2,06               | 12,75                            | 0,33                       |
| 13       | 1293                                                   | 1289  | 1293  | 1294  | 1292,25   | 2,22               | 14,75                            | 0,26                       |
| $\Sigma$ |                                                        |       |       |       |           | 27,23              | 185,5                            | 74,38                      |

Таблиця Б.4

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку дисперсій  
при розтягу поліетиленових зразків поперек витяжки

| № п/п    | Результати спостережень<br>(в'язкопружний модуль, МПа) |       |       |       | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|----------|--------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|          | $y_1$                                                  | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1        | 302                                                    | 303   | 302   | 303   | 302,5     | 0,58               | 1,00                             | 1,13                       |
| 2        | 464                                                    | 465   | 464   | 464   | 464,3     | 0,56               | 0,75                             | 0,83                       |
| 3        | 369                                                    | 370   | 369   | 369   | 369,3     | 0,50               | 0,75                             | 0,18                       |
| 4        | 710                                                    | 711   | 711   | 710   | 710,5     | 0,57               | 1,00                             | 1,44                       |
| 5        | 615                                                    | 616   | 616   | 617   | 616,0     | 0,82               | 2,00                             | 0,33                       |
| 6        | 334                                                    | 333   | 332   | 333   | 333,0     | 0,81               | 2,00                             | 1,25                       |
| 7        | 723                                                    | 722   | 722   | 722   | 722,3     | 0,50               | 0,75                             | 0,35                       |
| 8        | 372                                                    | 373   | 372   | 373   | 372,5     | 0,58               | 1,00                             | 0,26                       |
| 9        | 475                                                    | 473   | 475   | 476   | 474,8     | 1,26               | 0,75                             | 1,21                       |
| 10       | 449                                                    | 450   | 449   | 450   | 449,5     | 0,58               | 1,00                             | 1,18                       |
| 11       | 461                                                    | 462   | 463   | 462   | 462,0     | 0,82               | 2,00                             | 0,32                       |
| 12       | 497                                                    | 496   | 496   | 497   | 496,5     | 0,58               | 1,00                             | 1,26                       |
| 13       | 462                                                    | 463   | 462   | 461   | 462,0     | 0,82               | 2,00                             | 0,28                       |
| $\Sigma$ |                                                        |       |       |       |           | 8,98               | 16,0                             | 10,02                      |

Таблиця Б.5

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку дисперсій  
при розтягу поліетиленових зразків вздовж витяжки

| № п/п | Результати спостережень<br>(в'язкопружний модуль, МПа) |       |       |       | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|-------|--------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|       | $y_1$                                                  | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1     | 2                                                      | 3     | 4     | 5     | 6         | 7                  | 8                                | 9                          |
| 1     | 848                                                    | 849   | 850   | 849   | 849,0     | 0,81               | 2,00                             | 0,40                       |
| 2     | 761                                                    | 762   | 760   | 759   | 760,8     | 0,96               | 2,75                             | 1,75                       |
| 3     | 1050                                                   | 1051  | 1049  | 1050  | 1050,0    | 0,82               | 2,00                             | 6,06                       |
| 4     | 748                                                    | 744   | 747   | 745   | 746,0     | 1,83               | 10,00                            | 6,84                       |
| 5     | 726                                                    | 724   | 725   | 725   | 725,0     | 0,82               | 2,00                             | 0,51                       |
| 6     | 931                                                    | 932   | 930   | 931   | 931,3     | 0,96               | 2,75                             | 2,86                       |

Продовження таблиці Б.5

| 1        | 2   | 3   | 4   | 5   | 6     | 7     | 8     | 9     |
|----------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| 7        | 730 | 729 | 731 | 728 | 729,5 | 1,29  | 5,00  | 2,49  |
| 8        | 792 | 793 | 793 | 790 | 792,0 | 1,41  | 6,00  | 2,73  |
| 9        | 844 | 845 | 846 | 845 | 845,0 | 0,81  | 2,00  | 0,12  |
| 10       | 850 | 849 | 851 | 850 | 850,0 | 0,82  | 2,00  | 0,01  |
| 11       | 848 | 849 | 847 | 848 | 848,5 | 0,58  | 1,00  | 0,02  |
| 12       | 850 | 853 | 851 | 853 | 852,0 | 0,82  | 2,00  | 0,03  |
| 13       | 849 | 851 | 852 | 851 | 850,8 | 0,50  | 0,75  | 0,01  |
| $\Sigma$ |     |     |     |     |       | 12,43 | 40,25 | 23,83 |

Таблиця Б.6

Значення коефіцієнтів рівняння регресії

| Матеріал<br>Коефіцієнт | Зразок з поліпропілену |                       | Зразок з поліетилену |                       |
|------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
|                        | Вздовж<br>втягування   | Поперек<br>втягування | Вздовж<br>втягування | Поперек<br>втягування |
| $b_0$                  | 1298,81                | 836,41                | 849,44               | 469,07                |
| $b_1$                  | 243,98                 | -160,57               | 85,49                | -112,90               |
| $b_2$                  | -102,91                | -52,41                | -12,24               | -100,94               |
| $b_{12}$               | -21,38                 | 15,19                 | -53,94               | 44,88                 |
| $b_{11}$               | 68,49                  | 27,42                 | 2,87                 | -10,04                |
| $b_{22}$               | -97,59                 | 0,68                  | -30,81               | 26,39                 |



ДОДАТОК В  
УСТАНОВКА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МОДУЛЯ ЗСУВУ

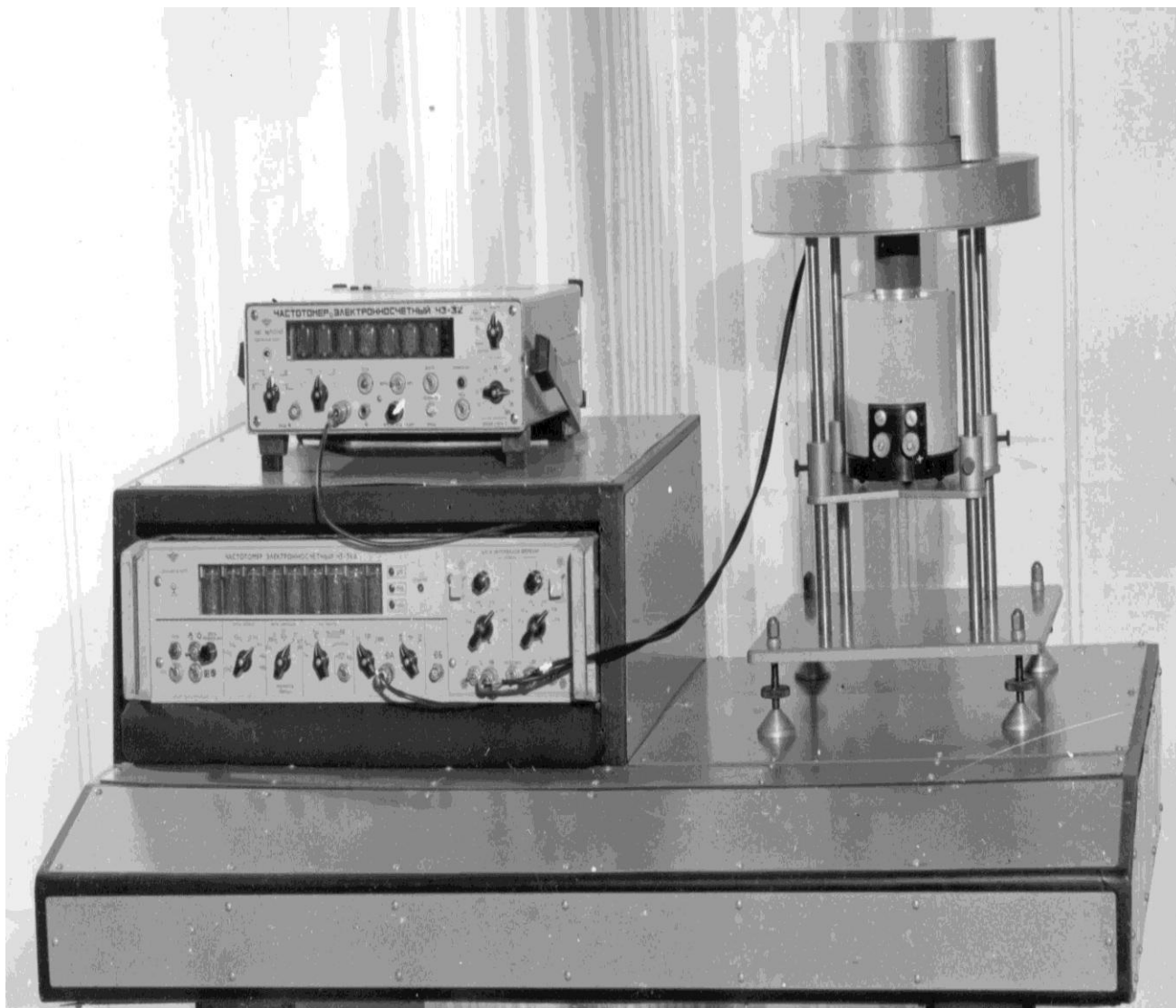


**Рис. В.1. Установка для вимірювання в'язкопружного модуля зсуву полімеру**

Таблиця В.1

Технічні характеристики дослідної установки для визначення  
періоду та декременту згасання вільних коливань

| Технічна характеристика                                      | Технічні дані |
|--------------------------------------------------------------|---------------|
| Вид коливань за деформацією                                  | крутильні     |
| Діапазон частот коливань, Гц                                 | 0,01...100    |
| Гранична похибка виміру періоду коливань, %                  | 0,25          |
| Гранична похибка виміру кількості коливань, %                | $\pm 1$       |
| Допустиме значення амплітуди деформації, м                   | 0,001         |
| Гранична похибка виміру амплітуди коливань, %                | 1             |
| Довжина зразка, мм                                           | 25...50       |
| Ширина зразка, мм                                            | 6             |
| Мінімальне значення розтягувального навантаження, Н          | 0,05          |
| Максимальне значення розтягувального навантаження, Н         | 10            |
| Діапазон температур, °C                                      | -40...200     |
| Ціна поділки шкали температур, °C                            | 1             |
| Гранична похибка відхилення від встановленої температури, °C | 0,5           |
| Габаритні розміри пристрою (довжина × ширина × висота), мм   | 1150×600×1050 |
| Вага пристрою, кг                                            | 55            |

**ДОДАТОК Г**  
**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ**  
**ДОСЛІДЖЕНЬ ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОПРУЖНОГО**  
**МОДУЛЯ ПОЛІМЕРУ ПРИ ЗСУВІ**

Таблиця Г.1

Матриця ротатбельного планування експерименту

| Номер<br>дослідку | Матриця планування |         | Робоча матриця |                     |
|-------------------|--------------------|---------|----------------|---------------------|
|                   | X1                 | X2      | $\lambda$      | $T, ^\circ\text{C}$ |
| 1.                | +                  | +       | 3,5            | 100                 |
| 2.                | –                  | +       | 1,5            | 100                 |
| 3.                | +                  | –       | 3,5            | 40                  |
| 4.                | –                  | –       | 1,5            | 40                  |
| 5.                | – 1,414            | 0       | 1              | 70                  |
| 6.                | + 1,414            | 0       | 4              | 70                  |
| 7.                | 0                  | – 1,414 | 2,5            | 28                  |
| 8.                | 0                  | + 1,414 | 2,5            | 112                 |
| 9.                | 0                  | 0       | 2,5            | 70                  |
| 10.               | 0                  | 0       | 2,5            | 70                  |
| 11.               | 0                  | 0       | 2,5            | 70                  |
| 12.               | 0                  | 0       | 2,5            | 70                  |
| 13.               | 0                  | 0       | 2,5            | 70                  |

Таблиця Г.2

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку  
дисперсій при поперечному зсуві поліпропіленових зразків

| № п/п | Результати спостережень<br>(в'язкопружний модуль, МПа) |        |        |        | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|-------|--------------------------------------------------------|--------|--------|--------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|       | $y_1$                                                  | $y_2$  | $y_3$  | $y_4$  |           |                    |                                  |                            |
| 1     | 2                                                      | 3      | 4      | 5      | 6         | 7                  | 8                                | 9                          |
| 1     | 227,20                                                 | 227,58 | 229,04 | 228,62 | 228,11    | 0,86               | 2,23                             | 1,02                       |
| 2     | 827,47                                                 | 828,85 | 834,17 | 832,64 | 832,03    | 1,25               | 2,19                             | 0,32                       |
| 3     | 361,12                                                 | 361,73 | 364,05 | 363,38 | 362,57    | 0,54               | 0,86                             | 3,49                       |

Продовження таблиці Г.2

| 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7    | 8     | 9     |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|------|-------|-------|
| 4        | 1423,44 | 1425,83 | 1434,97 | 1432,34 | 1429,15 | 0,58 | 1,02  | 0,83  |
| 5        | 1247,83 | 1249,91 | 1257,93 | 1255,62 | 1252,82 | 0,37 | 0,41  | 3,44  |
| 6        | 291,31  | 291,80  | 293,67  | 293,13  | 292,48  | 0,57 | 0,98  | 7,96  |
| 7        | 1622,05 | 1624,76 | 1635,18 | 1632,19 | 1628,55 | 0,72 | 1,54  | 1,43  |
| 8        | 437,61  | 438,34  | 441,15  | 440,34  | 439,36  | 0,59 | 1,03  | 2,36  |
| 9        | 952,42  | 954,01  | 960,14  | 958,37  | 956,24  | 0,40 | 0,48  | 3,40  |
| 10       | 521,36  | 522,24  | 525,59  | 524,62  | 523,45  | 0,57 | 0,95  | 6,97  |
| 11       | 613,46  | 614,49  | 618,43  | 617,30  | 615,92  | 0,48 | 0,69  | 3,01  |
| 12       | 1091,76 | 1093,58 | 1100,60 | 1098,58 | 1096,13 | 0,82 | 2,02  | 8,24  |
| 13       | 715,05  | 716,25  | 720,84  | 719,52  | 717,92  | 0,31 | 0,29  | 4,74  |
| $\Sigma$ |         |         |         |         |         | 8,06 | 14,69 | 47,21 |

Таблиця Г.3

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку  
дисперсій при поздовжньому зсуві поліпропіленових зразків

| № п/п    | Результати спостережень<br>(в'язкопружний модуль, МПа) |         |         |         | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|----------|--------------------------------------------------------|---------|---------|---------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|          | $y_1$                                                  | $y_2$   | $y_3$   | $y_4$   |           |                    |                                  |                            |
| 1        | 621,52                                                 | 619,12  | 618,64  | 620,81  | 620,02    | 1,37               | 5,59                             | 1,70                       |
| 2        | 947,30                                                 | 943,64  | 942,91  | 946,22  | 945,02    | 2,08               | 12,99                            | 0,71                       |
| 3        | 711,73                                                 | 708,98  | 708,43  | 710,92  | 710,01    | 1,56               | 7,34                             | 13,97                      |
| 4        | 1501,65                                                | 1495,85 | 1494,69 | 1499,93 | 1498,03   | 3,30               | 32,61                            | 11,57                      |
| 5        | 1389,37                                                | 1384,01 | 1382,94 | 1387,79 | 1386,03   | 3,05               | 27,90                            | 5,22                       |
| 6        | 688,90                                                 | 686,24  | 685,71  | 688,12  | 687,24    | 1,51               | 6,87                             | 8,60                       |
| 7        | 1659,03                                                | 1652,62 | 1651,34 | 1657,13 | 1655,03   | 3,64               | 39,85                            | 15,60                      |
| 8        | 750,82                                                 | 747,92  | 747,34  | 749,96  | 749,01    | 1,65               | 8,15                             | 1,77                       |
| 9        | 1215,95                                                | 1211,26 | 1210,32 | 1214,56 | 1213,02   | 2,67               | 21,34                            | 17,92                      |
| 10       | 754,83                                                 | 751,92  | 751,34  | 753,97  | 753,01    | 1,65               | 8,21                             | 17,47                      |
| 11       | 863,095                                                | 859,76  | 859,10  | 862,11  | 861,02    | 1,90               | 10,78                            | 9,16                       |
| 12       | 1202,92                                                | 1198,28 | 1197,35 | 1201,55 | 1200,02   | 2,64               | 20,91                            | 16,92                      |
| 13       | 874,122                                                | 870,75  | 870,72  | 873,12  | 872,18    | 1,72               | 8,84                             | 8,32                       |
| $\Sigma$ |                                                        |         |         |         |           | 28,74              | 211,38                           | 128,93                     |

Таблиця Г.4

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку дисперсій при поперечному зсуві поліетиленових зразків

| № п/п    | Результати спостережень<br>(в'язкопружний модуль, МПа) |        |        |        | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|----------|--------------------------------------------------------|--------|--------|--------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|          | $y_1$                                                  | $y_2$  | $y_3$  | $y_4$  |           |                    |                                  |                            |
| 1        | 132,27                                                 | 131,76 | 132,89 | 133,16 | 132,52    | 0,63               | 1,19                             | 0,78                       |
| 2        | 423,36                                                 | 421,73 | 425,35 | 426,21 | 424,16    | 2,01               | 12,16                            | 2,92                       |
| 3        | 200,73                                                 | 199,96 | 201,67 | 202,08 | 201,11    | 0,95               | 2,72                             | 3,09                       |
| 4        | 689,84                                                 | 687,18 | 693,07 | 694,48 | 691,14    | 3,28               | 32,25                            | 7,79                       |
| 5        | 612,74                                                 | 610,38 | 615,62 | 616,87 | 613,90    | 2,92               | 25,52                            | 1,82                       |
| 6        | 165,44                                                 | 164,80 | 166,21 | 166,55 | 165,75    | 0,79               | 1,85                             | 7,03                       |
| 7        | 775,89                                                 | 772,90 | 779,52 | 781,11 | 779,11    | 0,68               | 1,38                             | 2,34                       |
| 8        | 238,62                                                 | 237,70 | 239,74 | 240,23 | 238,66    | 0,69               | 1,42                             | 3,11                       |
| 9        | 480,49                                                 | 478,64 | 482,74 | 483,72 | 479,86    | 0,96               | 2,75                             | 8,21                       |
| 10       | 279,36                                                 | 278,28 | 280,67 | 281,24 | 279,29    | 0,78               | 1,80                             | 0,51                       |
| 11       | 323,40                                                 | 322,16 | 324,92 | 325,58 | 323,40    | 0,58               | 1,04                             | 7,53                       |
| 12       | 543,32                                                 | 541,22 | 545,86 | 546,97 | 542,68    | 0,59               | 1,04                             | 7,57                       |
| 13       | 371,23                                                 | 369,80 | 372,97 | 373,73 | 370,98    | 0,86               | 2,20                             | 1,11                       |
| $\Sigma$ |                                                        |        |        |        |           | 15,72              | 87,32                            | 53,81                      |

Таблиця Г.5

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку дисперсій при поздовжньому зсуві поліетиленових зразків

| № п/п | Результати спостережень<br>(в'язкопружний модуль, МПа) |        |        |        | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|-------|--------------------------------------------------------|--------|--------|--------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|       | $y_1$                                                  | $y_2$  | $y_3$  | $y_4$  |           |                    |                                  |                            |
| 1     | 2                                                      | 3      | 4      | 5      | 6         | 7                  | 8                                | 9                          |
| 1     | 325,36                                                 | 326,34 | 324,62 | 327,49 | 325,36    | 0,72               | 1,55                             | 0,75                       |
| 2     | 475,44                                                 | 476,87 | 474,36 | 478,55 | 476,22    | 0,96               | 2,75                             | 0,34                       |
| 3     | 367,57                                                 | 368,68 | 366,73 | 369,97 | 368,06    | 0,79               | 1,84                             | 2,14                       |
| 4     | 719,73                                                 | 721,90 | 718,09 | 724,44 | 720,71    | 0,75               | 1,69                             | 1,92                       |
| 5     | 671,11                                                 | 673,13 | 669,59 | 675,51 | 671,96    | 1,08               | 3,51                             | 2,32                       |
| 6     | 356,94                                                 | 358,02 | 356,13 | 359,28 | 357,19    | 0,80               | 1,90                             | 1,51                       |

Продовження таблиці Г.5

| 1        | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7    | 8     | 9     |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|------|-------|-------|
| 7        | 787,28 | 789,65 | 785,49 | 792,43 | 788,68 | 1,17 | 4,10  | 2,05  |
| 8        | 385,69 | 386,85 | 384,81 | 388,22 | 386,03 | 0,90 | 2,44  | 0,73  |
| 9        | 595,23 | 597,02 | 593,87 | 599,12 | 596,24 | 0,81 | 1,95  | 2,10  |
| 10       | 387,54 | 388,71 | 386,66 | 390,08 | 387,49 | 0,83 | 2,09  | 3,98  |
| 11       | 437,23 | 438,55 | 436,24 | 440,09 | 437,90 | 1,00 | 3,02  | 0,15  |
| 12       | 589,48 | 591,26 | 588,14 | 593,34 | 589,93 | 1,03 | 3,18  | 2,35  |
| 13       | 442,25 | 443,59 | 441,25 | 445,15 | 442,74 | 0,76 | 1,71  | 0,24  |
| $\Sigma$ |        |        |        |        |        | 11,6 | 31,73 | 20,58 |

Таблиця Г.6

Значення коефіцієнтів рівняння регресії

| Матеріал<br>Коефіцієнт | Зразок з поліпропілену |                        | Зразок з поліетилену  |                        |
|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
|                        | Вздовж<br>витягування  | Поперек<br>витягування | Вздовж<br>витягування | Поперек<br>витягування |
| $b_0$                  | 980,12                 | 779,54                 | 490,99                | 399,34                 |
| $b_1$                  | -262,64                | -377,43                | -118,57               | -176,92                |
| $b_2$                  | -240,51                | -300,05                | -107,07               | -137,47                |
| $b_{12}$               | 115,76                 | 114,29                 | 50,45                 | 49,60                  |
| $b_{11}$               | -16,66                 | -52,55                 | -8,25                 | -26,89                 |
| $b_{22}$               | 66,02                  | 77,62                  | 28,13                 | 32,62                  |

ДОДАТОК Д  
**УСТАНОВКА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МІЦНОСТІ НА РОЗРИВ**



**Рис. Д.1. Установка для вимірювання міцності на розрив**

Таблиця Д.1

Технічні характеристики пристрою для дослідження на розтяг  
полімерних матеріалів

| Технічна характеристика                                   | Технічні дані |
|-----------------------------------------------------------|---------------|
| Граничне навантаження, Н                                  | 500           |
| Гранична похибка вимірювання навантажень, %               | 1             |
| Максимальне значення шкали для вимірювання деформації, мм | 300           |
| Ціна поділки шкали для вимірювання деформації, мм         | 0,01          |
| Похибка фіксації зусиль, %                                | 1             |
| Гранична похибка переміщення активного захвату, %         | 0,5           |
| Діапазон швидкостей активного захвату, мм/хв              | 10...200      |
| Максимальна відстань між захватами, мм                    | 250           |
| Максимальна ширина зразків для випробування, мм           | 25            |
| Діапазон температур, °С                                   | 20...200      |
| Ціна поділки шкали температур, °С                         | 1             |
| Гранична похибка відхилення від заданої температури, °С   | 1             |
| Габаритні розміри пристрою (Д × Ш × В), мм                | 1100×850×1970 |
| Вага пристрою, кг                                         | 85            |

Таблиця Д.2

Рівні та інтервали зміни факторів

| Позн.                                      | Фактори         | Рівні варіювання |     |     |     |         | Інтервал<br>варіювання |
|--------------------------------------------|-----------------|------------------|-----|-----|-----|---------|------------------------|
|                                            |                 | – 1,414          | – 1 | 0   | + 1 | + 1,414 |                        |
| Для зразків з поліпропілену та поліетилену |                 |                  |     |     |     |         |                        |
| X1                                         | Деформація      | 0                | 0,5 | 1,5 | 2,5 | 3       | 1                      |
| X2                                         | Температура, °С | 28               | 40  | 70  | 100 | 112     | 30                     |
| Для зразків з полівінілхлориду             |                 |                  |     |     |     |         |                        |
| X1                                         | Деформація      | 0                | 0,2 | 0,6 | 1,0 | 1,2     | 0,4                    |
| X2                                         | Температура, °С | 80               | 90  | 110 | 130 | 140     | 20                     |



**ДОДАТОК Е**  
**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ**  
**ДОСЛІДЖЕНЬ ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ЗРАЗКІВ**

Таблиця Е.1

Матриця ротатбельного планування експерименту

| Номер досліджу | Матриця планування |         | Робоча матриця |       |
|----------------|--------------------|---------|----------------|-------|
|                | X1                 | X2      | $\lambda$      | T, °C |
| 1.             | +                  | +       | 3,5            | 100   |
| 2.             | –                  | +       | 1,5            | 100   |
| 3.             | +                  | –       | 3,5            | 40    |
| 4.             | –                  | –       | 1,5            | 40    |
| 5.             | – 1,414            | 0       | 1              | 70    |
| 6.             | + 1,414            | 0       | 4              | 70    |
| 7.             | 0                  | – 1,414 | 2,5            | 28    |
| 8.             | 0                  | + 1,414 | 2,5            | 112   |
| 9.             | 0                  | 0       | 2,5            | 70    |
| 10.            | 0                  | 0       | 2,5            | 70    |
| 11.            | 0                  | 0       | 2,5            | 70    |
| 12.            | 0                  | 0       | 2,5            | 70    |
| 13.            | 0                  | 0       | 2,5            | 70    |

Таблиця Е.2

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку дисперсій при  
 випробуванні поліпропіленових зразків

| № п/п | Результати спостережень<br>(міцність, МПа) |                |                |                | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|-------|--------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|       | y <sub>1</sub>                             | y <sub>2</sub> | y <sub>3</sub> | y <sub>4</sub> |           |                    |                                  |                            |
| 1     | 2                                          | 3              | 4              | 5              | 6         | 7                  | 8                                | 9                          |
| 1     | 12                                         | 13             | 13             | 11             | 12,5      | 0,92               | 2,75                             | 0,49                       |
| 2     | 18                                         | 19             | 18             | 17             | 18,0      | 0,67               | 2,00                             | 0,44                       |
| 3     | 13                                         | 14             | 14             | 15             | 14,0      | 0,67               | 2,00                             | 0,35                       |
| 4     | 26                                         | 29             | 29             | 26             | 27,5      | 1,73               | 1,00                             | 0,46                       |
| 5     | 23                                         | 24             | 25             | 23             | 24,0      | 0,92               | 2,75                             | 0,04                       |

Продовження таблиця Е.2

| 1        | 2  | 3  | 4  | 5  | 6    | 7     | 8     | 9    |
|----------|----|----|----|----|------|-------|-------|------|
| 6        | 11 | 12 | 11 | 13 | 12,0 | 0,92  | 2,75  | 0,61 |
| 7        | 27 | 28 | 29 | 28 | 28,0 | 0,67  | 2,00  | 1,00 |
| 8        | 14 | 14 | 15 | 15 | 14,5 | 0,33  | 1,00  | 0,06 |
| 9        | 18 | 19 | 19 | 18 | 18,5 | 0,33  | 1,00  | 0,05 |
| 10       | 19 | 16 | 16 | 18 | 17,5 | 1,52  | 1,00  | 1,14 |
| 11       | 18 | 19 | 17 | 18 | 18,0 | 0,67  | 2,00  | 0,02 |
| 12       | 18 | 20 | 19 | 19 | 19,0 | 0,67  | 2,00  | 1,64 |
| 13       | 19 | 18 | 17 | 18 | 18,0 | 0,67  | 2,00  | 0,01 |
| $\Sigma$ |    |    |    |    |      | 10,69 | 24,25 | 6,31 |

Таблиця Е.3

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку дисперсій при  
випробуванні поліетиленових зразків

| № п/п    | Результати спостережень<br>(міцність, МПа) |       |       |       | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|----------|--------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|          | $y_1$                                      | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1        | 8                                          | 9     | 9     | 8     | 8,50      | 0,58               | 1,0                              | 0,03                       |
| 2        | 13                                         | 15    | 14    | 14    | 14,00     | 0,82               | 2,0                              | 0,20                       |
| 3        | 10                                         | 13    | 10    | 11    | 10,75     | 1,41               | 6,0                              | 1,99                       |
| 4        | 18                                         | 19    | 19    | 20    | 19,00     | 0,82               | 2,0                              | 1,25                       |
| 5        | 17                                         | 17    | 18    | 18    | 17,50     | 0,58               | 1,0                              | 0,11                       |
| 6        | 9                                          | 8     | 9     | 9     | 8,75      | 0,50               | 0,75                             | 0,52                       |
| 7        | 20                                         | 19    | 20    | 21    | 20,00     | 0,82               | 2,0                              | 2,65                       |
| 8        | 10                                         | 11    | 10    | 10    | 10,25     | 0,50               | 0,75                             | 0,36                       |
| 9        | 13                                         | 12    | 13    | 13    | 12,75     | 0,50               | 0,75                             | 0,04                       |
| 10       | 12                                         | 11    | 12    | 13    | 12,00     | 0,83               | 2,0                              | 0,90                       |
| 11       | 13                                         | 12    | 12    | 13    | 12,50     | 0,57               | 1,0                              | 0,20                       |
| 12       | 14                                         | 15    | 14    | 13    | 14,00     | 0,82               | 2,0                              | 1,10                       |
| 13       | 13                                         | 14    | 13    | 14    | 13,50     | 0,58               | 1,0                              | 0,30                       |
| $\Sigma$ |                                            |       |       |       |           | 9,33               | 22,25                            | 9,65                       |

Таблиця Е.4

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку дисперсій при випробуванні зразків з полівінілхлориду

| № п/п    | Результати спостережень<br>(міцність, МПа) |       |       |       | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|----------|--------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|          | $y_1$                                      | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1        | 4,7                                        | 5     | 4,7   | 4,8   | 4,8       | 0,14               | 0,06                             | 0,01                       |
| 2        | 5,2                                        | 5,2   | 5,3   | 5,1   | 5,2       | 0,08               | 0,02                             | 0,05                       |
| 3        | 5,7                                        | 5,5   | 5,8   | 5,4   | 5,6       | 0,18               | 0,1                              | 0,02                       |
| 4        | 5,9                                        | 6,1   | 5,8   | 5,8   | 5,9       | 0,14               | 0,06                             | 0,01                       |
| 5        | 5,9                                        | 5,7   | 5,8   | 5,8   | 5,8       | 0,08               | 0,02                             | 0,06                       |
| 6        | 4,8                                        | 4,6   | 4,7   | 4,7   | 4,7       | 0,08               | 0,02                             | 0,01                       |
| 7        | 6,1                                        | 6,3   | 6,2   | 6,2   | 6,2       | 0,08               | 0,02                             | 0,01                       |
| 8        | 5,3                                        | 5,5   | 5,4   | 5,4   | 5,4       | 0,08               | 0,02                             | 0,03                       |
| 9        | 5,7                                        | 5,6   | 5,7   | 5,4   | 5,6       | 0,14               | 0,06                             | 0,01                       |
| 10       | 5,7                                        | 5,8   | 5,6   | 5,7   | 5,7       | 0,08               | 0,02                             | 0,02                       |
| 11       | 5,7                                        | 5,7   | 5,6   | 5,8   | 5,7       | 0,08               | 0,02                             | 0,01                       |
| 12       | 5,7                                        | 5,6   | 5,6   | 5,5   | 5,6       | 0,08               | 0,02                             | 0,01                       |
| 13       | 5,5                                        | 5,6   | 5,7   | 5,6   | 5,6       | 0,08               | 0,02                             | 0,02                       |
| $\Sigma$ |                                            |       |       |       |           | 1,32               | 0,46                             | 0,27                       |

Таблиця Е.5

Значення коефіцієнтів рівняння регресії

| Матеріал<br>Коефіцієнт | Зразок з<br>поліпропілену | Зразок з<br>поліетилену | Зразок з<br>полівінілхлориду |
|------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|
| $b_0$                  | 18,16                     | 12,95                   | 5,64                         |
| $b_1$                  | -4,53                     | -3,23                   | -0,28                        |
| $b_2$                  | -3,79                     | -2,66                   | -0,33                        |
| $b_{12}$               | 1,94                      | 0,63                    | -0,03                        |
| $b_{11}$               | -0,62                     | -0,18                   | -0,24                        |
| $b_{22}$               | 1,14                      | 0,83                    | 0,04                         |

**ДОДАТОК Ж**  
**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ**  
**ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЦНОСТІ ЗРАЗКІВ ВІД ШВИДКОСТІ**  
**ДЕФОРМАЦІЇ**

Таблиця Ж.1

Матриця планування експерименту

| Номер досліджу | Швидкість деформації, см/с |           | Температура зразка з полівінілхлориду |    |    |
|----------------|----------------------------|-----------|---------------------------------------|----|----|
|                | $\nu$                      | $\lg \nu$ | $T, ^\circ\text{C}$                   |    |    |
| 1.             | $10^{-4}$                  | -4,0      | 20                                    | 50 | 80 |
| 2.             | $3 \cdot 10^{-4}$          | -3,5      | 20                                    | 50 | 80 |
| 3.             | $10^{-3}$                  | -3,0      | 20                                    | 50 | 80 |
| 4.             | $3 \cdot 10^{-3}$          | -2,5      | 20                                    | 50 | 80 |
| 5.             | $10^{-2}$                  | -2,0      | 20                                    | 50 | 80 |
| 6.             | $3 \cdot 10^{-2}$          | -1,5      | 20                                    | 50 | 80 |
| 7.             | $10^{-1}$                  | -1,0      | 20                                    | 50 | 80 |
| 8.             | $3 \cdot 10^{-1}$          | -0,5      | 20                                    | 50 | 80 |

Таблиця Ж.2

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку дисперсій при випробуванні зразків з полівінілхлориду

| № п/п                  | Результати спостережень ( $\lg \sigma$ ) |       |       |       | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|------------------------|------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|                        | $y_1$                                    | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1                      | 2                                        | 3     | 4     | 5     | 6         | 7                  | 8                                | 9                          |
| $T = 20^\circ\text{C}$ |                                          |       |       |       |           |                    |                                  |                            |
| 1                      | 0,50                                     | 0,45  | 0,50  | 0,45  | 0,47      | 0,20               | 0,01                             | 0,008                      |
| 2                      | 0,62                                     | 0,54  | 0,58  | 0,63  | 0,59      | 0,11               | 0,01                             | 0,007                      |
| 3                      | 0,78                                     | 0,84  | 0,77  | 0,69  | 0,77      | 0,03               | 0,02                             | 0,004                      |
| 4                      | 0,90                                     | 0,86  | 0,82  | 0,91  | 0,87      | 0,02               | 0,08                             | 0,001                      |
| 5                      | 1,02                                     | 1,08  | 1,05  | 0,99  | 1,03      | 0,01               | 0,01                             | 0,015                      |
| 6                      | 1,18                                     | 1,16  | 1,12  | 1,22  | 1,17      | 0,06               | 0,04                             | 0,031                      |
| 7                      | 1,20                                     | 1,22  | 1,27  | 1,25  | 1,24      | 0,09               | 0,01                             | 0,001                      |
| 8                      | 1,25                                     | 1,27  | 1,30  | 1,29  | 1,28      | 0,12               | 0,08                             | 0,043                      |
| $\Sigma$               |                                          |       |       |       |           | 0,65               | 0,26                             | 0,110                      |

Продовження табл. Ж.2

| 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7    | 8    | 9     |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| T = 50°C |       |       |       |       |       |      |      |       |
| 1        | -0,03 | -0,04 | 0,00  | 0,02  | -0,01 | 0,27 | 0,04 | 0,062 |
| 2        | 0,06  | 0,08  | 0,12  | 0,10  | 0,09  | 0,17 | 0,02 | 0,012 |
| 3        | 0,25  | 0,30  | 0,35  | 0,29  | 0,30  | 0,04 | 0,02 | 0,049 |
| 4        | 0,41  | 0,44  | 0,46  | 0,45  | 0,44  | 0,00 | 0,03 | 0,036 |
| 5        | 0,60  | 0,58  | 0,62  | 0,64  | 0,61  | 0,01 | 0,01 | 0,039 |
| 6        | 0,70  | 0,75  | 0,72  | 0,78  | 0,74  | 0,05 | 0,04 | 0,015 |
| 7        | 0,92  | 0,88  | 0,91  | 0,94  | 0,91  | 0,16 | 0,01 | 0,021 |
| 8        | 0,96  | 0,98  | 1,00  | 1,02  | 0,99  | 0,23 | 0,01 | 0,005 |
| $\Sigma$ |       |       |       |       |       | 0,93 | 0,18 | 0,239 |
| T = 80°C |       |       |       |       |       |      |      |       |
| 1        | -0,18 | -0,20 | -0,15 | -0,12 | -0,16 | 0,06 | 0,02 | 0,001 |
| 2        | -0,08 | -0,12 | -0,10 | -0,06 | -0,09 | 0,03 | 0,01 | 0,001 |
| 3        | 0,02  | -0,02 | 0,00  | -0,04 | -0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,001 |
| 4        | 0,05  | -0,01 | 0,02  | 0,04  | 0,03  | 0,02 | 0,02 | 0,005 |
| 5        | 0,10  | 0,08  | 0,12  | 0,14  | 0,11  | 0,05 | 0,01 | 0,003 |
| 6        | 0,20  | 0,23  | 0,17  | 0,21  | 0,20  | 0,01 | 0,03 | 0,002 |
| 7        | 0,28  | 0,30  | 0,27  | 0,33  | 0,30  | 0,04 | 0,01 | 0,002 |
| 8        | 0,38  | 0,35  | 0,36  | 0,33  | 0,36  | 0,07 | 0,01 | 0,001 |
| $\Sigma$ |       |       |       |       |       | 0,29 | 0,12 | 0,016 |

Таблиця Ж.3

Значення коефіцієнтів рівняння регресії

| Температура<br>Коефіцієнт | 20°C   | 50°C   | 80°C  |
|---------------------------|--------|--------|-------|
| $b_0$                     | 1,478  | 1,183  | 0,434 |
| $b_1$                     | 0,243  | 0,321  | 0,152 |
| $b_2$                     | -0,003 | -0,004 | 0,008 |

ДОДАТОК И  
УСТАНОВКА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МІЦНОСТІ НА РОЗТЯГ ТА ЗРІЗ



**Рис. И.1. Установка для випробування на розтяг (стиск) 2167 Р-50**



**Рис. И.2. Ніж для вирізання полімерного матеріалу**

Технічні характеристики пристрою 2167 Р-50

| Технічна характеристика                                  | Технічні дані |
|----------------------------------------------------------|---------------|
| Граничне навантаження, кН                                | 50            |
| Гранична похибка вимірювання навантажень, %              | 2             |
| Діапазон переміщення активного захвату, мм               | 0...700       |
| Ціна поділки шкали для вимірювання деформації, мм        | 0,01          |
| Похибка фіксації зусиль, %                               | 1             |
| Гранична похибка переміщення активного захвату, %        | 3             |
| Діапазон швидкостей переміщення активного захвату, мм/хв | 0,5...500     |
| Максимальна відстань між захватами, мм                   | 700           |
| Максимальна ширина зразків для випробування, мм          | 40            |
| Габаритні розміри пристрою (Д × Ш × В), мм               | 830×850×2200  |
| Габаритні розміри пульта (Д × Ш × В), мм                 | 600×735×1620  |
| Вага пристрою, кг                                        | 370           |
| Вага пульта, кг                                          | 280           |

**ДОДАТОК К**  
**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ**  
**ДОСЛІДЖЕНЬ ГРАНИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ЗРАЗКІВ В ПОПЕРЕЧНОМУ**  
**ДО СТРУКТУРИ НАПРЯМКУ**

Таблиця К.1

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку  
дисперсій при випробуванні зразків з поліетилену на розтяг

| № п/п                                                                | Результати спостережень ( $\varepsilon_1$ ) |       |       |       | $\bar{y}$ | $s^2_{\text{пом}}$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|                                                                      | $y_1$                                       | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| Швидкість руйнівної деформації розтягу $v_2 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м/с |                                             |       |       |       |           |                    |                                  |                            |
| 1                                                                    | 1,48                                        | 1,46  | 1,44  | 1,48  | 1,47      | 0,072              | 0,001                            | 0,0026                     |
| 2                                                                    | 1,52                                        | 1,53  | 1,56  | 1,55  | 1,54      | 0,038              | 0,001                            | 0,0029                     |
| 3                                                                    | 1,58                                        | 1,56  | 1,54  | 1,59  | 1,57      | 0,028              | 0,002                            | 0,0006                     |
| 4                                                                    | 1,65                                        | 1,68  | 1,64  | 1,66  | 1,66      | 0,006              | 0,001                            | 0,0007                     |
| 5                                                                    | 1,75                                        | 1,74  | 1,72  | 1,73  | 1,74      | 0,001              | 0,001                            | 0,0002                     |
| 6                                                                    | 1,8                                         | 1,79  | 1,81  | 1,82  | 1,81      | 0,005              | 0,001                            | 0,0128                     |
| 7                                                                    | 2                                           | 1,98  | 1,96  | 2,02  | 1,99      | 0,066              | 0,002                            | 0,0034                     |
| 8                                                                    | 2,1                                         | 2,14  | 2,09  | 2,12  | 2,11      | 0,143              | 0,002                            | 0,0001                     |
| $\Sigma$                                                             |                                             |       |       |       |           | 0,359              | 0,011                            | 0,0233                     |
| Швидкість руйнівної деформації розтягу $v_2 = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м/с |                                             |       |       |       |           |                    |                                  |                            |
| 1                                                                    | 1,44                                        | 1,46  | 1,42  | 1,4   | 1,43      | 0,036              | 0,002                            | 0,0058                     |
| 2                                                                    | 1,49                                        | 1,52  | 1,48  | 1,52  | 1,50      | 0,014              | 0,001                            | 0,0044                     |
| 3                                                                    | 1,54                                        | 1,52  | 1,55  | 1,53  | 1,54      | 0,007              | 0,001                            | 0,0037                     |
| 4                                                                    | 1,58                                        | 1,57  | 1,55  | 1,60  | 1,58      | 0,002              | 0,001                            | 0,0016                     |
| 5                                                                    | 1,60                                        | 1,59  | 1,58  | 1,61  | 1,60      | 0,001              | 0,001                            | 0,0052                     |
| 6                                                                    | 1,65                                        | 1,64  | 1,67  | 1,62  | 1,65      | 0,001              | 0,001                            | 0,0184                     |
| 7                                                                    | 1,78                                        | 1,82  | 1,78  | 1,77  | 1,79      | 0,028              | 0,002                            | 0,0007                     |
| 8                                                                    | 1,90                                        | 1,87  | 1,89  | 1,91  | 1,89      | 0,074              | 0,001                            | 0,0022                     |
| $\Sigma$                                                             |                                             |       |       |       |           | 0,163              | 0,010                            | 0,0420                     |



Таблиця К.2

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку дисперсій при випробуванні зразків з поліпропілену на зріз

| № п/п                                                              | Результати спостережень ( $\varepsilon_{12}$ ) |       |       |       | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|                                                                    | $y_1$                                          | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| Швидкість руйнівної деформації зрізу $v_2 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м/с |                                                |       |       |       |           |                    |                                  |                            |
| 1                                                                  | 0,45                                           | 0,48  | 0,46  | 0,42  | 0,45      | 0,046              | 0,002                            | 0,0019                     |
| 2                                                                  | 0,49                                           | 0,50  | 0,48  | 0,46  | 0,48      | 0,034              | 0,001                            | 0,0001                     |
| 3                                                                  | 0,49                                           | 0,54  | 0,53  | 0,52  | 0,52      | 0,021              | 0,001                            | 0,0022                     |
| 4                                                                  | 0,60                                           | 0,56  | 0,57  | 0,59  | 0,58      | 0,008              | 0,001                            | 0,0038                     |
| 5                                                                  | 0,71                                           | 0,68  | 0,65  | 0,69  | 0,68      | 0,001              | 0,002                            | 0,0002                     |
| 6                                                                  | 0,82                                           | 0,78  | 0,77  | 0,78  | 0,79      | 0,015              | 0,002                            | 0,0048                     |
| 7                                                                  | 0,90                                           | 0,89  | 0,86  | 0,88  | 0,88      | 0,047              | 0,001                            | 0,0044                     |
| 8                                                                  | 0,96                                           | 0,93  | 0,92  | 0,95  | 0,94      | 0,075              | 0,001                            | 0,0050                     |
| $\Sigma$                                                           |                                                |       |       |       |           | 0,247              | 0,011                            | 0,0224                     |
| Швидкість руйнівної деформації зрізу $v_2 = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м/с |                                                |       |       |       |           |                    |                                  |                            |
| 1                                                                  | 0,25                                           | 0,19  | 0,23  | 0,23  | 0,23      | 0,056              | 0,002                            | 0,0001                     |
| 2                                                                  | 0,28                                           | 0,26  | 0,30  | 0,27  | 0,28      | 0,034              | 0,001                            | 0,0008                     |
| 3                                                                  | 0,32                                           | 0,30  | 0,29  | 0,33  | 0,31      | 0,023              | 0,001                            | 0,0010                     |
| 4                                                                  | 0,37                                           | 0,35  | 0,34  | 0,36  | 0,36      | 0,011              | 0,001                            | 0,0089                     |
| 5                                                                  | 0,50                                           | 0,46  | 0,48  | 0,48  | 0,48      | 0,001              | 0,001                            | 0,0008                     |
| 6                                                                  | 0,56                                           | 0,59  | 0,58  | 0,57  | 0,58      | 0,013              | 0,001                            | 0,0008                     |
| 7                                                                  | 0,72                                           | 0,68  | 0,67  | 0,70  | 0,69      | 0,053              | 0,002                            | 0,0027                     |
| 8                                                                  | 0,80                                           | 0,77  | 0,76  | 0,79  | 0,78      | 0,101              | 0,001                            | 0,0024                     |
| $\Sigma$                                                           |                                                |       |       |       |           | 0,292              | 0,010                            | 0,0175                     |

Таблиця К.3

Значення коефіцієнтів рівняння регресії

| Коефіцієнт | Швидкість деформації розтягу, м/с |                     | Швидкість деформації зрізу, м/с |                     |
|------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|
|            | $1,5 \cdot 10^{-3}$               | $3,0 \cdot 10^{-3}$ | $1,5 \cdot 10^{-3}$             | $3,0 \cdot 10^{-3}$ |
| $b_0$      | 1,483                             | 1,457               | 0,437                           | 0,228               |
| $b_1$      | 0,146                             | 0,078               | 0,198                           | 0,163               |
| $b_2$      | 0,216                             | 0,158               | 0,128                           | 0,174               |

ДОДАТОК Л  
**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ІЗ ЗУБЧАСТИМИ ВАЛКАМИ**

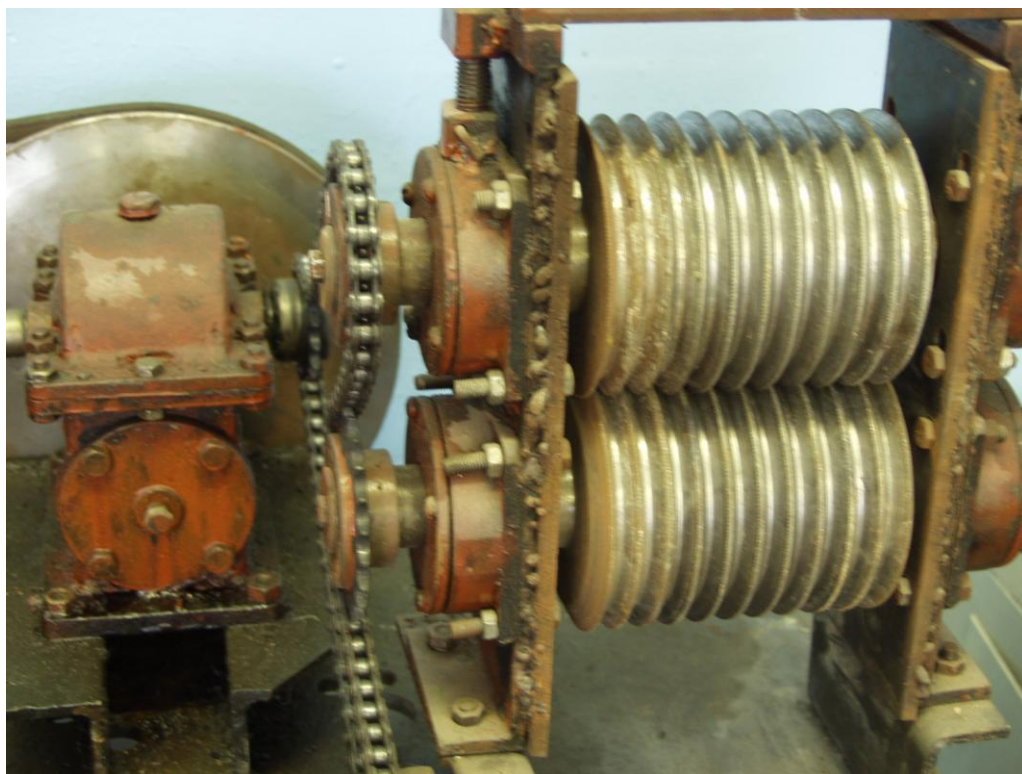


**Рис. Л.1. Пристрій із зубчастими валками**

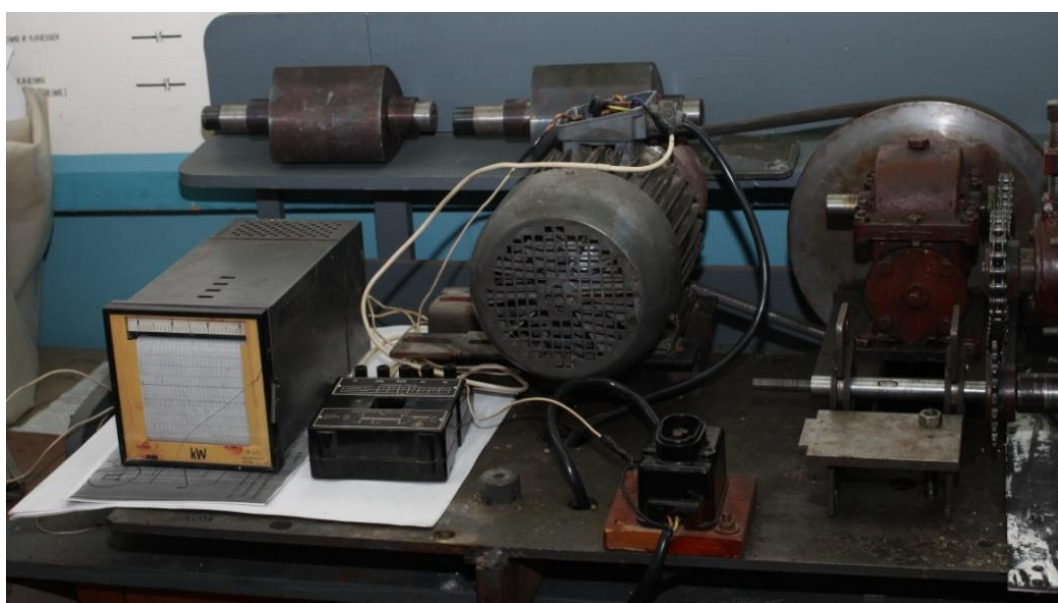


**Рис. Л.2. Підключення вимірювального пристрою**

**ДОДАТОК М**  
**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ**  
**ДОСЛІДЖЕНЬ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ НА ЗУБЧАСТИХ ВАЛКАХ**

Таблиця М.1

Матриця ротатбельного планування експерименту

| Номер досліджу | Матриця планування |         | Робоча матриця |          |
|----------------|--------------------|---------|----------------|----------|
|                | X1                 | X2      | $n$ , об/хв    | $t$ , мм |
| 1.             | +                  | +       | 125            | 10,5     |
| 2.             | –                  | +       | 75             | 10,5     |
| 3.             | +                  | –       | 125            | 7,5      |
| 4.             | –                  | –       | 75             | 7,5      |
| 5.             | – 1,414            | 0       | 50             | 9        |
| 6.             | + 1,414            | 0       | 150            | 9        |
| 7.             | 0                  | – 1,414 | 100            | 6        |
| 8.             | 0                  | + 1,414 | 100            | 12       |
| 9.             | 0                  | 0       | 100            | 9        |
| 10.            | 0                  | 0       | 100            | 9        |
| 11.            | 0                  | 0       | 100            | 9        |
| 12.            | 0                  | 0       | 100            | 9        |
| 13.            | 0                  | 0       | 100            | 9        |

Таблиця М.2

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку  
дисперсій вимірювань питомої енергії при переробці поліетилену

| № п/п | Результати спостережень |       |       |       | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|-------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|       | $y_1$                   | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1     | 2                       | 3     | 4     | 5     | 6         | 7                  | 8                                | 9                          |
| 1     | 34514                   | 34498 | 34502 | 34506 | 34505     | 6,83               | 140                              | 18,73                      |
| 2     | 33512                   | 33529 | 33522 | 33526 | 33522     | 7,41               | 165                              | 51,61                      |
| 3     | 12107                   | 12122 | 12110 | 12101 | 12110     | 8,83               | 234                              | 50,56                      |
| 4     | 11045                   | 11035 | 11051 | 11048 | 11045     | 6,95               | 145                              | 43,96                      |

Продовження таблиця М.2

| 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7            | 8           | 9             |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------------|---------------|
| 5        | 35915 | 35910 | 35916 | 35921 | 35916 | 4,51         | 61          | 35,52         |
| 6        | 43233 | 43230 | 43229 | 43232 | 43231 | 1,83         | 10          | 61,21         |
| 7        | 13925 | 13930 | 13922 | 13918 | 13924 | 5,06         | 77          | 98,22         |
| 8        | 44379 | 44367 | 44384 | 44386 | 44379 | 8,53         | 218         | 31,25         |
| 9        | 35712 | 35710 | 35714 | 35706 | 35711 | 3,42         | 35          | 15,19         |
| 10       | 35779 | 35778 | 35782 | 35781 | 35780 | 1,83         | 10          | 93,15         |
| 11       | 35649 | 35652 | 35648 | 35650 | 35650 | 1,71         | 9           | 85,39         |
| 12       | 35661 | 35658 | 35663 | 35660 | 35661 | 2,08         | 13          | 66,83         |
| 13       | 35767 | 35770 | 35772 | 35769 | 35770 | 2,08         | 13          | 77,96         |
| $\Sigma$ |       |       |       |       |       | <b>61,07</b> | <b>1130</b> | <b>729,58</b> |

Таблиця М.3

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку  
дисперсій вимірювань питомої енергії при переробці поліпропілену

| № п/п    | Результати спостережень |       |       |       | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|----------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|          | $y_1$                   | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1        | 30497                   | 30485 | 30492 | 30513 | 30497     | 11,90              | 425                              | 720                        |
| 2        | 25332                   | 25242 | 25260 | 25265 | 25275     | 39,42              | 4662                             | 621                        |
| 3        | 9150                    | 9155  | 9148  | 9163  | 9154      | 6,68               | 134                              | 650                        |
| 4        | 8343                    | 8310  | 8322  | 8314  | 8322      | 14,71              | 649                              | 857                        |
| 5        | 24110                   | 24119 | 24092 | 24086 | 24102     | 15,37              | 709                              | 1087                       |
| 6        | 32621                   | 32588 | 32596 | 32602 | 32602     | 14,06              | 593                              | 780                        |
| 7        | 9017                    | 8995  | 8999  | 9008  | 9005      | 9,81               | 289                              | 794                        |
| 8        | 28249                   | 28163 | 28198 | 28204 | 28204     | 35,31              | 3741                             | 1040                       |
| 9        | 27102                   | 27097 | 27106 | 27118 | 27106     | 8,96               | 241                              | 1114                       |
| 10       | 26857                   | 26833 | 26844 | 26876 | 26853     | 18,48              | 1025                             | 461                        |
| 11       | 26728                   | 26697 | 26692 | 26712 | 26707     | 16,24              | 791                              | 1037                       |
| 12       | 27044                   | 26963 | 26995 | 27013 | 27004     | 33,88              | 3443                             | 1220                       |
| 13       | 26972                   | 26913 | 26936 | 26954 | 26944     | 25,22              | 1909                             | 1557                       |
| $\Sigma$ |                         |       |       |       |           | <b>250,04</b>      | <b>18611</b>                     | <b>11938</b>               |

ДОДАТОК Н  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ІЗ ВАЛКАМИ ПРОФІЛЮ РЕЛО



Рис. Н.1. Пристрій із валками профілю Рело

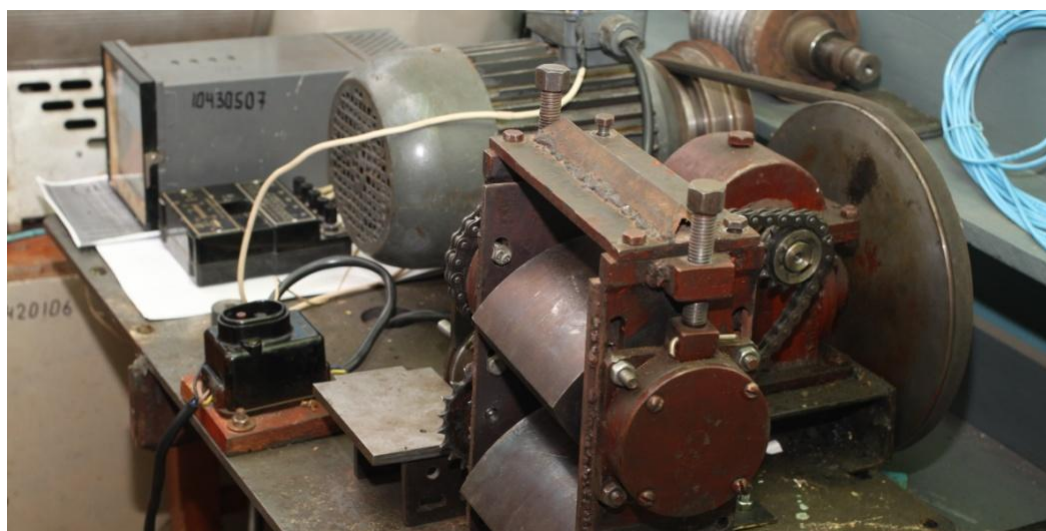


Рис. Н.2. Підключення вимірювального пристрою



а



б

Рис. Н.3. Утворення вільної поверхні полімерного зразка:  
а – штучна шкіра з поліпропілену; б – підшва з ПВХ

**ДОДАТОК П**  
**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ**  
**ДОСЛІДЖЕНЬ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ НА ВАЛКАХ ПРОФІЛЮ РЕЛО**

Таблиця П.1

Матриця ротатбельного планування експерименту

| Номер досліджу | Матриця планування |         | Робоча матриця |                 |
|----------------|--------------------|---------|----------------|-----------------|
|                | X1                 | X2      | n, об/хв       | $\alpha$ , град |
| 1.             | +                  | +       | 150            | 75              |
| 2.             | –                  | +       | 50             | 75              |
| 3.             | +                  | –       | 150            | 15              |
| 4.             | –                  | –       | 50             | 15              |
| 5.             | – 1,414            | 0       | 30             | 45              |
| 6.             | + 1,414            | 0       | 170            | 45              |
| 7.             | 0                  | – 1,414 | 100            | 0               |
| 8.             | 0                  | + 1,414 | 100            | 90              |
| 9.             | 0                  | 0       | 100            | 45              |
| 10.            | 0                  | 0       | 100            | 45              |
| 11.            | 0                  | 0       | 100            | 45              |
| 12.            | 0                  | 0       | 100            | 45              |
| 13.            | 0                  | 0       | 100            | 45              |

Таблиця П.2

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку  
дисперсій вимірювань питомої енергії при переробці поліетилену

| № п/п | Результати спостережень |       |       |       | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|-------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|       | $y_1$                   | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1     | 2                       | 3     | 4     | 5     | 6         | 7                  | 8                                | 9                          |
| 1     | 10734                   | 10730 | 10725 | 10733 | 10731     | 4,04               | 49                               | 114                        |
| 2     | 5377                    | 5349  | 5358  | 5386  | 5368      | 16,98              | 865                              | 42                         |
| 3     | 3545                    | 3536  | 3530  | 3543  | 3540      | 6,86               | 141                              | 41                         |
| 4     | 2202                    | 2143  | 2163  | 2184  | 2173      | 25,57              | 1962                             | 25                         |

Продовження таблиця П.2

| 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7             | 8           | 9           |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|-------------|-------------|
| 5        | 4901  | 4896  | 4887  | 4903  | 4897  | 7,14          | 153         | 168         |
| 6        | 10407 | 10425 | 10413 | 10421 | 10417 | 8,06          | 195         | 106         |
| 7        | 1703  | 1695  | 1689  | 1697  | 1696  | 5,77          | 100         | 35          |
| 8        | 9668  | 9674  | 9670  | 9667  | 9670  | 3,10          | 29          | 292         |
| 9        | 6381  | 6394  | 6385  | 6394  | 6389  | 6,56          | 129         | 134         |
| 10       | 6386  | 6379  | 6374  | 6391  | 6383  | 7,51          | 169         | 65          |
| 11       | 6367  | 6386  | 6370  | 6373  | 6374  | 8,37          | 210         | 35          |
| 12       | 6279  | 6284  | 6290  | 6274  | 6282  | 6,85          | 141         | 478         |
| 13       | 6347  | 6330  | 6329  | 6342  | 6337  | 8,91          | 238         | 514         |
| $\Sigma$ |       |       |       |       |       | <b>115,72</b> | <b>4381</b> | <b>2049</b> |

Таблиця П.3

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку  
дисперсій вимірювань питомої енергії при переробці поліпропілену

| № п/п    | Результати спостережень |       |       |       | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|----------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|          | $y_1$                   | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1        | 5684                    | 5672  | 5676  | 5652  | 5671      | 13,61              | 556                              | 896                        |
| 2        | 4360                    | 4292  | 4284  | 4324  | 4315      | 34,62              | 3596                             | 2222                       |
| 3        | 1992                    | 1912  | 1948  | 1920  | 1943      | 36,13              | 3916                             | 424                        |
| 4        | 1388                    | 1420  | 1356  | 1408  | 1393      | 27,98              | 2348                             | 1430                       |
| 5        | 3260                    | 3324  | 3308  | 3264  | 3289      | 31,90              | 3052                             | 3158                       |
| 6        | 4352                    | 4300  | 4308  | 4356  | 4329      | 29,10              | 2540                             | 1429                       |
| 7        | 1208                    | 1184  | 1124  | 1144  | 1165      | 38,00              | 4332                             | 840                        |
| 8        | 6344                    | 6276  | 6320  | 6312  | 6313      | 28,17              | 2380                             | 2024                       |
| 9        | 3708                    | 3768  | 3688  | 3744  | 3727      | 35,83              | 3852                             | 381                        |
| 10       | 3668                    | 3712  | 3656  | 3700  | 3684      | 26,33              | 2080                             | 797                        |
| 11       | 3684                    | 3628  | 3604  | 3708  | 3656      | 15,01              | 676                              | 105                        |
| 12       | 3744                    | 3672  | 3688  | 3728  | 3708      | 33,63              | 3392                             | 316                        |
| 13       | 3724                    | 3696  | 3672  | 3708  | 3700      | 21,91              | 1440                             | 190                        |
| $\Sigma$ |                         |       |       |       |           | <b>372,22</b>      | <b>34160</b>                     | <b>14212</b>               |



ДОДАТОК Р  
**ГОЛКОФРЕЗА ДЛЯ ОСТАТОЧНОЇ ДЕЗІНТЕГРАЦІЇ ПОЛІМЕРНИХ  
ВІДХОДІВ**



**Рис. Р.1. Голкофреза**



а



б

**Рис. Р.2. Утворення вільної поверхні полімерного зразка: а – штучна шкіра з поліпропілену; б – поліетиленова плівка**





а



б



в

**Рис. Р.3. Утворення вільної поверхні полімерного зразка: а – штучна шкіра з поліпропілену; б – полівінілхлорид для підшов; в – поліетиленова плівка**

Таблиця Р.1

Матриця ротабельного планування експерименту

| Частота обертання зубчастих валків $n_z$ , об/хв | Частота обертання валків профілю Рело $n_R$ , об/хв | Крок зубців $t$ , мм | Кут подачі $\alpha$ , град | Частота обертання голкофрези $n_G$ , об/хв | Відстань до днища камери $l$ , мм | Питома потужність $w$ , кВт/м <sup>2</sup> |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|
| 1                                                | 2                                                   | 3                    | 4                          | 5                                          | 6                                 | 7                                          |
| 150                                              | 150                                                 | 9                    | 90                         | 1000                                       | 1,25                              | 0,02                                       |
| 150                                              | 150                                                 | 9                    | 0                          | 1000                                       | 1,25                              | 2,42                                       |
| 150                                              | 50                                                  | 9                    | 0                          | 1000                                       | 1,25                              | 0,90                                       |
| 150                                              | 50                                                  | 9                    | 0                          | 1000                                       | 1,25                              | 0,90                                       |
| 50                                               | 150                                                 | 9                    | 90                         | 1000                                       | 1,25                              | 4,82                                       |
| 50                                               | 150                                                 | 9                    | 0                          | 1000                                       | 1,25                              | 1,46                                       |
| 50                                               | 50                                                  | 9                    | 90                         | 1000                                       | 1,25                              | 3,30                                       |
| 50                                               | 50                                                  | 9                    | 0                          | 1000                                       | 1,25                              | 0,06                                       |
| 100                                              | 150                                                 | 12                   | 45                         | 1500                                       | 1,25                              | 3,66                                       |

## Продовження таблиці Р.1

| 1   | 2   | 3  | 4  | 5    | 6    | 7    |
|-----|-----|----|----|------|------|------|
| 100 | 150 | 12 | 45 | 500  | 1,25 | 2,62 |
| 100 | 150 | 6  | 45 | 1500 | 1,25 | 4,62 |
| 100 | 150 | 6  | 45 | 500  | 1,25 | 3,58 |
| 100 | 50  | 12 | 45 | 1500 | 1,25 | 2,14 |
| 100 | 50  | 12 | 45 | 500  | 1,25 | 1,10 |
| 100 | 50  | 6  | 45 | 1500 | 1,25 | 3,10 |
| 100 | 50  | 6  | 45 | 500  | 1,25 | 2,06 |
| 100 | 100 | 12 | 90 | 1000 | 2    | 3,52 |
| 100 | 100 | 12 | 90 | 1000 | 0,5  | 4,60 |
| 100 | 100 | 12 | 0  | 1000 | 2    | 0,16 |
| 100 | 100 | 12 | 0  | 1000 | 0,5  | 1,24 |
| 100 | 100 | 6  | 90 | 1000 | 2    | 4,48 |
| 100 | 100 | 6  | 90 | 1000 | 0,5  | 5,56 |
| 100 | 100 | 6  | 0  | 1000 | 2    | 1,12 |
| 100 | 100 | 6  | 0  | 1000 | 0,5  | 2,20 |
| 100 | 100 | 9  | 45 | 1000 | 1,25 | 2,86 |
| 100 | 100 | 9  | 45 | 1000 | 1,25 | 2,86 |
| 100 | 100 | 9  | 45 | 1000 | 1,25 | 2,86 |
| 150 | 100 | 9  | 90 | 1500 | 1,25 | 5,54 |
| 150 | 100 | 9  | 90 | 500  | 1,25 | 4,50 |
| 150 | 100 | 9  | 0  | 1500 | 1,25 | 2,18 |
| 150 | 100 | 9  | 0  | 500  | 1,25 | 1,14 |
| 50  | 100 | 9  | 90 | 1500 | 1,25 | 4,58 |
| 50  | 100 | 9  | 90 | 500  | 1,25 | 3,54 |
| 50  | 100 | 9  | 0  | 1500 | 1,25 | 1,22 |
| 50  | 100 | 9  | 0  | 500  | 1,25 | 0,18 |
| 100 | 150 | 9  | 45 | 1500 | 2    | 3,60 |
| 100 | 150 | 9  | 45 | 1500 | 0,5  | 4,68 |
| 100 | 150 | 9  | 45 | 500  | 2    | 2,56 |
| 100 | 150 | 9  | 45 | 500  | 0,5  | 3,64 |
| 100 | 50  | 9  | 45 | 1500 | 2    | 2,08 |
| 100 | 50  | 9  | 45 | 1500 | 0,5  | 3,16 |
| 100 | 50  | 9  | 45 | 500  | 2    | 1,04 |
| 100 | 50  | 9  | 45 | 500  | 0,5  | 2,12 |
| 150 | 100 | 12 | 45 | 1000 | 2    | 2,32 |
| 150 | 100 | 12 | 45 | 1000 | 0,5  | 3,40 |
| 150 | 100 | 6  | 45 | 1000 | 2    | 3,28 |
| 150 | 100 | 6  | 45 | 1000 | 0,5  | 4,36 |
| 50  | 100 | 12 | 45 | 1000 | 2    | 1,36 |
| 50  | 100 | 12 | 45 | 1000 | 0,5  | 2,44 |
| 50  | 100 | 6  | 45 | 1000 | 2    | 2,32 |
| 50  | 100 | 6  | 45 | 1000 | 0,5  | 3,40 |
| 100 | 100 | 9  | 45 | 1000 | 1,25 | 2,86 |
| 100 | 100 | 9  | 45 | 1000 | 1,25 | 2,86 |
| 100 | 100 | 9  | 45 | 1000 | 1,25 | 2,86 |

**ДОДАТОК С**  
**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ**  
**ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЦНОСТІ ТА ВИТРИВАЛОСТІ ВІД**  
**КОНЦЕНТРАЦІЇ ТА ОРІЄНТАЦІЇ ВКЛЮЧЕНЬ**



**Рис. С.1. Прес-форма для отримання підошви із включенням частинок перероблених відходів**

Таблиця С.1

Матриця ротатбельного планування експерименту

| Номер досліджу | Матриця планування |         | Робоча матриця |                 |
|----------------|--------------------|---------|----------------|-----------------|
|                | X1                 | X2      | C              | $\alpha$ , град |
| 1.             | +                  | +       | 0,13           | 75              |
| 2.             | –                  | +       | 0,03           | 75              |
| 3.             | +                  | –       | 0,13           | 15              |
| 4.             | –                  | –       | 0,03           | 15              |
| 5.             | – 1,414            | 0       | 0,01           | 45              |
| 6.             | + 1,414            | 0       | 0,15           | 45              |
| 7.             | 0                  | – 1,414 | 0,08           | 0               |
| 8.             | 0                  | + 1,414 | 0,08           | 90              |
| 9.             | 0                  | 0       | 0,08           | 45              |
| 10.            | 0                  | 0       | 0,08           | 45              |
| 11.            | 0                  | 0       | 0,08           | 45              |
| 12.            | 0                  | 0       | 0,08           | 45              |
| 13.            | 0                  | 0       | 0,08           | 45              |

Таблиця С.2

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку дисперсій вимірювань

| № п/п | Результати спостережень |       |       |       | $\bar{y}$ | $s_{\text{пом}}^2$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|-------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|       | $y_1$                   | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1     | 43,54                   | 43,51 | 43,47 | 43,61 | 43,53     | 0,06               | 0,01                             | 0,06                       |
| 2     | 45,04                   | 46,14 | 44,51 | 44,50 | 45,05     | 0,77               | 1,78                             | 1,72                       |
| 3     | 52,53                   | 53,12 | 52,58 | 52,70 | 52,73     | 0,27               | 0,22                             | 0,03                       |
| 4     | 52,80                   | 53,34 | 52,64 | 52,92 | 52,93     | 0,30               | 0,27                             | 0,82                       |
| 5     | 45,81                   | 46,30 | 44,95 | 46,34 | 45,85     | 0,65               | 1,25                             | 1,48                       |
| 6     | 49,03                   | 49,60 | 48,96 | 49,02 | 49,15     | 0,29               | 0,26                             | 0,08                       |

Продовження таблиці С.2

|          |       |       |       |       |       |             |             |             |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|
| 7        | 53,30 | 53,79 | 53,13 | 53,43 | 53,41 | 0,28        | 0,24        | 0,03        |
| 8        | 39,66 | 40,10 | 38,37 | 40,26 | 39,60 | 0,86        | 2,20        | 0,57        |
| 9        | 51,69 | 52,11 | 51,48 | 51,81 | 51,77 | 0,26        | 0,21        | 0,04        |
| 10       | 52,75 | 53,34 | 52,09 | 52,76 | 52,73 | 0,51        | 0,78        | 0,20        |
| 11       | 51,14 | 52,00 | 51,21 | 51,58 | 51,48 | 0,42        | 0,53        | 0,15        |
| 12       | 52,14 | 52,61 | 51,43 | 52,76 | 52,23 | 0,59        | 1,07        | 0,01        |
| 13       | 51,92 | 52,33 | 51,15 | 52,48 | 51,97 | 0,61        | 1,12        | 0,02        |
| $\Sigma$ |       |       |       |       |       | <b>5,87</b> | <b>9,94</b> | <b>5,21</b> |

Таблиця С.3

Результати спостережень та проміжні дані для розрахунку  
дисперсій вимірювань кількості згину, що передують руйнуванню зразка

| №<br>п/п | Результати спостережень |       |       |       | $\bar{y}$ | $s^2_{\text{пом}}$ | $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ | $n(\bar{y}_i - \hat{y})^2$ |
|----------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
|          | $y_1$                   | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |           |                    |                                  |                            |
| 1        | 7,85                    | 7,79  | 7,92  | 7,82  | 7,85      | 0,05               | 0,009                            | 0,001                      |
| 2        | 8,12                    | 8,26  | 8,11  | 7,98  | 8,12      | 0,11               | 0,039                            | 0,013                      |
| 3        | 9,47                    | 9,51  | 9,58  | 9,45  | 9,50      | 0,06               | 0,010                            | 0,006                      |
| 4        | 9,52                    | 9,55  | 9,59  | 9,49  | 9,54      | 0,04               | 0,006                            | 0,003                      |
| 5        | 8,26                    | 8,29  | 8,19  | 8,31  | 8,26      | 0,05               | 0,008                            | 0,002                      |
| 6        | 8,84                    | 8,88  | 8,92  | 8,79  | 8,86      | 0,05               | 0,009                            | 0,001                      |
| 7        | 9,61                    | 9,63  | 9,68  | 9,58  | 9,63      | 0,04               | 0,005                            | 0,005                      |
| 8        | 7,15                    | 7,18  | 6,99  | 7,22  | 7,14      | 0,10               | 0,031                            | 0,040                      |
| 9        | 9,32                    | 9,33  | 9,38  | 9,29  | 9,33      | 0,04               | 0,004                            | 0,003                      |
| 10       | 9,51                    | 9,55  | 9,49  | 9,46  | 9,50      | 0,03               | 0,004                            | 0,001                      |
| 11       | 9,22                    | 9,31  | 9,33  | 9,25  | 9,28      | 0,05               | 0,008                            | 0,001                      |
| 12       | 9,40                    | 9,42  | 9,37  | 9,46  | 9,41      | 0,04               | 0,004                            | 0,002                      |
| 13       | 9,36                    | 9,37  | 9,32  | 9,41  | 9,37      | 0,03               | 0,004                            | 0,004                      |
| $\Sigma$ |                         |       |       |       |           | <b>0,69</b>        | <b>0,141</b>                     | <b>0,082</b>               |

# ДОДАТОК Т

## РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ НА РОЗТЯГ ПІДОШВИ ДЛЯ ЧЕРЕВИКІВ

Таблиця Т.1

Результати випробувань зразків з ПВХ з додаванням частинок короткої фракції ( $l/d = 4 \dots 6$ ) у напрямку відливу, отриманих на розривній машині „Instron-4200” при температурі  $T=20^{\circ}\text{C}$ .

Зразок №1.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,672      | 3,733202       | 129,6183 | 4,985317     | 0              | 0                    | 0                    | 7,466405            |
| 1,17       | 6,499385       | 254,9745 | 9,80671      | 0              | 0                    | 0                    | 12,99878            |
| 2,343      | 13,01634       | 380,0284 | 14,61648     | 0              | 0                    | 0                    | 26,03268            |
| 3,843      | 21,350025      | 439,5047 | 16,90403     | 0              | 0                    | 0                    | 42,70005            |
| 5,343      | 29,68315       | 451,3242 | 17,35862     | 0              | 0                    | 0                    | 59,3663             |
| 6,189      | 34,38308       | 323,0075 | 12,42337     | 0              | 0                    | 0                    | 68,76615            |
| 6,252      | 34,733285      | 196,65   | 7,56346      | 0              | 0                    | 0                    | 69,46655            |
| 6,366      | 35,366815      | 65,6818  | 2,526223     | 0              | 0                    | 0                    | 70,73365            |
| 7,866      | 43,699655      | 22,52832 | 0,866474     | 0              | 0                    | 0                    | 87,3993             |
| 9,366      | 52,03335       | 22,67254 | 0,872021     | 0              | 0                    | 0                    | 104,0667            |
| 10,86      | 60,33245       | 23,39898 | 0,899961     | 0              | 0                    | 0                    | 120,6649            |

Зразок №2.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,69       | 3,833785       | 128,7048 | 6,773935     | 0              | 0                    | 0                    | 7,66757             |
| 1,323      | 7,349955       | 253,839  | 13,35995     | 0              | 0                    | 0                    | 14,69991            |
| 2,823      | 15,68336       | 369,0561 | 19,42401     | 0              | 0                    | 0                    | 31,36671            |
| 4,323      | 24,01648       | 407,4503 | 21,44475     | 0              | 0                    | 0                    | 48,03295            |
| 5,823      | 32,35017       | 344,3358 | 18,12294     | 0              | 0                    | 0                    | 64,70035            |
| 6,051      | 33,61695       | 216,3759 | 11,38821     | 0              | 0                    | 0                    | 67,2339             |
| 6,096      | 33,86713       | 85,747   | 4,513001     | 0              | 0                    | 0                    | 67,73425            |
| 7,596      | 42,19997       | 22,25995 | 1,171576     | 0              | 0                    | 0                    | 84,39995            |
| 9,096      | 50,53335       | 22,2855  | 1,172921     | 0              | 0                    | 0                    | 101,0668            |
| 10,596     | 58,86705       | 22,42263 | 1,180138     | 0              | 0                    | 0                    | 117,7341            |
| 11,31      | 62,83375       | 22,69442 | 1,194443     | 0              | 0                    | 0                    | 125,6675            |

Зразок №3.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,789      | 4,383452       | 127,4978 | 4,249927     | 0              | 0                    | 0                    | 8,766905            |
| 1,68       | 9,33329        | 252,6182 | 8,420605     | 0              | 0                    | 0                    | 18,66658            |
| 3,18       | 17,66641       | 308,4141 | 10,28047     | 0              | 0                    | 0                    | 35,33282            |
| 4,68       | 26,0001        | 265,3461 | 8,84487      | 0              | 0                    | 0                    | 52,0002             |
| 5,115      | 28,41665       | 134,5451 | 4,484836     | 0              | 0                    | 0                    | 56,8333             |
| 6,615      | 36,75034       | 21,9694  | 0,732314     | 0              | 0                    | 0                    | 73,50065            |
| 8,115      | 45,08317       | 22,08591 | 0,736197     | 0              | 0                    | 0                    | 90,16635            |
| 9,615      | 53,41655       | 21,99432 | 0,733144     | 0              | 0                    | 0                    | 106,8332            |
| 11,115     | 61,75          | 22,45577 | 0,748526     | 0              | 0                    | 0                    | 123,5               |
| 11,517     | 63,9832        | 22,79214 | 0,759738     | 0              | 0                    | 0                    | 127,9664            |

## Продовження табл. Т.1

## Зразок №4.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 4,856643 | 0,15177      | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,663      | 3,683335       | 130,3363 | 4,073009     | 0              | 0                    | 0                    | 7,36667             |
| 1,146      | 6,366785       | 255,6047 | 7,987645     | 0              | 0                    | 0                    | 12,73357            |
| 1,935      | 10,74967       | 380,731  | 11,89784     | 0              | 0                    | 0                    | 21,49934            |
| 3,435      | 19,08336       | 479,8432 | 14,9951      | 0              | 0                    | 0                    | 38,16672            |
| 4,935      | 27,41648       | 419,613  | 13,11291     | 0              | 0                    | 0                    | 54,83295            |
| 5,013      | 27,85026       | 285,0093 | 8,90654      | 0              | 0                    | 0                    | 55,7005             |
| 5,034      | 27,96728       | 159,0668 | 4,970837     | 0              | 0                    | 0                    | 55,93455            |
| 5,07       | 28,16703       | 30,64702 | 0,957719     | 0              | 0                    | 0                    | 56,33405            |
| 6,57       | 36,49987       | 22,30895 | 0,697155     | 0              | 0                    | 0                    | 72,99975            |
| 8,07       | 44,83327       | 22,1965  | 0,693641     | 0              | 0                    | 0                    | 89,66655            |
| 9,231      | 51,28365       | 22,40446 | 0,70014      | 0              | 0                    | 0                    | 102,5673            |

## Зразок №5.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | -0,75396 | -0,02513     | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,66       | 3,666902       | 124,33   | 4,144333     | 0              | 0                    | 0                    | 7,333805            |
| 1,125      | 6,24977        | 249,9186 | 8,33062      | 0              | 0                    | 0                    | 12,49954            |
| 1,866      | 10,36661       | 374,9476 | 12,49825     | 0              | 0                    | 0                    | 20,73321            |
| 3,366      | 18,70001       | 482,5416 | 16,08472     | 0              | 0                    | 0                    | 37,40002            |
| 4,866      | 27,0337        | 480,2229 | 16,00743     | 0              | 0                    | 0                    | 54,0674             |
| 5,28       | 29,33323       | 345,4653 | 11,51551     | 0              | 0                    | 0                    | 58,66645            |
| 5,301      | 29,44996       | 218,632  | 7,28773      | 0              | 0                    | 0                    | 58,8999             |
| 5,325      | 29,5837        | 92,43925 | 3,081308     | 0              | 0                    | 0                    | 59,1674             |
| 6,825      | 37,9171        | 22,39595 | 0,746532     | 0              | 0                    | 0                    | 75,8342             |
| 8,325      | 46,25022       | 22,13506 | 0,737836     | 0              | 0                    | 0                    | 92,50045            |
| 9,825      | 54,5836        | 22,20595 | 0,740199     | 0              | 0                    | 0                    | 109,1673            |
| 11,325     | 62,91675       | 22,53434 | 0,751145     | 0              | 0                    | 0                    | 125,8335            |
| 12,825     | 71,25015       | 22,37024 | 0,745675     | 0              | 0                    | 0                    | 142,5003            |
| 14,325     | 79,583         | 22,36354 | 0,745451     | 0              | 0                    | 0                    | 159,166             |
| 15,705     | 87,25          | 22,7541  | 0,75847      | 0              | 0                    | 0                    | 174,5               |

## Зразок №6.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 1,023782 | 0,031993     | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,663      | 3,683618       | 126,0321 | 3,938504     | 0              | 0                    | 0                    | 7,367235            |
| 1,2        | 6,666835       | 251,3806 | 7,85564      | 0              | 0                    | 0                    | 13,33367            |
| 2,7        | 15,00024       | 375,985  | 11,74953     | 0              | 0                    | 0                    | 30,00048            |
| 4,2        | 23,33336       | 412,626  | 12,89456     | 0              | 0                    | 0                    | 46,66672            |
| 5,667      | 31,48316       | 287,5559 | 8,98612      | 0              | 0                    | 0                    | 62,9663             |
| 5,811      | 32,28358       | 161,7724 | 5,055385     | 0              | 0                    | 0                    | 64,56715            |
| 6,687      | 37,14984       | 36,73346 | 1,147921     | 0              | 0                    | 0                    | 74,29965            |
| 8,187      | 45,48324       | 22,88466 | 0,715146     | 0              | 0                    | 0                    | 90,9665             |
| 9,501      | 52,78275       | 23,01992 | 0,719373     | 0              | 0                    | 0                    | 105,5655            |

## Продовження табл. Т.1

## Зразок №7.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,768      | 4,266436       | 122,807  | 3,721425     | 0              | 0                    | 0                    | 8,53287             |
| 1,497      | 8,316685       | 247,8413 | 7,51034      | 0              | 0                    | 0                    | 16,63338            |
| 2,997      | 16,65009       | 346,5023 | 10,50007     | 0              | 0                    | 0                    | 33,30019            |
| 4,497      | 24,98321       | 380,6029 | 11,53342     | 0              | 0                    | 0                    | 49,96642            |
| 5,997      | 33,31662       | 384,6139 | 11,65497     | 0              | 0                    | 0                    | 66,63325            |
| 7,392      | 41,06749       | 255,4549 | 7,741055     | 0              | 0                    | 0                    | 82,13495            |
| 7,422      | 41,23437       | 125,0399 | 3,789086     | 0              | 0                    | 0                    | 82,46875            |
| 8,922      | 49,56636       | 22,00162 | 0,666716     | 0              | 0                    | 0                    | 99,1327             |
| 10,422     | 57,90005       | 22,56317 | 0,683733     | 0              | 0                    | 0                    | 115,8001            |

## Зразок №8.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,744      | 4,133552       | 132,2083 | 4,264785     | 0              | 0                    | 0                    | 8,267105            |
| 1,332      | 7,39982        | 257,264  | 8,29884      | 0              | 0                    | 0                    | 14,79964            |
| 2,439      | 13,54986       | 382,3165 | 12,33279     | 0              | 0                    | 0                    | 27,09971            |
| 3,939      | 21,88326       | 439,7478 | 14,18541     | 0              | 0                    | 0                    | 43,76652            |
| 5,355      | 29,75002       | 312,1285 | 10,06866     | 0              | 0                    | 0                    | 59,50005            |
| 5,406      | 30,03363       | 41,52853 | 1,33963      | 0              | 0                    | 0                    | 60,06725            |
| 6,906      | 38,36591       | 22,31086 | 0,719705     | 0              | 0                    | 0                    | 76,7318             |
| 8,406      | 46,70016       | 22,4799  | 0,725158     | 0              | 0                    | 0                    | 93,4003             |
| 9,906      | 55,0333        | 23,33411 | 0,752713     | 0              | 0                    | 0                    | 110,0666            |
| 11,085     | 61,5831        | 25,39036 | 0,819044     | 0              | 0                    | 0                    | 123,1662            |

## Зразок №9.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,666      | 3,700052       | 119,8879 | 3,86735      | 0              | 0                    | 0                    | 7,400105            |
| 1,152      | 6,40022        | 245,4938 | 7,919155     | 0              | 0                    | 0                    | 12,80044            |
| 1,902      | 10,56636       | 370,8366 | 11,96247     | 0              | 0                    | 0                    | 21,13271            |
| 3,402      | 18,90033       | 480,0556 | 15,48566     | 0              | 0                    | 0                    | 37,80065            |
| 4,902      | 27,23316       | 490,1333 | 15,81075     | 0              | 0                    | 0                    | 54,4663             |
| 5,676      | 31,53303       | 364,661  | 11,76326     | 0              | 0                    | 0                    | 63,06605            |
| 5,736      | 31,8668        | 236,6021 | 7,632325     | 0              | 0                    | 0                    | 63,7336             |
| 5,769      | 32,05012       | 103,0615 | 3,324565     | 0              | 0                    | 0                    | 64,10025            |
| 7,269      | 40,38352       | 22,78479 | 0,734993     | 0              | 0                    | 0                    | 80,76705            |
| 8,769      | 48,71607       | 23,05546 | 0,743725     | 0              | 0                    | 0                    | 97,43215            |
| 10,269     | 57,05005       | 25,44925 | 0,820944     | 0              | 0                    | 0                    | 114,1001            |
| 11,769     | 65,38345       | 22,81666 | 0,736022     | 0              | 0                    | 0                    | 130,7669            |
| 13,269     | 73,71655       | 21,60728 | 0,697009     | 0              | 0                    | 0                    | 147,4332            |
| 14,769     | 82,05025       | 21,62765 | 0,697666     | 0              | 0                    | 0                    | 164,1005            |
| 16,269     | 90,3825        | 21,91545 | 0,70695      | 0              | 0                    | 0                    | 180,7651            |
| 19,269     | 107,0499       | 23,16179 | 0,747155     | 0              | 0                    | 0                    | 214,0998            |
| 20,769     | 115,3833       | 23,75703 | 0,766356     | 0              | 0                    | 0                    | 230,7666            |
| 22,269     | 123,7165       | 23,89748 | 0,770887     | 0              | 0                    | 0                    | 247,4329            |
| 23,769     | 132,0499       | 24,11318 | 0,777845     | 0              | 0                    | 0                    | 264,0997            |

Таблиця Т.2

Результати випробувань зразків з ПВХ з додаванням частинок короткої фракції ( $l/d = 4 \dots 6$ ) у напрямку перпендикулярному до відливу, отриманих на розривній машині „Instron-4200” при температурі  $T=20^{\circ}\text{C}$

Зразок №1.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,09       | 0,361335       | 1,946415 | 0,086507     | 0              | 0                    | 0                    | 0,72267             |
| 0,12       | 0,543405       | 13,97292 | 0,621018     | 0              | 0                    | 0                    | 1,08681             |
| 0,15       | 0,71502        | 26,05624 | 1,158055     | 0              | 0                    | 0                    | 1,430041            |
| 0,183      | 0,894795       | 37,35825 | 1,660367     | 0              | 0                    | 0                    | 1,789591            |
| 0,222      | 1,098796       | 48,66003 | 2,162669     | 0              | 0                    | 0                    | 2,197591            |
| 0,267      | 1,329061       | 60,20006 | 2,675557     | 0              | 0                    | 0                    | 2,658122            |
| 0,321      | 1,602421       | 71,53394 | 3,179286     | 0              | 0                    | 0                    | 3,204841            |
| 0,603      | 3,014866       | 82,83461 | 3,681538     | 0              | 0                    | 0                    | 6,029735            |
| 0,762      | 3,809957       | 94,09041 | 4,181796     | 0              | 0                    | 0                    | 7,619913            |
| 0,816      | 4,079747       | 105,6088 | 4,693725     | 0              | 0                    | 0                    | 8,159495            |
| 0,873      | 4,364837       | 117,1388 | 5,206172     | 0              | 0                    | 0                    | 8,729672            |
| 0,942      | 4,710105       | 128,8061 | 5,724716     | 0              | 0                    | 0                    | 9,420215            |
| 1,017      | 5,085212       | 140,2171 | 6,23187      | 0              | 0                    | 0                    | 10,17042            |
| 1,101      | 5,505453       | 151,7166 | 6,742962     | 0              | 0                    | 0                    | 11,0109             |
| 1,197      | 5,985108       | 163,1552 | 7,251345     | 0              | 0                    | 0                    | 11,97022            |
| 1,305      | 6,525198       | 174,5514 | 7,757843     | 0              | 0                    | 0                    | 13,0504             |
| 1,431      | 7,154537       | 185,9804 | 8,265798     | 0              | 0                    | 0                    | 14,30908            |
| 1,578      | 7,890215       | 197,396  | 8,773155     | 0              | 0                    | 0                    | 15,78043            |
| 1,752      | 8,760276       | 208,7114 | 9,276066     | 0              | 0                    | 0                    | 17,52055            |
| 1,965      | 9,825152       | 219,9852 | 9,777123     | 0              | 0                    | 0                    | 19,65031            |
| 2,235      | 11,17487       | 231,2523 | 10,27788     | 0              | 0                    | 0                    | 22,34974            |
| 2,607      | 13,0351        | 242,531  | 10,77916     | 0              | 0                    | 0                    | 26,07019            |
| 3,219      | 16,09459       | 253,7856 | 11,27936     | 0              | 0                    | 0                    | 32,18918            |
| 4,719      | 23,59516       | 255,1731 | 11,34103     | 0              | 0                    | 0                    | 47,19033            |
| 5,325      | 26,62456       | 243,8752 | 10,83889     | 0              | 0                    | 0                    | 53,24913            |
| 5,556      | 27,77997       | 232,5099 | 10,33377     | 0              | 0                    | 0                    | 55,55993            |
| 5,694      | 28,46974       | 221,2218 | 9,832082     | 0              | 0                    | 0                    | 56,93949            |
| 5,781      | 28,90528       | 209,7217 | 9,320967     | 0              | 0                    | 0                    | 57,81056            |
| 5,826      | 29,13019       | 200,4941 | 8,910846     | 0              | 0                    | 0                    | 58,26038            |

Зразок №2.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,087      | 0,34221        | 12,98052 | 0,576912     | 0              | 0                    | 0                    | 0,68442             |
| 0,114      | 0,50745        | 25,54224 | 1,135211     | 0              | 0                    | 0                    | 1,0149              |
| 0,138      | 0,647955       | 37,49207 | 1,666314     | 0              | 0                    | 0                    | 1,29591             |
| 0,165      | 0,79764        | 49,80254 | 2,213447     | 0              | 0                    | 0                    | 1,595281            |
| 0,198      | 0,973845       | 61,94453 | 2,75309      | 0              | 0                    | 0                    | 1,947691            |
| 0,24       | 1,191615       | 73,63053 | 3,272468     | 0              | 0                    | 0                    | 2,383231            |
| 0,291      | 1,451205       | 85,39254 | 3,795225     | 0              | 0                    | 0                    | 2,902411            |
| 0,576      | 2,880226       | 96,74181 | 4,299637     | 0              | 0                    | 0                    | 5,760455            |
| 0,675      | 3,375181       | 108,0724 | 4,803219     | 0              | 0                    | 0                    | 6,750365            |
| 0,726      | 3,629927       | 119,9484 | 5,331038     | 0              | 0                    | 0                    | 7,259855            |
| 0,783      | 3,915017       | 131,463  | 5,8428       | 0              | 0                    | 0                    | 7,830032            |
| 0,84       | 4,200107       | 142,8395 | 6,348425     | 0              | 0                    | 0                    | 8,400213            |



## Продовження табл. Т.2

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count" | "Repetitions Count" | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0,9        | 4,499987       | 154,4526 | 6,864561     | 0              | 0                   | 0                   | 8,999973            |
| 0,963      | 4,81491        | 165,738  | 7,366131     | 0              | 0                   | 0                   | 9,629825            |
| 1,032      | 5,160182       | 177,0465 | 7,868736     | 0              | 0                   | 0                   | 10,32036            |
| 1,11       | 5,55008        | 188,5398 | 8,379545     | 0              | 0                   | 0                   | 11,10015            |
| 1,197      | 5,985108       | 200,0845 | 8,892644     | 0              | 0                   | 0                   | 11,97022            |
| 1,293      | 6,46502        | 211,6022 | 9,404546     | 0              | 0                   | 0                   | 12,93003            |
| 1,398      | 6,98981        | 222,8828 | 9,9059       | 0              | 0                   | 0                   | 13,97961            |
| 1,515      | 7,575035       | 234,1736 | 10,40771     | 0              | 0                   | 0                   | 15,15006            |
| 1,647      | 8,23523        | 245,4476 | 10,90878     | 0              | 0                   | 0                   | 16,47045            |
| 1,797      | 8,98493        | 256,7165 | 11,40962     | 0              | 0                   | 0                   | 17,96986            |
| 1,968      | 9,839943       | 267,9949 | 11,91088     | 0              | 0                   | 0                   | 19,67989            |
| 2,169      | 10,84516       | 279,3752 | 12,41667     | 0              | 0                   | 0                   | 21,69031            |
| 2,406      | 12,02963       | 290,6425 | 12,91744     | 0              | 0                   | 0                   | 24,05926            |
| 2,694      | 13,46987       | 301,9393 | 13,41952     | 0              | 0                   | 0                   | 26,93974            |
| 3,063      | 15,3148        | 313,203  | 13,92013     | 0              | 0                   | 0                   | 30,62959            |
| 3,6        | 18,00046       | 324,4543 | 14,42019     | 0              | 0                   | 0                   | 36,00091            |
| 5,1        | 25,49975       | 331,7009 | 14,74226     | 0              | 0                   | 0                   | 50,99954            |
| 5,772      | 28,8599        | 320,4446 | 14,24198     | 0              | 0                   | 0                   | 57,71979            |
| 6,009      | 30,04488       | 309,1909 | 13,74182     | 0              | 0                   | 0                   | 60,08976            |
| 6,147      | 30,73516       | 297,8541 | 13,23796     | 0              | 0                   | 0                   | 61,47032            |
| 6,246      | 31,23012       | 286,2922 | 12,7241      | 0              | 0                   | 0                   | 62,46023            |
| 6,315      | 31,57514       | 274,6964 | 12,20873     | 0              | 0                   | 0                   | 63,15026            |
| 6,36       | 31,8003        | 262,8488 | 11,68217     | 0              | 0                   | 0                   | 63,60062            |
| 6,366      | 31,83013       | 260,7304 | 11,58802     | 0              | 0                   | 0                   | 63,66029            |

## Зразок №3.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count" | "Repetitions Count" | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                   | 0                   | 0                   |
| 0,09042    | 32,23737       | 14,55881 | 0,647058     | 0              | 0                   | 0                   | 64,47474            |
| 0,11234    | 32,384         | 26,19124 | 1,164055     | 0              | 0                   | 0                   | 64,76801            |
| 0,14248    | 32,57474       | 38,11487 | 1,693994     | 0              | 0                   | 0                   | 65,14947            |
| 0,16988    | 32,73845       | 49,96148 | 2,22051      | 0              | 0                   | 0                   | 65,47689            |
| 0,21098    | 32,97457       | 61,39868 | 2,728829     | 0              | 0                   | 0                   | 65,94917            |
| 0,2466     | 33,17399       | 72,6746  | 3,229983     | 0              | 0                   | 0                   | 66,34796            |
| 0,29592    | 33,4476        | 84,06    | 3,736        | 0              | 0                   | 0                   | 66,8952             |
| 0,52882    | 34,72464       | 95,50638 | 4,244727     | 0              | 0                   | 0                   | 69,44927            |
| 0,69596    | 35,64009       | 106,8341 | 4,74818      | 0              | 0                   | 0                   | 71,28018            |
| 0,75076    | 35,93997       | 118,3256 | 5,258916     | 0              | 0                   | 0                   | 71,87994            |
| 0,80282    | 36,22481       | 129,7143 | 5,765081     | 0              | 0                   | 0                   | 72,4496             |
| 0,8631     | 36,55529       | 141,4598 | 6,287103     | 0              | 0                   | 0                   | 73,11056            |
| 0,92338    | 36,88526       | 152,8194 | 6,791972     | 0              | 0                   | 0                   | 73,77053            |
| 0,98914    | 37,24455       | 164,7644 | 7,322864     | 0              | 0                   | 0                   | 74,48909            |
| 1,0549     | 37,60486       | 176,2935 | 7,835265     | 0              | 0                   | 0                   | 75,20972            |
| 1,1234     | 37,97997       | 187,733  | 8,343689     | 0              | 0                   | 0                   | 75,95996            |
| 1,21656    | 38,48997       | 199,1438 | 8,850834     | 0              | 0                   | 0                   | 76,97993            |
| 1,29328    | 38,90996       | 210,9875 | 9,377222     | 0              | 0                   | 0                   | 77,8199             |
| 1,39466    | 39,46535       | 222,4153 | 9,885123     | 0              | 0                   | 0                   | 78,93072            |
| 1,47412    | 39,90012       | 233,6687 | 10,38528     | 0              | 0                   | 0                   | 79,80026            |
| 1,58372    | 40,49988       | 244,9239 | 10,8855      | 0              | 0                   | 0                   | 80,99978            |
| 1,6988     | 41,12999       | 256,3989 | 11,39551     | 0              | 0                   | 0                   | 82,25996            |
| 1,81936    | 41,78993       | 268,1255 | 11,91669     | 0              | 0                   | 0                   | 83,57985            |
| 1,94266    | 42,46517       | 279,4865 | 12,42162     | 0              | 0                   | 0                   | 84,93035            |
| 2,07144    | 43,16973       | 290,8469 | 12,92653     | 0              | 0                   | 0                   | 86,33948            |
| 2,23858    | 44,08467       | 302,5294 | 13,44575     | 0              | 0                   | 0                   | 88,16936            |

## Продовження табл. Т.2

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 2,41394    | 45,04424       | 313,9967 | 13,95541     | 0              | 0                    | 0                    | 90,08847            |
| 2,59478    | 46,03518       | 325,5241 | 14,46774     | 0              | 0                    | 0                    | 92,07036            |
| 2,78384    | 47,06996       | 336,7778 | 14,9679      | 0              | 0                    | 0                    | 94,13991            |
| 3,01674    | 48,34494       | 348,1867 | 15,47496     | 0              | 0                    | 0                    | 96,68993            |
| 3,30718    | 49,93488       | 359,8167 | 15,99185     | 0              | 0                    | 0                    | 99,86976            |
| 3,61406    | 51,61536       | 371,1217 | 16,4943      | 0              | 0                    | 0                    | 103,2307            |
| 4,07438    | 54,135         | 382,3848 | 16,99488     | 0              | 0                    | 0                    | 108,27              |
| 4,9731     | 59,05521       | 370,9838 | 16,48817     | 0              | 0                    | 0                    | 118,1105            |
| 5,0005     | 59,20488       | 359,4733 | 15,97659     | 0              | 0                    | 0                    | 118,4098            |
| 5,02242    | 59,32526       | 347,7184 | 15,45415     | 0              | 0                    | 0                    | 118,6506            |
| 5,03064    | 59,37017       | 342,1692 | 15,20752     | 0              | 0                    | 0                    | 118,7403            |

## Зразок №4.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,07946    | 0,34272        | 4,187893 | 0,186129     | 0              | 0                    | 0                    | 0,68544             |
| 0,10686    | 0,52581        | 16,47953 | 0,732424     | 0              | 0                    | 0                    | 1,05162             |
| 0,13426    | 0,6987         | 28,77699 | 1,278977     | 0              | 0                    | 0                    | 1,397401            |
| 0,1644     | 0,87873        | 40,28729 | 1,790546     | 0              | 0                    | 0                    | 1,757461            |
| 0,20002    | 1,082985       | 52,06041 | 2,313796     | 0              | 0                    | 0                    | 2,165971            |
| 0,24112    | 1,314015       | 63,89451 | 2,839756     | 0              | 0                    | 0                    | 2,628031            |
| 0,29044    | 1,587375       | 75,64554 | 3,362023     | 0              | 0                    | 0                    | 3,174751            |
| 0,35346    | 1,934176       | 87,0489  | 3,86884      | 0              | 0                    | 0                    | 3,868352            |
| 0,64664    | 3,539912       | 98,36249 | 4,371665     | 0              | 0                    | 0                    | 7,079823            |
| 0,72062    | 3,945107       | 110,2314 | 4,899173     | 0              | 0                    | 0                    | 7,890215            |
| 0,7672     | 4,200107       | 121,706  | 5,409158     | 0              | 0                    | 0                    | 8,400213            |
| 0,822      | 4,499987       | 133,1432 | 5,917473     | 0              | 0                    | 0                    | 8,999973            |
| 0,8768     | 4,799867       | 144,399  | 6,417729     | 0              | 0                    | 0                    | 9,599733            |
| 0,93434    | 5,115047       | 155,7377 | 6,921675     | 0              | 0                    | 0                    | 10,23009            |
| 0,99462    | 5,445275       | 167,0278 | 7,423457     | 0              | 0                    | 0                    | 10,89054            |
| 1,06038    | 5,80482        | 178,5673 | 7,936326     | 0              | 0                    | 0                    | 11,60964            |
| 1,12888    | 6,180183       | 189,8291 | 8,436852     | 0              | 0                    | 0                    | 12,36037            |
| 1,20286    | 6,585125       | 201,1356 | 8,939358     | 0              | 0                    | 0                    | 13,17024            |
| 1,28232    | 7,019897       | 212,5242 | 9,445523     | 0              | 0                    | 0                    | 14,0398             |
| 1,36726    | 7,485017       | 223,8465 | 9,948731     | 0              | 0                    | 0                    | 14,97004            |
| 1,45768    | 7,980228       | 235,1178 | 10,44968     | 0              | 0                    | 0                    | 15,96046            |
| 1,55632    | 8,520318       | 246,4101 | 10,95156     | 0              | 0                    | 0                    | 17,04064            |
| 1,66318    | 9,105035       | 257,7037 | 11,45349     | 0              | 0                    | 0                    | 18,21007            |
| 1,781      | 9,749673       | 269,049  | 11,95773     | 0              | 0                    | 0                    | 19,49935            |
| 1,91252    | 10,46979       | 280,5176 | 12,46745     | 0              | 0                    | 0                    | 20,93959            |
| 2,05774    | 11,26514       | 291,9384 | 12,97504     | 0              | 0                    | 0                    | 22,53028            |
| 2,2194     | 12,14999       | 303,2013 | 13,47561     | 0              | 0                    | 0                    | 24,29998            |
| 2,40572    | 13,16974       | 314,5237 | 13,97883     | 0              | 0                    | 0                    | 26,33947            |
| 2,62492    | 14,37053       | 325,777  | 14,47898     | 0              | 0                    | 0                    | 28,74106            |
| 2,89618    | 15,85463       | 337,046  | 14,97982     | 0              | 0                    | 0                    | 31,70926            |
| 3,27704    | 17,94028       | 348,3189 | 15,48084     | 0              | 0                    | 0                    | 35,88056            |
| 4,4525     | 24,37546       | 336,8586 | 14,97149     | 0              | 0                    | 0                    | 48,75093            |
| 4,55662    | 24,94488       | 325,2715 | 14,45651     | 0              | 0                    | 0                    | 49,88975            |
| 4,61142    | 25,24476       | 313,6434 | 13,9397      | 0              | 0                    | 0                    | 50,48951            |
| 4,64704    | 25,44008       | 302,1181 | 13,42747     | 0              | 0                    | 0                    | 50,88015            |
| 4,66074    | 25,5148        | 296,6556 | 13,18469     | 0              | 0                    | 0                    | 51,0296             |

Продовження табл. Т.2

Зразок №5.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,0822     | 0,425873       | 16,01865 | 0,71194      | 0              | 0                    | 0                    | 0,851746            |
| 0,1096     | 0,640011       | 30,80064 | 1,368917     | 0              | 0                    | 0                    | 1,280021            |
| 0,13426    | 0,822914       | 44,587   | 1,981645     | 0              | 0                    | 0                    | 1,645828            |
| 0,16166    | 1,016028       | 58,22071 | 2,587587     | 0              | 0                    | 0                    | 2,032056            |
| 0,19454    | 1,238876       | 72,07841 | 3,203484     | 0              | 0                    | 0                    | 2,477751            |
| 0,2329     | 1,493258       | 85,64085 | 3,806261     | 0              | 0                    | 0                    | 2,986516            |
| 0,27948    | 1,798097       | 99,2558  | 4,411368     | 0              | 0                    | 0                    | 3,596193            |
| 0,5754     | 3,71062        | 112,5408 | 5,001815     | 0              | 0                    | 0                    | 7,42124             |
| 0,68226    | 4,399285       | 125,8436 | 5,593048     | 0              | 0                    | 0                    | 8,798567            |
| 0,72884    | 4,699318       | 139,8436 | 6,215273     | 0              | 0                    | 0                    | 9,398633            |
| 0,77816    | 5,017371       | 153,6991 | 6,831069     | 0              | 0                    | 0                    | 10,03474            |
| 0,83296    | 5,370861       | 167,0325 | 7,423662     | 0              | 0                    | 0                    | 10,74173            |
| 0,89324    | 5,759192       | 180,4664 | 8,020729     | 0              | 0                    | 0                    | 11,51839            |
| 0,95626    | 6,165845       | 193,7988 | 8,613279     | 0              | 0                    | 0                    | 12,33169            |
| 1,02476    | 6,607335       | 207,3296 | 9,214649     | 0              | 0                    | 0                    | 13,21468            |
| 1,09874    | 7,084266       | 220,973  | 9,821017     | 0              | 0                    | 0                    | 14,16853            |
| 1,17546    | 7,579217       | 234,3038 | 10,4135      | 0              | 0                    | 0                    | 15,15843            |
| 1,25766    | 8,108703       | 247,5585 | 11,0026      | 0              | 0                    | 0                    | 16,21741            |
| 1,34808    | 8,69165        | 261,1034 | 11,60459     | 0              | 0                    | 0                    | 17,3833             |
| 1,44398    | 9,310637       | 274,544  | 12,20196     | 0              | 0                    | 0                    | 18,62127            |
| 1,5481     | 9,981882       | 288,0795 | 12,80353     | 0              | 0                    | 0                    | 19,96376            |
| 1,66044    | 10,70598       | 301,4695 | 13,39864     | 0              | 0                    | 0                    | 21,41197            |
| 1,78374    | 11,50097       | 314,9926 | 13,99967     | 0              | 0                    | 0                    | 23,00194            |
| 1,918      | 12,36623       | 328,4658 | 14,59848     | 0              | 0                    | 0                    | 24,73246            |
| 2,06322    | 13,30327       | 341,7888 | 15,19061     | 0              | 0                    | 0                    | 26,60654            |
| 2,22488    | 14,34513       | 355,1657 | 15,78514     | 0              | 0                    | 0                    | 28,69025            |
| 2,40572    | 15,51162       | 368,5296 | 16,37909     | 0              | 0                    | 0                    | 31,02325            |
| 2,60848    | 16,81807       | 381,7882 | 16,96836     | 0              | 0                    | 0                    | 33,63615            |
| 2,84412    | 18,33746       | 395,1579 | 17,56257     | 0              | 0                    | 0                    | 36,67492            |
| 3,12086    | 20,12234       | 408,4453 | 18,15313     | 0              | 0                    | 0                    | 40,24469            |
| 3,47706    | 22,41929       | 421,7783 | 18,7457      | 0              | 0                    | 0                    | 44,83859            |
| 4,05794    | 26,16415       | 435,0303 | 19,33468     | 0              | 0                    | 0                    | 52,32829            |
| 4,9594     | 31,9768        | 421,5693 | 18,73641     | 0              | 0                    | 0                    | 63,95362            |
| 5,04982    | 32,56005       | 408,0491 | 18,13551     | 0              | 0                    | 0                    | 65,12009            |
| 5,08544    | 32,7895        | 394,6833 | 17,54148     | 0              | 0                    | 0                    | 65,57902            |
| 5,10736    | 32,93156       | 380,2683 | 16,90081     | 0              | 0                    | 0                    | 65,8631             |
| 5,1101     | 32,94898       | 377,5666 | 16,78074     | 0              | 0                    | 0                    | 65,89797            |

Зразок №6.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,07946    | 0,403648       | 5,335425 | 0,23713      | 0              | 0                    | 0                    | 0,807297            |
| 0,10412    | 0,597964       | 18,58778 | 0,826124     | 0              | 0                    | 0                    | 1,195928            |
| 0,12878    | 0,78327        | 32,74567 | 1,455363     | 0              | 0                    | 0                    | 1,56654             |
| 0,15618    | 0,977886       | 47,21233 | 2,098326     | 0              | 0                    | 0                    | 1,955772            |
| 0,18632    | 1,183915       | 61,06543 | 2,71402      | 0              | 0                    | 0                    | 2,367829            |
| 0,22194    | 1,421478       | 75,30251 | 3,346778     | 0              | 0                    | 0                    | 2,842957            |
| 0,2603     | 1,673458       | 89,20833 | 3,964815     | 0              | 0                    | 0                    | 3,346916            |
| 0,30688    | 1,976495       | 102,7684 | 4,567486     | 0              | 0                    | 0                    | 3,952989            |
| 0,63568    | 4,098951       | 116,0395 | 5,15731      | 0              | 0                    | 0                    | 8,197902            |
| 0,70692    | 4,557561       | 129,5391 | 5,757295     | 0              | 0                    | 0                    | 9,11512             |
| 0,75076    | 4,840475       | 143,0897 | 6,359544     | 0              | 0                    | 0                    | 9,680948            |

## Продовження табл. Т.2

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 0,80282 | 5,176247 | 156,7429 | 6,966352 | 0 | 0 | 0 | 10,3525  |
| 0,86036 | 5,547457 | 170,1219 | 7,560975 | 0 | 0 | 0 | 11,09492 |
| 0,92612 | 5,971229 | 183,4126 | 8,15167  | 0 | 0 | 0 | 11,94246 |
| 1,0001  | 6,448759 | 197,0123 | 8,756104 | 0 | 0 | 0 | 12,89752 |
| 1,0823  | 6,977948 | 210,4887 | 9,355051 | 0 | 0 | 0 | 13,9559  |
| 1,17546 | 7,578915 | 224,1037 | 9,960163 | 0 | 0 | 0 | 15,15783 |
| 1,27958 | 8,25016  | 237,5871 | 10,55943 | 0 | 0 | 0 | 16,50032 |
| 1,39466 | 8,992584 | 250,8794 | 11,1502  | 0 | 0 | 0 | 17,98517 |
| 1,52618 | 9,840425 | 264,2293 | 11,74352 | 0 | 0 | 0 | 19,68085 |
| 1,67688 | 10,8111  | 277,6022 | 12,33788 | 0 | 0 | 0 | 21,62221 |
| 1,8495  | 11,92504 | 290,867  | 12,92743 | 0 | 0 | 0 | 23,85008 |
| 2,05226 | 13,23209 | 304,1513 | 13,51783 | 0 | 0 | 0 | 26,46418 |
| 2,29612 | 14,80464 | 317,4645 | 14,10953 | 0 | 0 | 0 | 29,60928 |
| 2,59478 | 16,73008 | 330,7253 | 14,6989  | 0 | 0 | 0 | 33,46015 |
| 2,9729  | 19,16788 | 344,0378 | 15,29057 | 0 | 0 | 0 | 38,33576 |
| 3,56748 | 23,00194 | 357,3167 | 15,88075 | 0 | 0 | 0 | 46,00388 |
| 4,93748 | 31,83505 | 360,6097 | 16,0271  | 0 | 0 | 0 | 63,67012 |
| 5,6307  | 36,30461 | 347,31   | 15,436   | 0 | 0 | 0 | 72,60921 |
| 5,87456 | 37,87776 | 333,9552 | 14,84245 | 0 | 0 | 0 | 75,7555  |
| 6,01978 | 38,81389 | 320,4168 | 14,24075 | 0 | 0 | 0 | 77,62778 |
| 6,08828 | 39,25539 | 307,0774 | 13,64788 | 0 | 0 | 0 | 78,51076 |
| 6,1376  | 39,57314 | 293,6162 | 13,04961 | 0 | 0 | 0 | 79,14628 |
| 6,14856 | 39,64342 | 288,869  | 12,83862 | 0 | 0 | 0 | 79,28683 |

## Зразок №7.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Extens.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                    |
| 0,0822     | 0,425873       | 13,12357 | 0,58327      | 0              | 0                    | 0                    | 0,851746             |
| 0,10412    | 0,597964       | 28,24021 | 1,255121     | 0              | 0                    | 0                    | 1,195928             |
| 0,12604    | 0,763448       | 42,30609 | 1,880271     | 0              | 0                    | 0                    | 1,526896             |
| 0,1507     | 0,939443       | 55,59228 | 2,470767     | 0              | 0                    | 0                    | 1,878886             |
| 0,17262    | 1,091412       | 69,12885 | 3,072395     | 0              | 0                    | 0                    | 2,182824             |
| 0,21098    | 1,349098       | 83,41649 | 3,7074       | 0              | 0                    | 0                    | 2,698196             |
| 0,2466     | 1,583659       | 96,7223  | 4,298769     | 0              | 0                    | 0                    | 3,167317             |
| 0,40552    | 2,614403       | 110,3075 | 4,902554     | 0              | 0                    | 0                    | 5,228806             |
| 0,62746    | 4,046092       | 123,7446 | 5,499757     | 0              | 0                    | 0                    | 8,092183             |
| 0,66856    | 4,310686       | 137,079  | 6,092403     | 0              | 0                    | 0                    | 8,621372             |
| 0,70418    | 4,539841       | 150,8291 | 6,703514     | 0              | 0                    | 0                    | 9,079684             |
| 0,7535     | 4,857894       | 164,2174 | 7,298551     | 0              | 0                    | 0                    | 9,715785             |
| 0,8083     | 5,211687       | 177,7359 | 7,899374     | 0              | 0                    | 0                    | 10,42337             |
| 0,86584    | 5,582898       | 191,2756 | 8,501136     | 0              | 0                    | 0                    | 11,1658              |
| 0,92886    | 5,989249       | 205,1772 | 9,118984     | 0              | 0                    | 0                    | 11,9785              |
| 0,99462    | 6,413323       | 218,8844 | 9,728198     | 0              | 0                    | 0                    | 12,82664             |
| 1,0686     | 6,889348       | 232,4427 | 10,33079     | 0              | 0                    | 0                    | 13,7787              |
| 1,1645     | 7,508335       | 245,8612 | 10,92716     | 0              | 0                    | 0                    | 15,01668             |
| 1,2467     | 8,038425       | 259,1387 | 11,51728     | 0              | 0                    | 0                    | 16,07685             |
| 1,35356    | 8,726789       | 272,622  | 12,11653     | 0              | 0                    | 0                    | 17,45358             |
| 1,47138    | 9,487535       | 286,1521 | 12,71787     | 0              | 0                    | 0                    | 18,97507             |
| 1,60016    | 10,31796       | 299,4145 | 13,30731     | 0              | 0                    | 0                    | 20,63592             |
| 1,76182    | 11,35981       | 312,7157 | 13,89848     | 0              | 0                    | 0                    | 22,71963             |
| 1,93992    | 12,50799       | 326,0518 | 14,49119     | 0              | 0                    | 0                    | 25,01597             |
| 2,12898    | 13,72704       | 339,4075 | 15,08478     | 0              | 0                    | 0                    | 27,45408             |
| 2,36736    | 15,26415       | 352,6583 | 15,6737      | 0              | 0                    | 0                    | 30,5283              |
| 2,70986    | 17,4722        | 365,9864 | 16,26607     | 0              | 0                    | 0                    | 34,9444              |
| 3,0825     | 19,87487       | 379,3479 | 16,85991     | 0              | 0                    | 0                    | 39,74974             |
| 3,78668    | 24,41501       | 392,9442 | 17,46418     | 0              | 0                    | 0                    | 48,83002             |
| 5,15668    | 33,24901       | 395,0828 | 17,55923     | 0              | 0                    | 0                    | 66,49804             |

## Продовження табл. Т.2

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 5,77592 | 37,24075 | 381,7507 | 16,9667  | 0 | 0 | 0 | 74,48148 |
| 6,13486 | 39,55572 | 368,457  | 16,37587 | 0 | 0 | 0 | 79,11146 |
| 6,35954 | 41,00423 | 354,9044 | 15,77353 | 0 | 0 | 0 | 82,00844 |
| 6,43626 | 41,49887 | 341,2808 | 15,16803 | 0 | 0 | 0 | 82,99774 |
| 6,48832 | 41,83465 | 327,0669 | 14,5363  | 0 | 0 | 0 | 83,6693  |
| 6,51572 | 42,01095 | 314,1115 | 13,96051 | 0 | 0 | 0 | 84,02191 |

Зразок №8.

| "Time<br>sec" | "Extension<br>mm" | "Load N" | "Stress<br>MPa" | "Cycle<br>Count " | "Total<br>Cycle<br>Count " | "Repetitions<br>Count " | "Strain<br>[Exten.]<br>%" |
|---------------|-------------------|----------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 0             | 0                 | 0        | 0               | 0                 | 0                          | 0                       | 0                         |
| 0,096         | 0,426173          | 3,437105 | 0,15276         | 0                 | 0                          | 0                       | 0,852347                  |
| 0,128         | 0,640311          | 17,91238 | 0,796106        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,280622                  |
| 0,1568        | 0,823214          | 31,22497 | 1,387776        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,646428                  |
| 0,192         | 1,034949          | 45,45364 | 2,020162        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,069899                  |
| 0,2304        | 1,257196          | 58,87203 | 2,616534        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,514392                  |
| 0,2752        | 1,511278          | 72,21976 | 3,209766        | 0                 | 0                          | 0                       | 3,022556                  |
| 0,3296        | 1,816117          | 85,94337 | 3,819705        | 0                 | 0                          | 0                       | 3,632233                  |
| 0,3904        | 2,153691          | 99,46022 | 4,420454        | 0                 | 0                          | 0                       | 4,307383                  |
| 0,7104        | 3,922055          | 112,7134 | 5,009482        | 0                 | 0                          | 0                       | 7,844111                  |
| 0,8384        | 4,62874           | 126,3741 | 5,616627        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,257478                  |
| 0,896         | 4,946493          | 139,993  | 6,221914        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,892985                  |
| 0,9536        | 5,264846          | 153,3271 | 6,814539        | 0                 | 0                          | 0                       | 10,52969                  |
| 1,0176        | 5,618037          | 166,9552 | 7,420228        | 0                 | 0                          | 0                       | 11,23607                  |
| 1,088         | 6,00667           | 180,5228 | 8,023235        | 0                 | 0                          | 0                       | 12,01334                  |
| 1,1616        | 6,413323          | 194,3337 | 8,637055        | 0                 | 0                          | 0                       | 12,82664                  |
| 1,2384        | 6,836788          | 207,9549 | 9,242437        | 0                 | 0                          | 0                       | 13,67358                  |
| 1,3184        | 7,278882          | 221,3135 | 9,836153        | 0                 | 0                          | 0                       | 14,55776                  |
| 1,4048        | 7,755813          | 234,7785 | 10,4346         | 0                 | 0                          | 0                       | 15,51162                  |
| 1,4976        | 8,26818           | 248,3651 | 11,03845        | 0                 | 0                          | 0                       | 16,53636                  |
| 1,5968        | 8,815686          | 261,9856 | 11,6438         | 0                 | 0                          | 0                       | 17,63138                  |
| 1,6992        | 9,380915          | 275,2398 | 12,23288        | 0                 | 0                          | 0                       | 18,76183                  |
| 1,8112        | 9,999605          | 288,7064 | 12,8314         | 0                 | 0                          | 0                       | 19,99921                  |
| 1,9296        | 10,65343          | 302,0615 | 13,42495        | 0                 | 0                          | 0                       | 21,30686                  |
| 2,0576        | 11,35981          | 315,5213 | 14,02317        | 0                 | 0                          | 0                       | 22,71963                  |
| 2,192         | 12,10134          | 328,8519 | 14,61564        | 0                 | 0                          | 0                       | 24,20267                  |
| 2,3392        | 12,91434          | 342,2029 | 15,20902        | 0                 | 0                          | 0                       | 25,82868                  |
| 2,4992        | 13,79762          | 355,6031 | 15,80458        | 0                 | 0                          | 0                       | 27,59524                  |
| 2,672         | 14,75148          | 369,0343 | 16,40152        | 0                 | 0                          | 0                       | 29,50296                  |
| 2,864         | 15,81196          | 382,3873 | 16,99499        | 0                 | 0                          | 0                       | 31,62391                  |
| 3,072         | 16,96043          | 395,7203 | 17,58757        | 0                 | 0                          | 0                       | 33,92086                  |
| 3,3056        | 18,24977          | 409,0432 | 18,1797         | 0                 | 0                          | 0                       | 36,49953                  |
| 3,5648        | 19,68085          | 422,3168 | 18,76963        | 0                 | 0                          | 0                       | 39,3617                   |
| 3,872         | 21,37654          | 435,6551 | 19,36245        | 0                 | 0                          | 0                       | 42,75307                  |
| 4,2368        | 23,39027          | 448,9887 | 19,95506        | 0                 | 0                          | 0                       | 46,78055                  |
| 4,72          | 26,05813          | 462,269  | 20,54529        | 0                 | 0                          | 0                       | 52,11627                  |
| 6,2592        | 34,55607          | 448,7716 | 19,94541        | 0                 | 0                          | 0                       | 69,11216                  |
| 6,3552        | 35,08586          | 435,2287 | 19,34349        | 0                 | 0                          | 0                       | 70,17174                  |
| 6,4288        | 35,4925           | 421,8121 | 18,7472         | 0                 | 0                          | 0                       | 70,98502                  |
| 6,4768        | 35,7571           | 408,2757 | 18,14559        | 0                 | 0                          | 0                       | 71,51423                  |
| 6,5152        | 35,96944          | 394,342  | 17,52631        | 0                 | 0                          | 0                       | 71,93886                  |
| 6,5248        | 36,02229          | 389,8637 | 17,32727        | 0                 | 0                          | 0                       | 72,0446                   |

## Продовження табл. Т.2

Зразок №9.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,096      | 0,40205        | 13,53567 | 0,601586     | 0              | 0                    | 0                    | 0,804101            |
| 0,1248     | 0,584517       | 26,23418 | 1,165964     | 0              | 0                    | 0                    | 1,169034            |
| 0,1536     | 0,757917       | 39,57592 | 1,75893      | 0              | 0                    | 0                    | 1,515834            |
| 0,1856     | 0,940667       | 52,7309  | 2,343596     | 0              | 0                    | 0                    | 1,881334            |
| 0,224      | 1,151467       | 65,5289  | 2,912396     | 0              | 0                    | 0                    | 2,302935            |
| 0,272      | 1,408734       | 78,23905 | 3,477291     | 0              | 0                    | 0                    | 2,817468            |
| 0,3296     | 1,713318       | 91,3242  | 4,058854     | 0              | 0                    | 0                    | 3,426635            |
| 0,576      | 3,000218       | 103,835  | 4,61489      | 0              | 0                    | 0                    | 6,000435            |
| 0,7808     | 4,066685       | 116,6927 | 5,18634      | 0              | 0                    | 0                    | 8,13337             |
| 0,848      | 4,416886       | 129,7031 | 5,76458      | 0              | 0                    | 0                    | 8,83377             |
| 0,9152     | 4,766519       | 142,4762 | 6,332275     | 0              | 0                    | 0                    | 9,53304             |
| 0,9856     | 5,133435       | 155,182  | 6,896975     | 0              | 0                    | 0                    | 10,26687            |
| 1,0688     | 5,566935       | 168,0537 | 7,46905      | 0              | 0                    | 0                    | 11,13387            |
| 1,1552     | 6,01687        | 180,5933 | 8,02637      | 0              | 0                    | 0                    | 12,03374            |
| 1,2544     | 6,53282        | 193,4031 | 8,595695     | 0              | 0                    | 0                    | 13,06564            |
| 1,3664     | 7,116485       | 206,1963 | 9,16428      | 0              | 0                    | 0                    | 14,23298            |
| 1,4912     | 7,766455       | 218,7066 | 9,720295     | 0              | 0                    | 0                    | 15,53291            |
| 1,632      | 8,500005       | 231,2681 | 10,27858     | 0              | 0                    | 0                    | 17,00001            |
| 1,7952     | 9,350005       | 244,004  | 10,84463     | 0              | 0                    | 0                    | 18,70001            |
| 1,984      | 10,33317       | 256,6314 | 11,40584     | 0              | 0                    | 0                    | 20,66634            |
| 2,2016     | 11,46622       | 269,2688 | 11,9675      | 0              | 0                    | 0                    | 22,93245            |
| 2,4608     | 12,81659       | 281,793  | 12,52413     | 0              | 0                    | 0                    | 25,63318            |
| 2,7808     | 14,48373       | 294,3907 | 13,08403     | 0              | 0                    | 0                    | 28,96745            |
| 3,1936     | 16,63366       | 306,9281 | 13,64125     | 0              | 0                    | 0                    | 33,26732            |
| 3,8208     | 19,90049       | 319,4374 | 14,19722     | 0              | 0                    | 0                    | 39,80099            |
| 5,4208     | 28,23361       | 315,02   | 14,00089     | 0              | 0                    | 0                    | 56,4672             |
| 5,6        | 29,16663       | 302,4635 | 13,44282     | 0              | 0                    | 0                    | 58,33325            |
| 5,68       | 29,58313       | 289,3862 | 12,86161     | 0              | 0                    | 0                    | 59,16625            |
| 5,7312     | 29,85031       | 275,9031 | 12,26236     | 0              | 0                    | 0                    | 59,7006             |
| 5,7376     | 29,88347       | 273,8078 | 12,16923     | 0              | 0                    | 0                    | 59,76695            |

Зразок №10.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,0992     | 0,422734       | 7,527145 | 0,33454      | 0              | 0                    | 0                    | 0,845467            |
| 0,1376     | 0,662717       | 20,94971 | 0,931098     | 0              | 0                    | 0                    | 1,325434            |
| 0,1824     | 0,922817       | 33,56632 | 1,491837     | 0              | 0                    | 0                    | 1,845634            |
| 0,2336     | 1,203601       | 46,35738 | 2,060328     | 0              | 0                    | 0                    | 2,407201            |
| 0,2784     | 1,442734       | 59,78645 | 2,657175     | 0              | 0                    | 0                    | 2,885468            |
| 0,32       | 1,662884       | 72,4766  | 3,221182     | 0              | 0                    | 0                    | 3,325768            |
| 0,3744     | 1,948201       | 85,0054  | 3,778019     | 0              | 0                    | 0                    | 3,896402            |
| 0,4416     | 2,299251       | 97,94515 | 4,353118     | 0              | 0                    | 0                    | 4,598502            |
| 0,832      | 4,333302       | 110,4528 | 4,909011     | 0              | 0                    | 0                    | 8,666605            |
| 0,8928     | 4,650069       | 123,1659 | 5,474035     | 0              | 0                    | 0                    | 9,30014             |
| 0,944      | 4,916686       | 136,0691 | 6,047515     | 0              | 0                    | 0                    | 9,83337             |
| 1,0048     | 5,23345        | 148,8565 | 6,615845     | 0              | 0                    | 0                    | 10,46691            |
| 1,0688     | 5,566935       | 161,8601 | 7,19378      | 0              | 0                    | 0                    | 11,13387            |
| 1,136      | 5,91685        | 174,6005 | 7,76002      | 0              | 0                    | 0                    | 11,83371            |
| 1,2064     | 6,283205       | 187,1674 | 8,31855      | 0              | 0                    | 0                    | 12,56641            |
| 1,28       | 6,666555       | 199,845  | 8,882        | 0              | 0                    | 0                    | 13,33311            |
| 1,36       | 7,083055       | 212,6688 | 9,451945     | 0              | 0                    | 0                    | 14,16611            |

## Продовження табл. Т.2

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 1,4432     | 7,516835       | 225,2691 | 10,01196     | 0              | 0                    | 0                    | 15,03367            |
| 1,5296     | 7,966205       | 237,8134 | 10,56949     | 0              | 0                    | 0                    | 15,93241            |
| 1,6224     | 8,450135       | 250,341  | 11,12627     | 0              | 0                    | 0                    | 16,90028            |
| 1,7216     | 8,966935       | 263,0788 | 11,69239     | 0              | 0                    | 0                    | 17,93388            |
| 1,8304     | 9,533605       | 275,8754 | 12,26113     | 0              | 0                    | 0                    | 19,06721            |
| 1,9424     | 10,11671       | 288,4151 | 12,81845     | 0              | 0                    | 0                    | 20,23341            |
| 2,064      | 10,74996       | 301,0072 | 13,3781      | 0              | 0                    | 0                    | 21,49991            |
| 2,1952     | 11,43279       | 313,5171 | 13,9341      | 0              | 0                    | 0                    | 22,86558            |
| 2,3392     | 12,18334       | 326,2632 | 14,50059     | 0              | 0                    | 0                    | 24,36668            |
| 2,4928     | 12,98347       | 338,7749 | 15,05666     | 0              | 0                    | 0                    | 25,96695            |
| 2,6592     | 13,84991       | 351,3878 | 15,61724     | 0              | 0                    | 0                    | 27,69981            |
| 2,8416     | 14,79993       | 363,9372 | 16,17499     | 0              | 0                    | 0                    | 29,59985            |
| 3,0432     | 15,84939       | 376,4823 | 16,73255     | 0              | 0                    | 0                    | 31,69878            |
| 3,264      | 17,00001       | 389,1381 | 17,29503     | 0              | 0                    | 0                    | 34,00002            |
| 3,5104     | 18,28323       | 401,6446 | 17,85087     | 0              | 0                    | 0                    | 36,56645            |
| 3,792      | 19,75061       | 414,2564 | 18,4114      | 0              | 0                    | 0                    | 39,50122            |
| 4,1184     | 21,45005       | 426,7711 | 18,9676      | 0              | 0                    | 0                    | 42,90009            |
| 4,5216     | 23,54983       | 439,3012 | 19,5245      | 0              | 0                    | 0                    | 47,09966            |
| 5,0848     | 26,48318       | 451,8366 | 20,08163     | 0              | 0                    | 0                    | 52,96635            |
| 6,2688     | 32,64993       | 439,2389 | 19,52173     | 0              | 0                    | 0                    | 65,29985            |
| 6,3776     | 33,2166        | 426,404  | 18,95129     | 0              | 0                    | 0                    | 66,4332             |
| 6,4352     | 33,51722       | 413,1688 | 18,36306     | 0              | 0                    | 0                    | 67,03445            |
| 6,4736     | 33,71669       | 400,0933 | 17,78192     | 0              | 0                    | 0                    | 67,43335            |
| 6,5024     | 33,86713       | 387,9723 | 17,24322     | 0              | 0                    | 0                    | 67,73425            |

Таблиця Т.3

Результати випробувань зразків з ПВХ з додаванням частинок довгої фракції ( $l/d = 8 \dots 10$ ) у напрямку перпендикулярному до відливу, отриманих на розривній машині „Instron-4200” при температурі  $T=20^{\circ}\text{C}$ .

## Зразок №1.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,081      | 0,301155       | 2,532154 | 0,12352      | 0              | 0                    | 0                    | 0,60231             |
| 0,102      | 0,432225       | 9,696452 | 0,472998     | 0              | 0                    | 0                    | 0,86445             |
| 0,12       | 0,540855       | 21,86758 | 1,066711     | 0              | 0                    | 0                    | 1,08171             |
| 0,138      | 0,64617        | 34,31133 | 1,673723     | 0              | 0                    | 0                    | 1,292341            |
| 0,156      | 0,74715        | 46,17774 | 2,252573     | 0              | 0                    | 0                    | 1,494301            |
| 0,177      | 0,8619         | 58,78994 | 2,867801     | 0              | 0                    | 0                    | 1,723801            |
| 0,201      | 0,989145       | 71,33972 | 3,479986     | 0              | 0                    | 0                    | 1,978291            |
| 0,453      | 2,264911       | 82,59309 | 4,028932     | 0              | 0                    | 0                    | 4,529822            |
| 0,573      | 2,865181       | 94,22451 | 4,596318     | 0              | 0                    | 0                    | 5,730363            |
| 0,606      | 3,029911       | 105,9412 | 5,167863     | 0              | 0                    | 0                    | 6,059822            |
| 0,633      | 3,165571       | 117,5512 | 5,734206     | 0              | 0                    | 0                    | 6,331145            |
| 0,66       | 3,300211       | 129,0525 | 6,295244     | 0              | 0                    | 0                    | 6,600425            |
| 0,69       | 3,450407       | 140,9153 | 6,873917     | 0              | 0                    | 0                    | 6,900813            |

## Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 0,723  | 3,614626 | 153,1795 | 7,472174 | 0 | 0 | 0 | 7,229255 |
| 0,756  | 3,780122 | 164,8027 | 8,03916  | 0 | 0 | 0 | 7,560243 |
| 0,792  | 3,960152 | 176,9526 | 8,631837 | 0 | 0 | 0 | 7,920306 |
| 0,828  | 4,139927 | 188,606  | 9,200291 | 0 | 0 | 0 | 8,279852 |
| 0,864  | 4,319957 | 199,9174 | 9,752067 | 0 | 0 | 0 | 8,639915 |
| 0,903  | 4,515035 | 211,6152 | 10,32269 | 0 | 0 | 0 | 9,030065 |
| 0,942  | 4,710105 | 222,9084 | 10,87358 | 0 | 0 | 0 | 9,420215 |
| 0,984  | 4,920228 | 234,5891 | 11,44337 | 0 | 0 | 0 | 9,840456 |
| 1,029  | 5,145138 | 246,4807 | 12,02345 | 0 | 0 | 0 | 10,29027 |
| 1,074  | 5,3703   | 257,9877 | 12,58477 | 0 | 0 | 0 | 10,7406  |
| 1,122  | 5,610002 | 269,7656 | 13,1593  | 0 | 0 | 0 | 11,22001 |
| 1,173  | 5,864495 | 281,6658 | 13,73979 | 0 | 0 | 0 | 11,72898 |
| 1,224  | 6,119748 | 293,055  | 14,29537 | 0 | 0 | 0 | 12,2395  |
| 1,278  | 6,39005  | 304,6657 | 14,86174 | 0 | 0 | 0 | 12,78009 |
| 1,335  | 6,674882 | 316,4327 | 15,43574 | 0 | 0 | 0 | 13,34976 |
| 1,395  | 6,974762 | 328,1869 | 16,00911 | 0 | 0 | 0 | 13,94953 |
| 1,455  | 7,274898 | 339,4407 | 16,55808 | 0 | 0 | 0 | 14,5498  |
| 1,518  | 7,590078 | 350,8103 | 17,1127  | 0 | 0 | 0 | 15,18016 |
| 1,584  | 7,92005  | 362,1724 | 17,66695 | 0 | 0 | 0 | 15,8401  |
| 1,653  | 8,265065 | 373,5225 | 18,22061 | 0 | 0 | 0 | 16,53013 |
| 1,725  | 8,62538  | 384,8617 | 18,77374 | 0 | 0 | 0 | 17,25076 |
| 1,8    | 8,999973 | 396,1812 | 19,32591 | 0 | 0 | 0 | 17,99995 |
| 1,881  | 9,404658 | 407,839  | 19,89459 | 0 | 0 | 0 | 18,80932 |
| 1,962  | 9,810108 | 419,1577 | 20,44672 | 0 | 0 | 0 | 19,62022 |
| 2,139  | 10,6947  | 442,1394 | 21,56778 | 0 | 0 | 0 | 21,38941 |
| 2,232  | 11,15982 | 453,4565 | 22,11983 | 0 | 0 | 0 | 22,31965 |
| 2,328  | 11,64024 | 464,7587 | 22,67115 | 0 | 0 | 0 | 23,28049 |
| 2,43   | 12,14999 | 476,2733 | 23,23285 | 0 | 0 | 0 | 24,29998 |
| 2,535  | 12,67529 | 487,8203 | 23,7961  | 0 | 0 | 0 | 25,35058 |
| 2,646  | 13,23017 | 499,3592 | 24,35898 | 0 | 0 | 0 | 26,46034 |
| 2,76   | 13,79959 | 510,8585 | 24,91992 | 0 | 0 | 0 | 27,59917 |
| 2,877  | 14,38532 | 522,3452 | 25,48026 | 0 | 0 | 0 | 28,77064 |
| 2,997  | 14,98508 | 533,6964 | 26,03397 | 0 | 0 | 0 | 29,97017 |
| 3,123  | 15,61493 | 545,202  | 26,59523 | 0 | 0 | 0 | 31,22987 |
| 3,252  | 16,25983 | 556,6793 | 27,15508 | 0 | 0 | 0 | 32,51966 |
| 3,384  | 16,92002 | 568,0859 | 27,7115  | 0 | 0 | 0 | 33,84005 |
| 3,519  | 17,59526 | 579,344  | 28,26068 | 0 | 0 | 0 | 35,19053 |
| 3,66   | 18,30008 | 590,7681 | 28,81795 | 0 | 0 | 0 | 36,60017 |
| 3,804  | 19,0202  | 602,1999 | 29,3756  | 0 | 0 | 0 | 38,04041 |
| 3,951  | 19,75511 | 613,4765 | 29,92568 | 0 | 0 | 0 | 39,51023 |
| 4,101  | 20,50507 | 624,8516 | 30,48056 | 0 | 0 | 0 | 41,01014 |
| 4,254  | 21,27007 | 636,1169 | 31,0301  | 0 | 0 | 0 | 42,54013 |
| 4,41   | 22,05012 | 647,3786 | 31,57944 | 0 | 0 | 0 | 44,10023 |
| 4,572  | 22,86025 | 658,7609 | 32,13468 | 0 | 0 | 0 | 45,7205  |
| 4,737  | 23,68467 | 670,1247 | 32,689   | 0 | 0 | 0 | 47,36934 |
| 4,905  | 24,52489 | 681,4854 | 33,24319 | 0 | 0 | 0 | 49,04978 |
| 5,079  | 25,39495 | 692,8587 | 33,79799 | 0 | 0 | 0 | 50,78988 |
| 5,256  | 26,2798  | 704,2127 | 34,35183 | 0 | 0 | 0 | 52,5596  |
| 5,439  | 27,19499 | 715,6467 | 34,90959 | 0 | 0 | 0 | 54,39002 |
| 5,625  | 28,12524 | 727,0731 | 35,46699 | 0 | 0 | 0 | 56,2505  |
| 5,817  | 29,08531 | 738,491  | 36,02396 | 0 | 0 | 0 | 58,17065 |
| 6,009  | 30,04513 | 749,7729 | 36,57429 | 0 | 0 | 0 | 60,09026 |
| 6,207  | 31,03504 | 761,0369 | 37,12374 | 0 | 0 | 0 | 62,07008 |
| 6,411  | 32,05555 | 772,4439 | 37,68019 | 0 | 0 | 0 | 64,1111  |
| 6,621  | 33,10539 | 783,7133 | 38,22992 | 0 | 0 | 0 | 66,2108  |
| 6,2417 | 34,17027 | 794,9723 | 38,77913 | 0 | 0 | 0 | 68,34056 |



## Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 6,4472 | 35,29482 | 806,3766 | 39,33545 | 0 | 0 | 0 | 70,58966 |
| 6,6582 | 36,44997 | 817,6613 | 39,88592 | 0 | 0 | 0 | 72,89996 |
| 6,8801 | 37,66454 | 829,0265 | 40,44032 | 0 | 0 | 0 | 75,32906 |
| 7,1075 | 38,91047 | 840,2994 | 40,99022 | 0 | 0 | 0 | 77,82093 |
| 7,3486 | 40,23009 | 851,5886 | 41,54091 | 0 | 0 | 0 | 80,46018 |
| 7,6117 | 41,67034 | 862,9385 | 42,09457 | 0 | 0 | 0 | 83,34068 |
| 7,8966 | 43,22992 | 874,278  | 42,64771 | 0 | 0 | 0 | 86,45981 |
| 8,2254 | 45,02997 | 885,5861 | 43,19932 | 0 | 0 | 0 | 90,0599  |
| 8,6474 | 47,34027 | 896,8604 | 43,74929 | 0 | 0 | 0 | 94,68054 |
| 9,0255 | 49,41036 | 885,3264 | 43,18665 | 0 | 0 | 0 | 98,82072 |
| 9,0365 | 49,47026 | 859,0599 | 41,90536 | 0 | 0 | 0 | 98,94056 |
| 9,0392 | 49,48533 | 830,8188 | 40,52774 | 0 | 0 | 0 | 98,97066 |
| 9,0423 | 49,50063 | 793,0863 | 38,68714 | 0 | 0 | 0 | 99,00126 |

## Зразок №2.

| "Time<br>sec" | "Extension<br>mm" | "Load N" | "Stress<br>MPa" | "Cycle<br>Count " | "Total<br>Cycle<br>Count " | "Repetitions<br>Count " | "Strain<br>[Exten.]<br>%" |
|---------------|-------------------|----------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 0             | 0                 | 0        | 0               | 0                 | 0                          | 0                       | 0                         |
| 0,0685        | 0,267495          | 0,712436 | 0,034753        | 0                 | 0                          | 0                       | 0,53499                   |
| 0,08494       | 0,37944           | 10,73051 | 0,52344         | 0                 | 0                          | 0                       | 0,75888                   |
| 0,10412       | 0,50745           | 23,73856 | 1,157978        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,0149                    |
| 0,12056       | 0,613275          | 36,7233  | 1,791381        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,226551                  |
| 0,13426       | 0,698445          | 48,66435 | 2,373871        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,396891                  |
| 0,15344       | 0,81396           | 61,27524 | 2,989036        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,627921                  |
| 0,18084       | 0,973845          | 73,00436 | 3,561188        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,947691                  |
| 0,37812       | 2,069326          | 84,31403 | 4,11288         | 0                 | 0                          | 0                       | 4,138652                  |
| 0,4932        | 2,700196          | 95,86647 | 4,676414        | 0                 | 0                          | 0                       | 5,400392                  |
| 0,52882       | 2,895271          | 107,9674 | 5,266701        | 0                 | 0                          | 0                       | 5,790542                  |
| 0,55074       | 3,014866          | 119,4003 | 5,824404        | 0                 | 0                          | 0                       | 6,029735                  |
| 0,58088       | 3,180362          | 131,6587 | 6,422378        | 0                 | 0                          | 0                       | 6,360723                  |
| 0,60554       | 3,315002          | 144,2453 | 7,036358        | 0                 | 0                          | 0                       | 6,630003                  |
| 0,63568       | 3,480242          | 156,0575 | 7,61256         | 0                 | 0                          | 0                       | 6,960483                  |
| 0,66308       | 3,629927          | 167,9162 | 8,191031        | 0                 | 0                          | 0                       | 7,259855                  |
| 0,69322       | 3,794912          | 179,5081 | 8,756492        | 0                 | 0                          | 0                       | 7,589826                  |
| 0,72336       | 3,960152          | 191,8591 | 9,358979        | 0                 | 0                          | 0                       | 7,920306                  |
| 0,75624       | 4,139927          | 203,1143 | 9,908015        | 0                 | 0                          | 0                       | 8,279852                  |
| 0,78638       | 4,304912          | 215,153  | 10,49527        | 0                 | 0                          | 0                       | 8,609823                  |
| 0,82748       | 4,530078          | 227,2949 | 11,08755        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,060156                  |
| 0,85762       | 4,695062          | 239,142  | 11,66546        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,390123                  |
| 0,89872       | 4,919972          | 251,2107 | 12,25418        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,839948                  |
| 0,94256       | 5,160182          | 263,067  | 12,83254        | 0                 | 0                          | 0                       | 10,32036                  |
| 0,97544       | 5,339957          | 274,5893 | 13,3946         | 0                 | 0                          | 0                       | 10,67991                  |
| 1,01928       | 5,57991           | 286,0305 | 13,95271        | 0                 | 0                          | 0                       | 11,15982                  |
| 1,0686        | 5,849703          | 298,0457 | 14,53882        | 0                 | 0                          | 0                       | 11,69941                  |
| 1,11518       | 6,104705          | 309,4622 | 15,09572        | 0                 | 0                          | 0                       | 12,2094                   |
| 1,15628       | 6,329867          | 321,1758 | 15,66711        | 0                 | 0                          | 0                       | 12,65974                  |
| 1,2056        | 6,599912          | 333,0125 | 16,24451        | 0                 | 0                          | 0                       | 13,19983                  |
| 1,2604        | 6,899792          | 344,8358 | 16,82126        | 0                 | 0                          | 0                       | 13,79959                  |
| 1,31794       | 7,21472           | 356,9096 | 17,41023        | 0                 | 0                          | 0                       | 14,42943                  |
| 1,37548       | 7,5299            | 368,4605 | 17,97368        | 0                 | 0                          | 0                       | 15,0598                   |
| 1,43576       | 7,860123          | 380,317  | 18,55205        | 0                 | 0                          | 0                       | 15,72025                  |
| 1,49604       | 8,189838          | 391,6655 | 19,10563        | 0                 | 0                          | 0                       | 16,37968                  |
| 1,55906       | 8,53511           | 403,2343 | 19,66997        | 0                 | 0                          | 0                       | 17,07022                  |
| 1,62482       | 8,894912          | 414,6587 | 20,22725        | 0                 | 0                          | 0                       | 17,78983                  |
| 1,70702       | 9,344732          | 426,0689 | 20,78385        | 0                 | 0                          | 0                       | 18,68947                  |

Продовження табл. Т.3

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 1,77826 | 9,735138 | 437,4159 | 21,33736 | 0 | 0 | 0 | 19,47028 |
| 1,84676 | 10,10999 | 448,7774 | 21,89158 | 0 | 0 | 0 | 20,21998 |
| 1,92074 | 10,51467 | 460,4058 | 22,45881 | 0 | 0 | 0 | 21,02935 |
| 2,01664 | 11,04023 | 472,0874 | 23,02866 | 0 | 0 | 0 | 22,08046 |
| 2,09062 | 11,44466 | 483,5471 | 23,58767 | 0 | 0 | 0 | 22,88932 |
| 2,192   | 11,99979 | 495,0171 | 24,14717 | 0 | 0 | 0 | 23,99959 |
| 2,26872 | 12,42004 | 506,2973 | 24,69742 | 0 | 0 | 0 | 24,84007 |
| 2,37558 | 13,005   | 518,0751 | 25,27196 | 0 | 0 | 0 | 26,01001 |
| 2,48244 | 13,59023 | 529,5996 | 25,83413 | 0 | 0 | 0 | 27,18046 |
| 2,56738 | 14,05458 | 541,2686 | 26,40334 | 0 | 0 | 0 | 28,10917 |
| 2,67698 | 14,65537 | 552,6792 | 26,95995 | 0 | 0 | 0 | 29,31073 |
| 2,79206 | 15,28471 | 564,4026 | 27,53183 | 0 | 0 | 0 | 30,56941 |
| 2,90714 | 15,91506 | 575,78   | 28,08683 | 0 | 0 | 0 | 31,83013 |
| 3,02496 | 16,55945 | 587,4395 | 28,65558 | 0 | 0 | 0 | 33,11891 |
| 3,14278 | 17,20512 | 598,7489 | 29,20725 | 0 | 0 | 0 | 34,41023 |
| 3,26334 | 17,86505 | 610,2666 | 29,7691  | 0 | 0 | 0 | 35,7301  |
| 3,38664 | 18,54029 | 622,0733 | 30,34504 | 0 | 0 | 0 | 37,08058 |
| 3,50994 | 19,21528 | 633,5825 | 30,90647 | 0 | 0 | 0 | 38,43056 |
| 3,63598 | 19,90454 | 644,9657 | 31,46174 | 0 | 0 | 0 | 39,80909 |
| 3,79216 | 20,76007 | 656,3709 | 32,01809 | 0 | 0 | 0 | 41,52014 |
| 3,92094 | 21,46464 | 668,0817 | 32,58934 | 0 | 0 | 0 | 42,92927 |
| 4,04972 | 22,16971 | 679,3596 | 33,13949 | 0 | 0 | 0 | 44,33942 |
| 4,21138 | 23,05507 | 690,8094 | 33,69803 | 0 | 0 | 0 | 46,11015 |
| 4,3429  | 23,77468 | 702,293  | 34,25819 | 0 | 0 | 0 | 47,54939 |
| 4,51004 | 24,68962 | 714,0119 | 34,82984 | 0 | 0 | 0 | 49,37927 |
| 4,67718 | 25,60507 | 725,3825 | 35,38451 | 0 | 0 | 0 | 51,21014 |
| 4,81418 | 26,35477 | 736,9821 | 35,95035 | 0 | 0 | 0 | 52,70954 |
| 4,9868  | 32,1531  | 881,5575 | 43,00281 | 0 | 0 | 0 | 64,30617 |
| 5,15942 | 33,26644 | 894,8647 | 43,65193 | 0 | 0 | 0 | 66,53286 |
| 5,33478 | 34,3978  | 908,4348 | 44,3139  | 0 | 0 | 0 | 68,79559 |
| 5,51288 | 35,54567 | 922,0606 | 44,97858 | 0 | 0 | 0 | 71,09134 |
| 5,69098 | 36,69324 | 935,3763 | 45,62812 | 0 | 0 | 0 | 73,3865  |
| 5,87182 | 37,85974 | 948,8405 | 46,2849  | 0 | 0 | 0 | 75,71946 |
| 6,0554  | 39,04365 | 962,2134 | 46,93723 | 0 | 0 | 0 | 78,08729 |
| 6,24446 | 40,26181 | 975,6892 | 47,5946  | 0 | 0 | 0 | 80,52359 |
| 6,47188 | 41,72863 | 989,3929 | 48,26307 | 0 | 0 | 0 | 83,45725 |
| 6,70752 | 43,24802 | 1003,017 | 48,92767 | 0 | 0 | 0 | 86,49605 |
| 6,95412 | 44,83828 | 1016,27  | 49,57416 | 0 | 0 | 0 | 89,67658 |
| 7,43636 | 47,94734 | 1002,968 | 48,92529 | 0 | 0 | 0 | 95,89465 |
| 7,44458 | 48,0002  | 978,9471 | 47,75351 | 0 | 0 | 0 | 96,00038 |
| 7,44732 | 48,01792 | 950,7257 | 46,37688 | 0 | 0 | 0 | 96,03584 |
| 7,45006 | 48,03564 | 910,417  | 44,41059 | 0 | 0 | 0 | 96,0713  |

Зразок №3.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,07124    | 0,337275       | 0,431272 | 0,021038     | 0              | 0                    | 0                    | 0,674549            |
| 0,09042    | 0,491045       | 14,01429 | 0,683624     | 0              | 0                    | 0                    | 0,982091            |
| 0,10686    | 0,618988       | 28,62595 | 1,396388     | 0              | 0                    | 0                    | 1,237975            |
| 0,1233     | 0,743025       | 43,61215 | 2,127422     | 0              | 0                    | 0                    | 1,48605             |
| 0,13974    | 0,861657       | 57,61773 | 2,810621     | 0              | 0                    | 0                    | 1,723313            |
| 0,15892    | 0,996807       | 71,30578 | 3,478331     | 0              | 0                    | 0                    | 1,993614            |
| 0,18632    | 1,183614       | 85,39991 | 4,16585      | 0              | 0                    | 0                    | 2,367229            |
| 0,42196    | 2,720721       | 98,67386 | 4,81336      | 0              | 0                    | 0                    | 5,441441            |
| 0,49868    | 3,21507        | 111,9596 | 5,461449     | 0              | 0                    | 0                    | 6,43014             |

Продовження табл. Т.3

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 0,52882 | 3,409686 | 125,459  | 6,119952 | 0 | 0 | 0 | 6,819372 |
| 0,55896 | 3,604002 | 139,764  | 6,817756 | 0 | 0 | 0 | 7,208005 |
| 0,58636 | 3,781198 | 153,0656 | 7,466614 | 0 | 0 | 0 | 7,562395 |
| 0,61376 | 3,957194 | 166,762  | 8,134732 | 0 | 0 | 0 | 7,914389 |
| 0,64116 | 4,13379  | 180,2614 | 8,793241 | 0 | 0 | 0 | 8,267581 |
| 0,66856 | 4,310686 | 193,6368 | 9,445697 | 0 | 0 | 0 | 8,621372 |
| 0,6987  | 4,504702 | 207,7324 | 10,13329 | 0 | 0 | 0 | 9,009401 |
| 0,72884 | 4,699618 | 221,2672 | 10,79352 | 0 | 0 | 0 | 9,399237 |
| 0,76172 | 4,911353 | 235,4513 | 11,48543 | 0 | 0 | 0 | 9,822707 |
| 0,7946  | 5,123088 | 249,0426 | 12,14842 | 0 | 0 | 0 | 10,24618 |
| 0,83022 | 5,353143 | 263,1322 | 12,83572 | 0 | 0 | 0 | 10,70629 |
| 0,86584 | 5,582898 | 276,6693 | 13,49606 | 0 | 0 | 0 | 11,1658  |
| 0,9042  | 5,830074 | 290,5359 | 14,17249 | 0 | 0 | 0 | 11,66015 |
| 0,94256 | 6,077547 | 303,8768 | 14,82326 | 0 | 0 | 0 | 12,15509 |
| 0,98366 | 6,342441 | 317,5542 | 15,49045 | 0 | 0 | 0 | 12,68488 |
| 1,0275  | 6,624756 | 331,6155 | 16,17637 | 0 | 0 | 0 | 13,24951 |
| 1,07134 | 6,907071 | 345,0249 | 16,83048 | 0 | 0 | 0 | 13,81414 |
| 1,11792 | 7,208005 | 358,6976 | 17,49745 | 0 | 0 | 0 | 14,41601 |
| 1,16724 | 7,526058 | 372,5223 | 18,17182 | 0 | 0 | 0 | 15,05211 |
| 1,21656 | 7,843809 | 385,7926 | 18,81916 | 0 | 0 | 0 | 15,68762 |
| 1,26862 | 8,179283 | 399,1768 | 19,47204 | 0 | 0 | 0 | 16,35856 |
| 1,32342 | 8,532772 | 412,5825 | 20,12598 | 0 | 0 | 0 | 17,06555 |
| 1,38096 | 8,903687 | 426,0734 | 20,78407 | 0 | 0 | 0 | 17,80737 |
| 1,44124 | 9,292919 | 439,6424 | 21,44597 | 0 | 0 | 0 | 18,58584 |
| 1,50426 | 9,69927  | 453,2337 | 22,10897 | 0 | 0 | 0 | 19,39854 |
| 1,57002 | 10,12334 | 466,7544 | 22,7685  | 0 | 0 | 0 | 20,24668 |
| 1,63852 | 10,56483 | 480,2217 | 23,42545 | 0 | 0 | 0 | 21,12966 |
| 1,70976 | 11,02374 | 493,6292 | 24,07947 | 0 | 0 | 0 | 22,04748 |
| 1,78374 | 11,50067 | 506,9788 | 24,73067 | 0 | 0 | 0 | 23,00134 |
| 1,86046 | 11,99562 | 520,3068 | 25,38082 | 0 | 0 | 0 | 23,99124 |
| 1,94266 | 12,52541 | 533,9565 | 26,04666 | 0 | 0 | 0 | 25,05082 |
| 2,0276  | 13,07352 | 547,5875 | 26,71159 | 0 | 0 | 0 | 26,14704 |
| 2,11528 | 13,63874 | 560,9573 | 27,36376 | 0 | 0 | 0 | 27,27749 |
| 2,2057  | 14,22169 | 574,4002 | 28,01953 | 0 | 0 | 0 | 28,44338 |
| 2,29886 | 14,82236 | 587,7705 | 28,67173 | 0 | 0 | 0 | 29,64471 |
| 2,3975  | 15,45846 | 601,2336 | 29,32848 | 0 | 0 | 0 | 30,91693 |
| 2,49888 | 16,11259 | 614,6723 | 29,98401 | 0 | 0 | 0 | 32,22518 |
| 2,603   | 16,78293 | 628,0118 | 30,63472 | 0 | 0 | 0 | 33,56587 |
| 2,70986 | 17,4722  | 641,4648 | 31,29096 | 0 | 0 | 0 | 34,9444  |
| 2,8222  | 18,19661 | 654,8961 | 31,94614 | 0 | 0 | 0 | 36,39321 |
| 2,93728 | 18,93843 | 668,3401 | 32,60195 | 0 | 0 | 0 | 37,87685 |
| 3,0551  | 19,69857 | 681,7183 | 33,25454 | 0 | 0 | 0 | 39,39715 |
| 3,1784  | 20,49326 | 695,2625 | 33,91524 | 0 | 0 | 0 | 40,98651 |
| 3,3017  | 21,28854 | 708,5469 | 34,56327 | 0 | 0 | 0 | 42,57707 |
| 3,43048 | 22,11866 | 722,0026 | 35,21964 | 0 | 0 | 0 | 44,23731 |
| 3,562   | 22,9662  | 735,4598 | 35,87608 | 0 | 0 | 0 | 45,9324  |
| 3,69626 | 23,83266 | 748,7723 | 36,52548 | 0 | 0 | 0 | 47,66532 |
| 3,83326 | 24,71534 | 762,0886 | 37,17504 | 0 | 0 | 0 | 49,43068 |
| 3,973   | 25,61634 | 775,3582 | 37,82236 | 0 | 0 | 0 | 51,23269 |
| 4,11822 | 26,55338 | 788,8043 | 38,47826 | 0 | 0 | 0 | 53,10674 |
| 4,26618 | 27,50664 | 802,1963 | 39,13152 | 0 | 0 | 0 | 55,01326 |
| 4,41688 | 28,47882 | 815,6536 | 39,78797 | 0 | 0 | 0 | 56,95762 |
| 4,57306 | 29,48554 | 829,1219 | 40,44496 | 0 | 0 | 0 | 58,97109 |
| 4,73198 | 30,51028 | 842,4795 | 41,09656 | 0 | 0 | 0 | 61,02054 |
| 4,89364 | 31,55243 | 855,7746 | 41,74511 | 0 | 0 | 0 | 63,10487 |
| 5,06078 | 32,63063 | 869,1221 | 42,39619 | 0 | 0 | 0 | 65,26129 |

## Продовження табл. Т.3

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 5,23066 | 33,72504 | 882,4728 | 43,04745 | 0 | 0 | 0 | 67,45008 |
| 5,40328 | 34,83838 | 895,8823 | 43,70159 | 0 | 0 | 0 | 69,67677 |
| 5,58412 | 36,00428 | 909,286  | 44,3554  | 0 | 0 | 0 | 72,00856 |
| 5,76496 | 37,17077 | 922,5551 | 45,00268 | 0 | 0 | 0 | 74,34156 |
| 5,95402 | 38,39013 | 935,8512 | 45,65127 | 0 | 0 | 0 | 76,78025 |
| 6,14856 | 39,64402 | 949,1526 | 46,30012 | 0 | 0 | 0 | 79,28805 |
| 6,35406 | 40,96909 | 962,5113 | 46,95176 | 0 | 0 | 0 | 81,93816 |
| 6,56504 | 42,3287  | 975,7798 | 47,59902 | 0 | 0 | 0 | 84,65738 |
| 6,78972 | 43,77871 | 989,1528 | 48,25137 | 0 | 0 | 0 | 87,55743 |
| 7,0281  | 45,31492 | 1002,501 | 48,90251 | 0 | 0 | 0 | 90,62984 |
| 7,29662 | 47,04634 | 1015,813 | 49,55186 | 0 | 0 | 0 | 94,0927  |
| 7,61172 | 49,0781  | 1029,114 | 50,20069 | 0 | 0 | 0 | 98,15616 |
| 8,08574 | 52,13429 | 1015,339 | 49,52872 | 0 | 0 | 0 | 104,2686 |
| 8,10218 | 52,24    | 987,6237 | 48,17676 | 0 | 0 | 0 | 104,48   |
| 8,10492 | 52,25772 | 959,0069 | 46,78082 | 0 | 0 | 0 | 104,5154 |
| 8,10766 | 52,27544 | 918,4094 | 44,80047 | 0 | 0 | 0 | 104,5509 |

## Зразок №4.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,07124    | 0,337875       | 7,42388  | 0,362141     | 0              | 0                    | 0                    | 0,675751            |
| 0,09042    | 0,491346       | 6,108372 | 0,297969     | 0              | 0                    | 0                    | 0,982691            |
| 0,10686    | 0,619288       | 19,84844 | 0,968216     | 0              | 0                    | 0                    | 1,238575            |
| 0,1233     | 0,743025       | 34,03659 | 1,660321     | 0              | 0                    | 0                    | 1,48605             |
| 0,13974    | 0,861957       | 47,60295 | 2,322095     | 0              | 0                    | 0                    | 1,723914            |
| 0,15892    | 0,996807       | 61,76673 | 3,013011     | 0              | 0                    | 0                    | 1,993614            |
| 0,18358    | 1,165294       | 76,39197 | 3,726437     | 0              | 0                    | 0                    | 2,330588            |
| 0,2329     | 1,493559       | 89,7891  | 4,379956     | 0              | 0                    | 0                    | 2,987117            |
| 0,4932     | 3,180231       | 103,1495 | 5,031684     | 0              | 0                    | 0                    | 6,360461            |
| 0,53704    | 3,462845       | 116,6095 | 5,688273     | 0              | 0                    | 0                    | 6,92569             |
| 0,57266    | 3,6929         | 130,3679 | 6,359412     | 0              | 0                    | 0                    | 7,385799            |
| 0,60554    | 3,904335       | 144,4182 | 7,044792     | 0              | 0                    | 0                    | 7,80867             |
| 0,63294    | 4,081532       | 157,9598 | 7,705357     | 0              | 0                    | 0                    | 8,163065            |
| 0,66308    | 4,275247       | 172,4422 | 8,41181      | 0              | 0                    | 0                    | 8,550495            |
| 0,69322    | 4,469563       | 186,0393 | 9,075089     | 0              | 0                    | 0                    | 8,939128            |
| 0,7261     | 4,681899       | 200,364  | 9,773852     | 0              | 0                    | 0                    | 9,363796            |
| 0,8864     | 4,893634       | 213,9509 | 10,43663     | 0              | 0                    | 0                    | 9,787266            |
| 0,928      | 5,123088       | 228,1008 | 11,12687     | 0              | 0                    | 0                    | 10,24618            |
| 0,9696     | 5,353143       | 241,6905 | 11,78979     | 0              | 0                    | 0                    | 10,70629            |
| 1,0144     | 5,600319       | 255,832  | 12,47961     | 0              | 0                    | 0                    | 11,20064            |
| 1,0592     | 5,847792       | 269,3023 | 13,1367      | 0              | 0                    | 0                    | 11,69558            |
| 1,1072     | 6,112686       | 283,1094 | 13,81022     | 0              | 0                    | 0                    | 12,22537            |
| 1,1584     | 6,395303       | 297,2256 | 14,49881     | 0              | 0                    | 0                    | 12,7906             |
| 1,2096     | 6,678217       | 310,8283 | 15,16235     | 0              | 0                    | 0                    | 13,35643            |
| 1,264      | 6,978245       | 324,6955 | 15,83881     | 0              | 0                    | 0                    | 13,9565             |
| 1,3216     | 7,2966         | 338,6703 | 16,5205      | 0              | 0                    | 0                    | 14,5932             |
| 1,3792     | 7,614653       | 352,1293 | 17,17704     | 0              | 0                    | 0                    | 15,22931            |
| 1,44       | 7,950127       | 365,7747 | 17,84267     | 0              | 0                    | 0                    | 15,90025            |
| 1,504      | 8,303319       | 379,5042 | 18,5124      | 0              | 0                    | 0                    | 16,60664            |
| 1,5712     | 8,673932       | 393,2603 | 19,18343     | 0              | 0                    | 0                    | 17,34786            |
| 1,6384     | 9,045144       | 406,5348 | 19,83096     | 0              | 0                    | 0                    | 18,09028            |
| 1,7088     | 9,434376       | 419,8353 | 20,47977     | 0              | 0                    | 0                    | 18,86875            |
| 1,7856     | 9,857846       | 433,5469 | 21,14863     | 0              | 0                    | 0                    | 19,71569            |
| 1,8656     | 10,29994       | 447,2928 | 21,81916     | 0              | 0                    | 0                    | 20,59988            |

## Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 1,9488 | 10,75885 | 461      | 22,4878  | 0 | 0 | 0 | 21,51769 |
| 2,0352 | 11,23577 | 474,5746 | 23,14998 | 0 | 0 | 0 | 22,47155 |
| 2,1248 | 11,73072 | 488,2318 | 23,81618 | 0 | 0 | 0 | 23,46145 |
| 2,2176 | 12,24279 | 501,665  | 24,47146 | 0 | 0 | 0 | 24,48559 |
| 2,3136 | 12,77288 | 515,0635 | 25,12505 | 0 | 0 | 0 | 25,54577 |
| 2,416  | 13,33811 | 528,6847 | 25,7895  | 0 | 0 | 0 | 26,67622 |
| 2,5216 | 13,92136 | 542,2287 | 26,45019 | 0 | 0 | 0 | 27,84271 |
| 2,6304 | 14,52232 | 555,7569 | 27,1101  | 0 | 0 | 0 | 29,04465 |
| 2,7424 | 15,14071 | 569,1119 | 27,76155 | 0 | 0 | 0 | 30,28142 |
| 2,8608 | 15,79394 | 582,7154 | 28,42514 | 0 | 0 | 0 | 31,58787 |
| 2,9824 | 16,46548 | 596,2203 | 29,08393 | 0 | 0 | 0 | 32,93096 |
| 3,1072 | 17,15445 | 609,6685 | 29,73993 | 0 | 0 | 0 | 34,30889 |
| 3,2384 | 17,87885 | 623,2169 | 30,40083 | 0 | 0 | 0 | 35,7577  |
| 3,3728 | 18,62068 | 636,7553 | 31,06124 | 0 | 0 | 0 | 37,24135 |
| 3,5104 | 19,38022 | 650,2167 | 31,7179  | 0 | 0 | 0 | 38,76044 |
| 3,6512 | 20,15718 | 663,5674 | 32,36915 | 0 | 0 | 0 | 40,31436 |
| 3,7952 | 20,95336 | 676,8969 | 33,01936 | 0 | 0 | 0 | 41,90673 |
| 3,9456 | 21,78288 | 690,2243 | 33,66948 | 0 | 0 | 0 | 43,56577 |
| 4,096  | 22,61331 | 703,4891 | 34,31655 | 0 | 0 | 0 | 45,22661 |
| 4,2528 | 23,47887 | 716,9458 | 34,97297 | 0 | 0 | 0 | 46,95774 |
| 4,416  | 24,37987 | 730,4555 | 35,63199 | 0 | 0 | 0 | 48,75974 |
| 4,5792 | 25,28087 | 743,7511 | 36,28055 | 0 | 0 | 0 | 50,56174 |
| 4,7456 | 26,19959 | 757,0107 | 36,92734 | 0 | 0 | 0 | 52,39918 |
| 4,9152 | 27,13603 | 770,364  | 37,57874 | 0 | 0 | 0 | 54,27205 |
| 5,0912 | 28,10791 | 783,7725 | 38,2328  | 0 | 0 | 0 | 56,21583 |
| 5,2704 | 29,09661 | 797,1502 | 38,88538 | 0 | 0 | 0 | 58,19321 |
| 5,456  | 30,12135 | 810,5947 | 39,54121 | 0 | 0 | 0 | 60,24272 |
| 5,6448 | 31,1638  | 823,9809 | 40,19418 | 0 | 0 | 0 | 62,32763 |
| 5,8368 | 30,40027 | 789,9995 | 38,53656 | 0 | 0 | 0 | 60,80055 |
| 6,0352 | 31,43302 | 802,6185 | 39,15212 | 0 | 0 | 0 | 62,866   |
| 6,2336 | 32,46719 | 815,3    | 39,77074 | 0 | 0 | 0 | 64,93435 |
| 6,4416 | 33,55037 | 827,9395 | 40,3873  | 0 | 0 | 0 | 67,10075 |
| 6,6528 | 34,64999 | 840,617  | 41,0057  | 0 | 0 | 0 | 69,29995 |
| 6,8704 | 35,7836  | 853,256  | 41,62225 | 0 | 0 | 0 | 71,5672  |
| 7,0944 | 36,95037 | 865,783  | 42,23331 | 0 | 0 | 0 | 73,90075 |
| 7,3216 | 38,13328 | 878,3655 | 42,8471  | 0 | 0 | 0 | 76,26655 |
| 7,5584 | 39,36664 | 890,976  | 43,46225 | 0 | 0 | 0 | 78,73325 |
| 7,8048 | 40,65042 | 903,551  | 44,07567 | 0 | 0 | 0 | 81,30085 |

## Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 8,064  | 41,99994 | 916,196  | 44,69249 | 0 | 0 | 0 | 83,99985 |
| 8,336  | 43,4166  | 928,7905 | 45,30685 | 0 | 0 | 0 | 86,8332  |
| 8,624  | 44,91686 | 941,294  | 45,91677 | 0 | 0 | 0 | 89,8337  |
| 8,944  | 46,58342 | 953,8265 | 46,52812 | 0 | 0 | 0 | 93,16685 |
| 9,3056 | 48,46617 | 966,406  | 47,14175 | 0 | 0 | 0 | 96,93235 |
| 9,8848 | 51,4834  | 950,1175 | 46,34719 | 0 | 0 | 0 | 102,9668 |
| 9,888  | 51,5004  | 928,098  | 45,27309 | 0 | 0 | 0 | 103,0008 |
| 9,8912 | 51,5171  | 893,737  | 43,59694 | 0 | 0 | 0 | 103,0342 |
| 9,8944 | 51,5338  | 849,9825 | 41,46256 | 0 | 0 | 0 | 103,0677 |

## Зразок №5.

| "Time<br>sec" | "Extension<br>mm" | "Load N" | "Stress<br>MPa" | "Cycle<br>Count " | "Total<br>Cycle<br>Count " | "Repetitions<br>Count " | "Strain<br>[Exten.]<br>%" |
|---------------|-------------------|----------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 0             | 0                 | 0        | 0               | 0                 | 0                          | 0                       | 0                         |
| 0,0832        | 0,318467          | 1,025152 | 0,050008        | 0                 | 0                          | 0                       | 0,636934                  |
| 0,1056        | 0,463534          | 13,23466 | 0,645594        | 0                 | 0                          | 0                       | 0,927067                  |
| 0,1248        | 0,584234          | 27,75023 | 1,35367         | 0                 | 0                          | 0                       | 1,168467                  |
| 0,1408        | 0,6817            | 40,25636 | 1,963725        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,363401                  |
| 0,16          | 0,794751          | 54,7411  | 2,670297        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,589501                  |
| 0,1792        | 0,904401          | 68,09935 | 3,32192         | 0                 | 0                          | 0                       | 1,808801                  |
| 0,2016        | 1,029634          | 80,94605 | 3,948589        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,059268                  |
| 0,4992        | 2,599868          | 93,524   | 4,562147        | 0                 | 0                          | 0                       | 5,199735                  |
| 0,592         | 3,083235          | 106,5771 | 5,198885        | 0                 | 0                          | 0                       | 6,16647                   |
| 0,624         | 3,250118          | 120,5102 | 5,878545        | 0                 | 0                          | 0                       | 6,500235                  |
| 0,6496        | 3,383285          | 133,54   | 6,514145        | 0                 | 0                          | 0                       | 6,76657                   |
| 0,6752        | 3,517018          | 146,4166 | 7,142275        | 0                 | 0                          | 0                       | 7,034035                  |
| 0,704         | 3,666902          | 160,0003 | 7,80489         | 0                 | 0                          | 0                       | 7,333805                  |
| 0,7328        | 3,817068          | 172,6689 | 8,42287         | 0                 | 0                          | 0                       | 7,634135                  |
| 0,7648        | 3,983102          | 186,0629 | 9,07624         | 0                 | 0                          | 0                       | 7,966205                  |
| 0,7968        | 4,149985          | 198,9617 | 9,705445        | 0                 | 0                          | 0                       | 8,29997                   |
| 0,832         | 4,333302          | 212,6253 | 10,37197        | 0                 | 0                          | 0                       | 8,666605                  |
| 0,8672        | 4,516336          | 225,7171 | 11,01059        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,03267                   |
| 0,9024        | 4,700219          | 238,323  | 11,62551        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,400435                  |
| 0,9408        | 4,899969          | 251,6129 | 12,2738         | 0                 | 0                          | 0                       | 9,799935                  |
| 0,9792        | 5,1               | 264,3996 | 12,89754        | 0                 | 0                          | 0                       | 10,20001                  |
| 1,0208        | 5,31647           | 277,7442 | 13,5485         | 0                 | 0                          | 0                       | 10,63294                  |
| 1,0624        | 5,53322           | 290,5523 | 14,17328        | 0                 | 0                          | 0                       | 11,06644                  |

## Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 1,1072 | 5,76697  | 303,7827 | 14,81867 | 0 | 0 | 0 | 11,53394 |
| 1,152  | 6,000155 | 316,585  | 15,44317 | 0 | 0 | 0 | 12,00031 |
| 1,2    | 6,24977  | 329,7224 | 16,08402 | 0 | 0 | 0 | 12,49954 |
| 1,248  | 6,499385 | 342,2826 | 16,69671 | 0 | 0 | 0 | 12,99878 |
| 1,2992 | 6,76657  | 355,2005 | 17,32686 | 0 | 0 | 0 | 13,53314 |
| 1,3536 | 7,050185 | 368,3754 | 17,96953 | 0 | 0 | 0 | 14,10038 |
| 1,408  | 7,333235 | 380,9556 | 18,5832  | 0 | 0 | 0 | 14,66648 |
| 1,4656 | 7,633005 | 393,7399 | 19,20683 | 0 | 0 | 0 | 15,26601 |
| 1,5264 | 7,949485 | 406,6615 | 19,83715 | 0 | 0 | 0 | 15,89898 |
| 1,5872 | 8,266255 | 419,1768 | 20,44765 | 0 | 0 | 0 | 16,53251 |
| 1,6512 | 8,60002  | 431,7853 | 21,0627  | 0 | 0 | 0 | 17,20004 |
| 1,7184 | 8,95022  | 444,4955 | 21,68271 | 0 | 0 | 0 | 17,90044 |
| 1,7888 | 9,316855 | 457,2312 | 22,30397 | 0 | 0 | 0 | 18,63371 |
| 1,8624 | 9,700205 | 469,9678 | 22,92526 | 0 | 0 | 0 | 19,40041 |
| 1,9392 | 10,09999 | 482,7883 | 23,55065 | 0 | 0 | 0 | 20,19998 |
| 2,0192 | 10,51621 | 495,584  | 24,17483 | 0 | 0 | 0 | 21,03241 |
| 2,1024 | 10,94999 | 508,4245 | 24,8012  | 0 | 0 | 0 | 21,89998 |
| 2,1888 | 11,40021 | 521,222  | 25,42547 | 0 | 0 | 0 | 22,80041 |
| 2,2784 | 11,86629 | 533,9055 | 26,04416 | 0 | 0 | 0 | 23,73258 |
| 2,3712 | 12,34994 | 546,7565 | 26,67105 | 0 | 0 | 0 | 24,69988 |
| 2,4672 | 12,84946 | 559,3625 | 27,28598 | 0 | 0 | 0 | 25,69891 |
| 2,5664 | 13,36682 | 572,091  | 27,90689 | 0 | 0 | 0 | 26,73365 |
| 2,6688 | 13,90034 | 584,8605 | 28,52978 | 0 | 0 | 0 | 27,80068 |
| 2,7776 | 14,46673 | 597,7055 | 29,15638 | 0 | 0 | 0 | 28,93345 |
| 2,8864 | 15,03311 | 610,207  | 29,76619 | 0 | 0 | 0 | 30,06622 |
| 2,9984 | 15,61649 | 622,765  | 30,37878 | 0 | 0 | 0 | 31,23298 |
| 3,1136 | 16,21688 | 635,3185 | 30,99115 | 0 | 0 | 0 | 32,43375 |
| 3,2352 | 16,85013 | 648,0665 | 31,613   | 0 | 0 | 0 | 33,70025 |
| 3,36   | 17,49981 | 660,833  | 32,23577 | 0 | 0 | 0 | 34,99962 |
| 3,488  | 18,16649 | 673,6    | 32,85854 | 0 | 0 | 0 | 36,33299 |
| 3,6192 | 18,85018 | 686,303  | 33,4782  | 0 | 0 | 0 | 37,70035 |
| 3,7536 | 19,55001 | 698,9065 | 34,093   | 0 | 0 | 0 | 39,10002 |
| 3,8912 | 20,26684 | 711,536  | 34,70908 | 0 | 0 | 0 | 40,53368 |
| 4,032  | 21,00011 | 724,164  | 35,32507 | 0 | 0 | 0 | 42,00022 |
| 4,176  | 21,74981 | 736,743  | 35,93869 | 0 | 0 | 0 | 43,49962 |
| 4,3232 | 22,5168  | 749,3195 | 36,55218 | 0 | 0 | 0 | 45,03359 |
| 4,4736 | 23,29993 | 761,839  | 37,16288 | 0 | 0 | 0 | 46,59985 |
| 4,6272 | 24,09978 | 774,4575 | 37,77841 | 0 | 0 | 0 | 48,19956 |

## Продовження табл. Т.3

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 4,0963  | 26,41132 | 834,1988 | 40,69262 | 0 | 0 | 0 | 52,82265 |
| 4,2333  | 27,29461 | 847,461  | 41,33957 | 0 | 0 | 0 | 54,58921 |
| 4,37304 | 28,19621 | 860,7741 | 41,98899 | 0 | 0 | 0 | 56,39242 |
| 4,51826 | 29,13204 | 874,2069 | 42,64425 | 0 | 0 | 0 | 58,26407 |
| 4,66622 | 30,08591 | 887,6493 | 43,29997 | 0 | 0 | 0 | 60,1718  |
| 4,81692 | 31,05778 | 900,955  | 43,94903 | 0 | 0 | 0 | 62,11558 |
| 4,97036 | 32,04708 | 914,3051 | 44,60025 | 0 | 0 | 0 | 64,09417 |
| 5,12928 | 33,07212 | 927,6463 | 45,25104 | 0 | 0 | 0 | 66,14427 |
| 5,29094 | 34,11488 | 941,0961 | 45,90713 | 0 | 0 | 0 | 68,22976 |
| 5,45808 | 35,19217 | 954,5597 | 46,5639  | 0 | 0 | 0 | 70,38437 |
| 5,62796 | 36,28749 | 967,8993 | 47,21459 | 0 | 0 | 0 | 72,57497 |
| 5,80332 | 37,41855 | 981,3485 | 47,87065 | 0 | 0 | 0 | 74,83711 |
| 5,98416 | 38,58444 | 994,7146 | 48,52266 | 0 | 0 | 0 | 77,1689  |
| 6,17048 | 39,78578 | 1008,094 | 49,17532 | 0 | 0 | 0 | 79,57155 |
| 6,36502 | 41,03967 | 1021,526 | 49,83053 | 0 | 0 | 0 | 82,07935 |
| 6,56778 | 42,34672 | 1034,886 | 50,48226 | 0 | 0 | 0 | 84,69342 |
| 6,78424 | 43,74297 | 1048,235 | 51,13338 | 0 | 0 | 0 | 87,48593 |
| 7,01714 | 45,24463 | 1061,495 | 51,78022 | 0 | 0 | 0 | 90,48929 |
| 7,27196 | 46,88746 | 1074,799 | 52,42923 | 0 | 0 | 0 | 93,77491 |
| 7,6446  | 49,28983 | 1088,05  | 53,07558 | 0 | 0 | 0 | 98,57968 |
| 7,92956 | 51,12757 | 1074,329 | 52,40629 | 0 | 0 | 0 | 102,2551 |
| 7,95696 | 51,30416 | 1058,756 | 51,64664 | 0 | 0 | 0 | 102,6083 |
| 7,97066 | 51,39216 | 1042,352 | 50,84644 | 0 | 0 | 0 | 102,7843 |
| 7,97614 | 51,4279  | 1018,193 | 49,66796 | 0 | 0 | 0 | 102,8558 |
| 7,97888 | 51,44562 | 989,1162 | 48,24958 | 0 | 0 | 0 | 102,8912 |
| 7,98162 | 51,46334 | 948,409  | 46,26386 | 0 | 0 | 0 | 102,9267 |

## Зразок №6.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,07124    | 0,336974       | 3,333848 | 0,162627     | 0              | 0                    | 0                    | 0,673948            |
| 0,09042    | 0,490745       | 18,73341 | 0,913824     | 0              | 0                    | 0                    | 0,98149             |
| 0,10686    | 0,618687       | 32,03423 | 1,562645     | 0              | 0                    | 0                    | 1,237374            |
| 0,1233     | 0,743025       | 47,67157 | 2,325442     | 0              | 0                    | 0                    | 1,48605             |
| 0,137      | 0,842436       | 61,36663 | 2,993496     | 0              | 0                    | 0                    | 1,684871            |
| 0,15618    | 0,977886       | 75,81109 | 3,698102     | 0              | 0                    | 0                    | 1,955772            |



## Продовження табл. Т.3

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 0,18358 | 1,165594 | 89,20239 | 4,351337 | 0 | 0 | 0 | 2,331189 |
| 0,4384  | 2,826739 | 102,5772 | 5,003764 | 0 | 0 | 0 | 5,653478 |
| 0,50416 | 3,250509 | 115,9143 | 5,654358 | 0 | 0 | 0 | 6,501017 |
| 0,5343  | 3,445426 | 129,3426 | 6,309396 | 0 | 0 | 0 | 6,890853 |
| 0,55622 | 3,586282 | 143,4386 | 6,997007 | 0 | 0 | 0 | 7,172564 |
| 0,58636 | 3,781198 | 157,9618 | 7,705453 | 0 | 0 | 0 | 7,562395 |
| 0,60828 | 3,922055 | 171,2171 | 8,352058 | 0 | 0 | 0 | 7,844111 |
| 0,63842 | 4,116371 | 184,6033 | 9,005039 | 0 | 0 | 0 | 8,232739 |
| 0,66582 | 4,292967 | 199,3476 | 9,724276 | 0 | 0 | 0 | 8,585931 |
| 0,6987  | 4,504702 | 213,1677 | 10,39843 | 0 | 0 | 0 | 9,009401 |
| 0,7261  | 4,681899 | 226,8022 | 11,06352 | 0 | 0 | 0 | 9,363796 |
| 0,76172 | 4,911353 | 240,2598 | 11,71999 | 0 | 0 | 0 | 9,822707 |
| 0,79186 | 5,105369 | 254,5659 | 12,41785 | 0 | 0 | 0 | 10,21074 |
| 0,83296 | 5,370861 | 268,9806 | 13,12101 | 0 | 0 | 0 | 10,74173 |
| 0,86858 | 5,600616 | 282,7905 | 13,79466 | 0 | 0 | 0 | 11,20124 |
| 0,9042  | 5,830074 | 296,5441 | 14,46557 | 0 | 0 | 0 | 11,66015 |
| 0,94804 | 6,112988 | 310,0928 | 15,12648 | 0 | 0 | 0 | 12,22598 |
| 0,9864  | 6,360164 | 323,4581 | 15,77844 | 0 | 0 | 0 | 12,72032 |
| 1,02476 | 6,607335 | 336,8183 | 16,43016 | 0 | 0 | 0 | 13,21468 |
| 1,07408 | 6,924789 | 350,8777 | 17,11598 | 0 | 0 | 0 | 13,84958 |
| 1,1234  | 7,243144 | 364,4814 | 17,77958 | 0 | 0 | 0 | 14,48628 |
| 1,17272 | 7,561494 | 377,9667 | 18,4374  | 0 | 0 | 0 | 15,12299 |
| 1,21656 | 7,843809 | 391,4309 | 19,09419 | 0 | 0 | 0 | 15,68762 |
| 1,26862 | 8,179283 | 405,1884 | 19,76529 | 0 | 0 | 0 | 16,35856 |
| 1,32342 | 8,532772 | 418,6212 | 20,42055 | 0 | 0 | 0 | 17,06555 |
| 1,38096 | 8,903984 | 432,0623 | 21,07621 | 0 | 0 | 0 | 17,80797 |
| 1,44124 | 9,292617 | 445,9051 | 21,75147 | 0 | 0 | 0 | 18,58523 |
| 1,50426 | 9,698968 | 459,338  | 22,40673 | 0 | 0 | 0 | 19,39794 |
| 1,57276 | 10,14106 | 472,8314 | 23,06495 | 0 | 0 | 0 | 20,28212 |
| 1,64948 | 10,63541 | 486,5139 | 23,73239 | 0 | 0 | 0 | 21,27082 |
| 1,72072 | 11,09432 | 500,531  | 24,41615 | 0 | 0 | 0 | 22,18864 |
| 1,78922 | 11,53611 | 514,0266 | 25,07447 | 0 | 0 | 0 | 23,07222 |
| 1,86868 | 12,04848 | 527,4273 | 25,72816 | 0 | 0 | 0 | 24,09696 |
| 1,95636 | 12,6137  | 541,3176 | 26,40575 | 0 | 0 | 0 | 25,22741 |
| 2,03308 | 13,10865 | 555,0838 | 27,07727 | 0 | 0 | 0 | 26,21731 |
| 2,13172 | 13,74386 | 568,5358 | 27,73344 | 0 | 0 | 0 | 27,48772 |
| 2,21118 | 14,25653 | 582,09   | 28,39464 | 0 | 0 | 0 | 28,51306 |
| 2,31256 | 14,91126 | 595,473  | 29,04746 | 0 | 0 | 0 | 29,82251 |

## Продовження табл. Т.3

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 2,41394 | 15,56448 | 608,7819 | 29,69667 | 0 | 0 | 0 | 31,12896 |
| 2,50162 | 16,12941 | 622,3689 | 30,35947 | 0 | 0 | 0 | 32,25882 |
| 2,61122 | 16,83639 | 635,6205 | 31,00587 | 0 | 0 | 0 | 33,67279 |
| 2,72356 | 17,5608  | 649,2458 | 31,67052 | 0 | 0 | 0 | 35,12159 |
| 2,83864 | 18,30232 | 662,951  | 32,33908 | 0 | 0 | 0 | 36,60465 |
| 2,95372 | 19,04474 | 676,3627 | 32,9933  | 0 | 0 | 0 | 38,08949 |
| 3,07154 | 19,80399 | 689,8825 | 33,65279 | 0 | 0 | 0 | 39,60798 |
| 3,1921  | 20,58215 | 703,495  | 34,31683 | 0 | 0 | 0 | 41,16431 |
| 3,31266 | 21,35912 | 716,7784 | 34,9648  | 0 | 0 | 0 | 42,71823 |
| 3,43596 | 22,1541  | 730,2526 | 35,62208 | 0 | 0 | 0 | 44,3082  |
| 3,55926 | 22,94848 | 743,6589 | 36,27605 | 0 | 0 | 0 | 45,89696 |
| 3,6853  | 23,76178 | 757,3149 | 36,94219 | 0 | 0 | 0 | 47,52356 |
| 3,84148 | 24,7688  | 770,7991 | 37,59997 | 0 | 0 | 0 | 49,5376  |
| 3,97026 | 25,59893 | 784,1583 | 38,25163 | 0 | 0 | 0 | 51,19785 |
| 4,10178 | 26,44676 | 797,7094 | 38,91264 | 0 | 0 | 0 | 52,89353 |
| 4,26344 | 27,48922 | 811,3383 | 39,57746 | 0 | 0 | 0 | 54,97844 |
| 4,39496 | 28,33797 | 824,7537 | 40,23189 | 0 | 0 | 0 | 56,67592 |
| 4,55936 | 29,39664 | 838,0874 | 40,88231 | 0 | 0 | 0 | 58,79327 |
| 4,69636 | 30,28022 | 851,4413 | 41,53373 | 0 | 0 | 0 | 60,56045 |
| 4,8635  | 31,35812 | 865,0284 | 42,19651 | 0 | 0 | 0 | 62,71623 |
| 5,03338 | 32,45343 | 878,3505 | 42,84637 | 0 | 0 | 0 | 64,90687 |
| 5,206   | 33,56647 | 891,8602 | 43,50538 | 0 | 0 | 0 | 67,13293 |
| 5,34848 | 34,48519 | 905,372  | 44,1645  | 0 | 0 | 0 | 68,97038 |
| 5,5211  | 35,59883 | 918,8043 | 44,81973 | 0 | 0 | 0 | 71,19766 |
| 5,6992  | 36,7464  | 932,12   | 45,46927 | 0 | 0 | 0 | 73,49282 |
| 5,88004 | 37,91319 | 945,6022 | 46,12694 | 0 | 0 | 0 | 75,82641 |
| 6,0965  | 39,30795 | 959,1898 | 46,78974 | 0 | 0 | 0 | 78,61591 |
| 6,28282 | 40,50928 | 972,8261 | 47,45492 | 0 | 0 | 0 | 81,01856 |
| 6,47188 | 41,72803 | 986,2669 | 48,11058 | 0 | 0 | 0 | 83,45608 |
| 6,6993  | 43,19546 | 999,8752 | 48,77439 | 0 | 0 | 0 | 86,3909  |
| 6,9322  | 44,69682 | 1013,138 | 49,42139 | 0 | 0 | 0 | 89,39367 |
| 7,17058 | 46,23333 | 1026,746 | 50,08519 | 0 | 0 | 0 | 92,46666 |
| 7,42266 | 47,85874 | 1040,005 | 50,73195 | 0 | 0 | 0 | 95,71747 |
| 7,76516 | 50,06739 | 1053,599 | 51,39507 | 0 | 0 | 0 | 100,1348 |
| 8,29398 | 53,47679 | 1037,632 | 50,61619 | 0 | 0 | 0 | 106,9536 |
| 8,29672 | 53,49449 | 1024,167 | 49,95936 | 0 | 0 | 0 | 106,989  |
| 8,29946 | 53,51219 | 997,0599 | 48,63706 | 0 | 0 | 0 | 107,0244 |
| 8,30494 | 53,54797 | 908,1274 | 44,29891 | 0 | 0 | 0 | 107,0959 |

## Продовження табл. Т.3

## Зразок №7.

| "Time<br>sec" | "Extension<br>mm" | "Load N" | "Stress<br>MPa" | "Cycle<br>Count " | "Total<br>Cycle<br>Count " | "Repetitions<br>Count " | "Strain<br>[Exten.]<br>%" |
|---------------|-------------------|----------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 0             | 0                 | 0        | 0               | 0                 | 0                          | 0                       | 0                         |
| 0,0754        | 0,424835          | 32,14065 | 1,567836        | 0                 | 0                          | 0                       | 0,849669                  |
| 0,0928        | 0,590762          | 50,01277 | 2,439647        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,181524                  |
| 0,1102        | 0,752532          | 67,15203 | 3,27571         | 0                 | 0                          | 0                       | 1,505064                  |
| 0,1334        | 0,960791          | 86,10096 | 4,200048        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,921584                  |
| 0,1566        | 1,15809           | 104,1714 | 5,081531        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,316181                  |
| 0,2262        | 1,720505          | 120,902  | 5,897655        | 0                 | 0                          | 0                       | 3,44101                   |
| 0,4437        | 3,401323          | 138,1314 | 6,738121        | 0                 | 0                          | 0                       | 6,802646                  |
| 0,4872        | 3,735068          | 154,8786 | 7,555056        | 0                 | 0                          | 0                       | 7,470133                  |
| 0,522         | 4,002291          | 172,9153 | 8,434895        | 0                 | 0                          | 0                       | 8,00458                   |
| 0,5481        | 4,201857          | 190,9959 | 9,316876        | 0                 | 0                          | 0                       | 8,403713                  |
| 0,5829        | 4,468701          | 209,3769 | 10,21351        | 0                 | 0                          | 0                       | 8,937406                  |
| 0,6119        | 4,691702          | 226,6058 | 11,05394        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,383403                  |
| 0,6438        | 4,935869          | 243,521  | 11,87907        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,87174                   |
| 0,667         | 5,114269          | 260,2223 | 12,69377        | 0                 | 0                          | 0                       | 10,22854                  |
| 0,7018        | 5,380358          | 278,5418 | 13,5874         | 0                 | 0                          | 0                       | 10,76072                  |
| 0,7279        | 5,58068           | 296,0383 | 14,44089        | 0                 | 0                          | 0                       | 11,16136                  |
| 0,7656        | 5,869825          | 313,8712 | 15,31079        | 0                 | 0                          | 0                       | 11,73965                  |
| 0,7946        | 6,091692          | 331,318  | 16,16186        | 0                 | 0                          | 0                       | 12,18338                  |
| 0,8323        | 6,380836          | 348,4295 | 16,99656        | 0                 | 0                          | 0                       | 12,76167                  |
| 0,8642        | 6,625759          | 365,3922 | 17,82401        | 0                 | 0                          | 0                       | 13,25152                  |
| 0,9019        | 6,914522          | 382,6155 | 18,66417        | 0                 | 0                          | 0                       | 13,82905                  |
| 0,9425        | 7,225591          | 399,8257 | 19,50369        | 0                 | 0                          | 0                       | 14,45118                  |
| 0,9773        | 7,492811          | 417,4078 | 20,36136        | 0                 | 0                          | 0                       | 14,98563                  |
| 1,0237        | 7,848482          | 435,1419 | 21,22643        | 0                 | 0                          | 0                       | 15,69696                  |
| 1,0672        | 8,182222          | 452,6256 | 22,0793         | 0                 | 0                          | 0                       | 16,36445                  |
| 1,1049        | 8,470993          | 469,8526 | 22,91964        | 0                 | 0                          | 0                       | 16,94199                  |
| 1,1542        | 8,848962          | 486,964  | 23,75434        | 0                 | 0                          | 0                       | 17,69792                  |
| 1,2064        | 9,249229          | 504,6433 | 24,61675        | 0                 | 0                          | 0                       | 18,49845                  |
| 1,2528        | 9,604893          | 521,4677 | 25,43745        | 0                 | 0                          | 0                       | 19,20979                  |
| 1,2992        | 9,960938          | 538,9856 | 26,29198        | 0                 | 0                          | 0                       | 19,92188                  |
| 1,3543        | 10,38275          | 556,6788 | 27,15506        | 0                 | 0                          | 0                       | 20,7655                   |
| 1,4094        | 10,80494          | 573,4359 | 27,97249        | 0                 | 0                          | 0                       | 21,60987                  |
| 1,4674        | 11,25018          | 590,406  | 28,80029        | 0                 | 0                          | 0                       | 22,50036                  |
| 1,5283        | 11,71697          | 607,6915 | 29,64349        | 0                 | 0                          | 0                       | 23,43394                  |

Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 1,5892 | 12,18376 | 624,5268 | 30,46472 | 0 | 0 | 0 | 24,36752 |
| 1,653  | 12,67361 | 641,6653 | 31,30074 | 0 | 0 | 0 | 25,34721 |
| 1,7168 | 13,16232 | 658,3978 | 32,11696 | 0 | 0 | 0 | 26,32464 |
| 1,7835 | 13,67295 | 675,685  | 32,96024 | 0 | 0 | 0 | 27,3459  |
| 1,8531 | 14,20739 | 693,2104 | 33,81515 | 0 | 0 | 0 | 28,41479 |
| 1,9227 | 14,74071 | 710,0482 | 34,63649 | 0 | 0 | 0 | 29,48141 |
| 2,0039 | 15,36284 | 726,99   | 35,46294 | 0 | 0 | 0 | 30,72568 |
| 2,088  | 16,00765 | 743,725  | 36,27926 | 0 | 0 | 0 | 32,0153  |
| 2,1634 | 16,58594 | 760,9123 | 37,11766 | 0 | 0 | 0 | 33,17188 |
| 2,2417 | 17,18691 | 777,8747 | 37,94511 | 0 | 0 | 0 | 34,37382 |
| 2,3432 | 17,96325 | 795,4042 | 38,80022 | 0 | 0 | 0 | 35,9265  |
| 2,4186 | 18,54305 | 812,2593 | 39,62241 | 0 | 0 | 0 | 37,08611 |
| 2,523  | 19,34359 | 829,0036 | 40,4392  | 0 | 0 | 0 | 38,68717 |
| 2,6071 | 19,98802 | 845,9348 | 41,26512 | 0 | 0 | 0 | 39,97604 |
| 2,7144 | 20,80934 | 862,7218 | 42,08398 | 0 | 0 | 0 | 41,61869 |
| 2,8014 | 21,47759 | 879,7997 | 42,91705 | 0 | 0 | 0 | 42,95517 |
| 2,9145 | 22,34427 | 897,0897 | 43,76047 | 0 | 0 | 0 | 44,68853 |
| 3,0305 | 23,23362 | 914,2542 | 44,59776 | 0 | 0 | 0 | 46,46724 |
| 3,1233 | 23,94533 | 931,142  | 45,42155 | 0 | 0 | 0 | 47,89067 |
| 3,2364 | 24,81239 | 947,9144 | 46,23971 | 0 | 0 | 0 | 49,62478 |
| 3,3582 | 25,74635 | 965,1957 | 47,08272 | 0 | 0 | 0 | 51,49269 |
| 3,48   | 26,68068 | 982,2009 | 47,91224 | 0 | 0 | 0 | 53,36135 |
| 3,6047 | 27,63618 | 999,4195 | 48,75216 | 0 | 0 | 0 | 55,27236 |
| 3,7294 | 28,59206 | 1016,333 | 49,57718 | 0 | 0 | 0 | 57,18411 |
| 3,8541 | 29,54793 | 1033,036 | 50,392   | 0 | 0 | 0 | 59,09587 |
| 3,9817 | 30,52612 | 1050,009 | 51,21998 | 0 | 0 | 0 | 61,05222 |
| 4,1122 | 31,52697 | 1067,234 | 52,06021 | 0 | 0 | 0 | 63,05393 |
| 4,2427 | 32,52707 | 1084,421 | 52,89858 | 0 | 0 | 0 | 65,05414 |
| 4,3761 | 33,54985 | 1101,384 | 53,72603 | 0 | 0 | 0 | 67,09967 |
| 4,5385 | 34,79487 | 1118,309 | 54,55165 | 0 | 0 | 0 | 69,58971 |
| 4,6748 | 35,84032 | 1135,414 | 55,38606 | 0 | 0 | 0 | 71,68062 |
| 4,8111 | 36,88503 | 1152,319 | 56,21069 | 0 | 0 | 0 | 73,77007 |
| 4,9793 | 38,17427 | 1169,097 | 57,02911 | 0 | 0 | 0 | 76,34856 |
| 5,1214 | 39,26358 | 1186,202 | 57,86352 | 0 | 0 | 0 | 78,52711 |
| 5,2925 | 40,57625 | 1202,981 | 58,68197 | 0 | 0 | 0 | 81,15249 |
| 5,4375 | 41,68823 | 1219,955 | 59,51    | 0 | 0 | 0 | 83,37647 |
| 5,6144 | 43,04438 | 1236,715 | 60,32756 | 0 | 0 | 0 | 86,08876 |
| 5,7594 | 44,15484 | 1253,459 | 61,14434 | 0 | 0 | 0 | 88,30967 |

## Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 5,9421 | 45,55634 | 1270,454 | 61,97337 | 0 | 0 | 0 | 91,11267 |
| 6,1277 | 46,97863 | 1287,333 | 62,79674 | 0 | 0 | 0 | 93,95729 |
| 6,3162 | 48,42435 | 1304,159 | 63,61753 | 0 | 0 | 0 | 96,84873 |
| 6,5105 | 49,91316 | 1321,432 | 64,46007 | 0 | 0 | 0 | 99,82635 |
| 6,7512 | 51,75878 | 1338,514 | 65,29333 | 0 | 0 | 0 | 103,5175 |
| 7,0151 | 53,78241 | 1355,331 | 66,11372 | 0 | 0 | 0 | 107,5648 |
| 7,221  | 55,36118 | 1324,289 | 64,59947 | 0 | 0 | 0 | 110,7223 |
| 7,2239 | 55,38348 | 1291,152 | 62,98302 | 0 | 0 | 0 | 110,767  |
| 7,2268 | 55,40578 | 1240,937 | 60,53354 | 0 | 0 | 0 | 110,8116 |
| 7,2297 | 55,42808 | 1178,64  | 57,49461 | 0 | 0 | 0 | 110,8562 |

## Зразок №8.

| "Time<br>sec" | "Extension<br>mm" | "Load N" | "Stress<br>MPa" | "Cycle<br>Count " | "Total<br>Cycle<br>Count " | "Repetitions<br>Count " | "Strain<br>[Exten.]<br>%" |
|---------------|-------------------|----------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 0             | 0                 | 0        | 0               | 0                 | 0                          | 0                       | 0                         |
| 0,0754        | 0,424835          | 13,76479 | 0,671453        | 0                 | 0                          | 0                       | 0,849669                  |
| 0,0957        | 0,618354          | 5,472264 | 0,26694         | 0                 | 0                          | 0                       | 1,236707                  |
| 0,1131        | 0,77899           | 25,01045 | 1,220022        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,557979                  |
| 0,1276        | 0,909388          | 41,80016 | 2,039032        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,818776                  |
| 0,145         | 1,059819          | 61,31444 | 2,990948        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,119638                  |
| 0,1624        | 1,206092          | 79,30683 | 3,868627        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,412185                  |
| 0,1827        | 1,373154          | 97,99124 | 4,78006         | 0                 | 0                          | 0                       | 2,746307                  |
| 0,2117        | 1,605225          | 115,3022 | 5,624495        | 0                 | 0                          | 0                       | 3,21045                   |
| 0,5191        | 3,97999           | 132,1797 | 6,44779         | 0                 | 0                          | 0                       | 7,959985                  |
| 0,5626        | 4,313358          | 150,0384 | 7,318944        | 0                 | 0                          | 0                       | 8,626718                  |
| 0,5916        | 4,535602          | 168,2638 | 8,207989        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,071207                  |
| 0,6177        | 4,736302          | 186,4943 | 9,09728         | 0                 | 0                          | 0                       | 9,472607                  |
| 0,6438        | 4,935869          | 204,3015 | 9,965927        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,87174                   |
| 0,6699        | 5,136569          | 221,0159 | 10,78126        | 0                 | 0                          | 0                       | 10,27314                  |
| 0,6989        | 5,358058          | 238,445  | 11,63147        | 0                 | 0                          | 0                       | 10,71612                  |
| 0,7308        | 5,602603          | 256,7293 | 12,52338        | 0                 | 0                          | 0                       | 11,20521                  |
| 0,7627        | 5,847525          | 274,2482 | 13,37796        | 0                 | 0                          | 0                       | 11,69505                  |
| 0,7946        | 6,091692          | 291,1059 | 14,20029        | 0                 | 0                          | 0                       | 12,18338                  |
| 0,8294        | 6,358536          | 308,9118 | 15,06887        | 0                 | 0                          | 0                       | 12,71708                  |
| 0,8642        | 6,625759          | 325,8744 | 15,89631        | 0                 | 0                          | 0                       | 13,25152                  |
| 0,9019        | 6,914522          | 343,5268 | 16,75741        | 0                 | 0                          | 0                       | 13,82905                  |
| 0,9396        | 7,203293          | 360,5174 | 17,58622        | 0                 | 0                          | 0                       | 14,40658                  |

## Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 0,9802 | 7,514735 | 378,045  | 18,44122 | 0 | 0 | 0 | 15,02947 |
| 1,0208 | 7,826178 | 394,9723 | 19,26694 | 0 | 0 | 0 | 15,65236 |
| 1,0643 | 8,159925 | 412,3886 | 20,11652 | 0 | 0 | 0 | 16,31985 |
| 1,1107 | 8,515589 | 430,1286 | 20,98188 | 0 | 0 | 0 | 17,03118 |
| 1,1571 | 8,87126  | 447,1162 | 21,81055 | 0 | 0 | 0 | 17,74252 |
| 1,2064 | 9,249602 | 464,4877 | 22,65793 | 0 | 0 | 0 | 18,49921 |
| 1,2586 | 9,649496 | 481,924  | 23,50849 | 0 | 0 | 0 | 19,29898 |
| 1,3108 | 10,04976 | 498,8389 | 24,3336  | 0 | 0 | 0 | 20,09952 |
| 1,3659 | 10,47195 | 515,711  | 25,15663 | 0 | 0 | 0 | 20,9439  |
| 1,4239 | 10,91606 | 532,8892 | 25,9946  | 0 | 0 | 0 | 21,83212 |
| 1,4848 | 11,38323 | 550,0748 | 26,83292 | 0 | 0 | 0 | 22,76645 |
| 1,5486 | 11,87307 | 567,4849 | 27,68219 | 0 | 0 | 0 | 23,74615 |
| 1,6153 | 12,3837  | 584,621  | 28,5181  | 0 | 0 | 0 | 24,76741 |
| 1,6849 | 12,91778 | 601,8719 | 29,35961 | 0 | 0 | 0 | 25,83554 |
| 1,7574 | 13,47376 | 619,099  | 30,19995 | 0 | 0 | 0 | 26,94753 |
| 1,8328 | 14,05092 | 636,019  | 31,02532 | 0 | 0 | 0 | 28,10183 |
| 1,9111 | 14,65188 | 653,1399 | 31,86048 | 0 | 0 | 0 | 29,30376 |
| 1,9923 | 15,27402 | 670,0335 | 32,68455 | 0 | 0 | 0 | 30,54803 |
| 2,0764 | 15,91845 | 686,9326 | 33,50891 | 0 | 0 | 0 | 31,8369  |
| 2,1634 | 16,58632 | 703,6843 | 34,32607 | 0 | 0 | 0 | 33,17264 |
| 2,2533 | 17,27535 | 720,4    | 35,14146 | 0 | 0 | 0 | 34,55071 |
| 2,349  | 18,00785 | 737,3418 | 35,96789 | 0 | 0 | 0 | 36,01571 |
| 2,4447 | 18,74375 | 754,1309 | 36,78688 | 0 | 0 | 0 | 37,48751 |
| 2,5462 | 19,52161 | 770,8492 | 37,6024  | 0 | 0 | 0 | 39,04322 |
| 2,6535 | 20,34407 | 787,9051 | 38,43439 | 0 | 0 | 0 | 40,68813 |
| 2,7608 | 21,16501 | 804,5894 | 39,24825 | 0 | 0 | 0 | 42,33002 |
| 2,871  | 22,01127 | 821,4005 | 40,06832 | 0 | 0 | 0 | 44,02255 |
| 2,987  | 22,90063 | 838,2042 | 40,88802 | 0 | 0 | 0 | 45,80126 |
| 3,1059 | 23,81153 | 854,9232 | 41,70359 | 0 | 0 | 0 | 47,62307 |
| 3,2277 | 24,74625 | 871,6503 | 42,51954 | 0 | 0 | 0 | 49,49249 |
| 3,3524 | 25,70174 | 888,436  | 43,33833 | 0 | 0 | 0 | 51,40349 |
| 3,4829 | 26,70298 | 905,193  | 44,15575 | 0 | 0 | 0 | 53,40596 |
| 3,6163 | 27,725   | 922,1662 | 44,98372 | 0 | 0 | 0 | 55,45    |
| 3,7526 | 28,7697  | 938,9739 | 45,80361 | 0 | 0 | 0 | 57,5394  |
| 3,8918 | 29,8367  | 955,759  | 46,62239 | 0 | 0 | 0 | 59,6734  |
| 4,0368 | 30,94906 | 972,7621 | 47,4518  | 0 | 0 | 0 | 61,89811 |
| 4,1818 | 32,0599  | 989,5946 | 48,2729  | 0 | 0 | 0 | 64,1198  |
| 4,3326 | 33,21648 | 1006,36  | 49,09075 | 0 | 0 | 0 | 66,43296 |

## Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 4,4863 | 34,39461 | 1023,339 | 49,91897 | 0 | 0 | 0 | 68,78918 |
| 4,64   | 35,57348 | 1040,064 | 50,73483 | 0 | 0 | 0 | 71,14696 |
| 4,7995 | 36,7962  | 1056,796 | 51,55102 | 0 | 0 | 0 | 73,59244 |
| 4,9648 | 38,06353 | 1073,707 | 52,37596 | 0 | 0 | 0 | 76,12704 |
| 5,133  | 39,35277 | 1090,558 | 53,19795 | 0 | 0 | 0 | 78,70553 |
| 5,3041 | 40,66507 | 1107,492 | 54,02401 | 0 | 0 | 0 | 81,33011 |
| 5,481  | 42,02046 | 1124,285 | 54,84317 | 0 | 0 | 0 | 84,04093 |
| 5,6579 | 43,37736 | 1141,203 | 55,66843 | 0 | 0 | 0 | 86,75476 |
| 5,8406 | 44,77811 | 1157,958 | 56,48574 | 0 | 0 | 0 | 89,55622 |
| 6,0291 | 46,2227  | 1174,656 | 57,30028 | 0 | 0 | 0 | 92,4454  |
| 6,2234 | 47,71264 | 1191,521 | 58,12299 | 0 | 0 | 0 | 95,42529 |
| 6,4235 | 49,24719 | 1208,386 | 58,94565 | 0 | 0 | 0 | 98,49436 |
| 6,6294 | 50,82483 | 1225,284 | 59,76992 | 0 | 0 | 0 | 101,6497 |
| 6,8411 | 52,44856 | 1242,065 | 60,58857 | 0 | 0 | 0 | 104,8972 |
| 7,0615 | 54,13884 | 1258,794 | 61,40461 | 0 | 0 | 0 | 108,2776 |
| 7,2964 | 55,93872 | 1275,509 | 62,21995 | 0 | 0 | 0 | 111,8774 |
| 7,5487 | 57,87315 | 1292,186 | 63,03344 | 0 | 0 | 0 | 115,7463 |
| 7,9837 | 61,2087  | 1269,467 | 61,92523 | 0 | 0 | 0 | 122,4174 |
| 7,9866 | 61,23101 | 1250,224 | 60,98653 | 0 | 0 | 0 | 122,462  |
| 7,9895 | 61,2533  | 1214,25  | 59,23171 | 0 | 0 | 0 | 122,5066 |
| 7,9924 | 61,27599 | 1162,933 | 56,72844 | 0 | 0 | 0 | 122,552  |

## Зразок №9.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,0754     | 0,424457       | 3,434762 | 0,167549     | 0              | 0                    | 0                    | 0,848914            |
| 0,0957     | 0,617976       | 15,86735 | 0,774017     | 0              | 0                    | 0                    | 1,235952            |
| 0,1131     | 0,778612       | 35,73902 | 1,743367     | 0              | 0                    | 0                    | 1,557224            |
| 0,1276     | 0,909388       | 52,81175 | 2,576183     | 0              | 0                    | 0                    | 1,818776            |
| 0,145      | 1,059819       | 72,30593 | 3,52712      | 0              | 0                    | 0                    | 2,119638            |
| 0,1624     | 1,20647        | 89,71737 | 4,376456     | 0              | 0                    | 0                    | 2,412941            |
| 0,1827     | 1,373154       | 106,4325 | 5,191831     | 0              | 0                    | 0                    | 2,746307            |
| 0,4292     | 3,290202       | 123,1628 | 6,007939     | 0              | 0                    | 0                    | 6,580403            |
| 0,5278     | 4,046513       | 139,9361 | 6,826151     | 0              | 0                    | 0                    | 8,093024            |
| 0,5568     | 4,268757       | 156,7763 | 7,647629     | 0              | 0                    | 0                    | 8,537513            |
| 0,5829     | 4,468701       | 175,4863 | 8,560305     | 0              | 0                    | 0                    | 8,937406            |

## Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 0,6061 | 4,647102 | 192,4685 | 9,388705 | 0 | 0 | 0 | 9,294205 |
| 0,6322 | 4,847046 | 210,7679 | 10,28136 | 0 | 0 | 0 | 9,694091 |
| 0,6583 | 5,047368 | 228,1417 | 11,12886 | 0 | 0 | 0 | 10,09474 |
| 0,6873 | 5,269235 | 246,2875 | 12,01402 | 0 | 0 | 0 | 10,53847 |
| 0,7163 | 5,491858 | 263,5505 | 12,85612 | 0 | 0 | 0 | 10,98372 |
| 0,7453 | 5,713347 | 280,2877 | 13,67257 | 0 | 0 | 0 | 11,4267  |
| 0,7772 | 5,958647 | 298,0228 | 14,5377  | 0 | 0 | 0 | 11,9173  |
| 0,8091 | 6,203192 | 314,7586 | 15,35407 | 0 | 0 | 0 | 12,40639 |
| 0,8439 | 6,46928  | 332,643  | 16,22649 | 0 | 0 | 0 | 12,93856 |
| 0,8787 | 6,73688  | 349,8086 | 17,06383 | 0 | 0 | 0 | 13,47376 |
| 0,9164 | 7,025651 | 367,7028 | 17,93672 | 0 | 0 | 0 | 14,0513  |
| 0,9541 | 7,314796 | 384,8336 | 18,77237 | 0 | 0 | 0 | 14,62958 |
| 0,9947 | 7,626238 | 402,3674 | 19,62768 | 0 | 0 | 0 | 15,25247 |
| 1,0353 | 7,937307 | 419,2926 | 20,4533  | 0 | 0 | 0 | 15,87461 |
| 1,0788 | 8,271047 | 436,85   | 21,30976 | 0 | 0 | 0 | 16,54209 |
| 1,1223 | 8,604033 | 453,5964 | 22,12665 | 0 | 0 | 0 | 17,20807 |
| 1,1687 | 8,959704 | 470,6253 | 22,95733 | 0 | 0 | 0 | 17,91941 |
| 1,218  | 9,338047 | 488,1385 | 23,81164 | 0 | 0 | 0 | 18,6761  |
| 1,2673 | 9,716396 | 504,8232 | 24,62552 | 0 | 0 | 0 | 19,43278 |
| 1,3195 | 10,1159  | 521,9163 | 25,45933 | 0 | 0 | 0 | 20,23181 |
| 1,3746 | 10,53809 | 539,0581 | 26,29551 | 0 | 0 | 0 | 21,07619 |
| 1,4326 | 10,98296 | 556,319  | 27,13752 | 0 | 0 | 0 | 21,96592 |
| 1,4906 | 11,42782 | 573,0198 | 27,95218 | 0 | 0 | 0 | 22,85566 |
| 1,5515 | 11,89537 | 589,9039 | 28,7758  | 0 | 0 | 0 | 23,79074 |
| 1,6153 | 12,38408 | 606,6455 | 29,59246 | 0 | 0 | 0 | 24,76816 |
| 1,682  | 12,8951  | 623,5187 | 30,41555 | 0 | 0 | 0 | 25,79019 |
| 1,7516 | 13,42916 | 640,3677 | 31,23744 | 0 | 0 | 0 | 26,85832 |
| 1,8241 | 13,9844  | 657,1261 | 32,05493 | 0 | 0 | 0 | 27,96879 |
| 1,8995 | 14,56306 | 674,0875 | 32,88233 | 0 | 0 | 0 | 29,12612 |
| 1,9778 | 15,1629  | 690,9306 | 33,70394 | 0 | 0 | 0 | 30,3258  |
| 2,059  | 15,78503 | 707,8071 | 34,52716 | 0 | 0 | 0 | 31,57006 |
| 2,1431 | 16,43097 | 724,5674 | 35,34474 | 0 | 0 | 0 | 32,86194 |
| 2,233  | 17,12001 | 741,716  | 36,18126 | 0 | 0 | 0 | 34,24001 |
| 2,3229 | 17,80829 | 758,4404 | 36,9971  | 0 | 0 | 0 | 35,61657 |
| 2,4186 | 18,54079 | 775,4715 | 37,8279  | 0 | 0 | 0 | 37,08157 |
| 2,5143 | 19,27707 | 792,2639 | 38,64702 | 0 | 0 | 0 | 38,55413 |
| 2,6158 | 20,05492 | 809,1003 | 39,46831 | 0 | 0 | 0 | 40,10984 |
| 2,7202 | 20,85394 | 825,8667 | 40,28618 | 0 | 0 | 0 | 41,70788 |



## Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 2,8275 | 21,67791 | 842,9186 | 41,11798 | 0 | 0 | 0 | 43,35582 |
| 2,9377 | 22,52304 | 859,7357 | 41,93832 | 0 | 0 | 0 | 45,04609 |
| 3,0537 | 23,41165 | 876,7642 | 42,76898 | 0 | 0 | 0 | 46,82329 |
| 3,1726 | 24,32254 | 893,7473 | 43,59741 | 0 | 0 | 0 | 48,64509 |
| 3,2915 | 25,23496 | 910,541  | 44,41663 | 0 | 0 | 0 | 50,46992 |
| 3,4133 | 26,16891 | 927,2274 | 45,23061 | 0 | 0 | 0 | 52,33783 |
| 3,5409 | 27,14709 | 943,9184 | 46,04479 | 0 | 0 | 0 | 54,29418 |
| 3,6714 | 28,14795 | 960,9349 | 46,87487 | 0 | 0 | 0 | 56,29589 |
| 3,8048 | 29,16997 | 977,888  | 47,70185 | 0 | 0 | 0 | 58,33994 |
| 3,9411 | 30,21505 | 994,6724 | 48,52061 | 0 | 0 | 0 | 60,43009 |
| 4,0803 | 31,28243 | 1011,401 | 49,33666 | 0 | 0 | 0 | 62,56485 |
| 4,2224 | 32,37172 | 1028,391 | 50,16544 | 0 | 0 | 0 | 64,74345 |
| 4,3703 | 33,50562 | 1045,333 | 50,99186 | 0 | 0 | 0 | 67,01122 |
| 4,5182 | 34,63952 | 1062,23  | 51,81608 | 0 | 0 | 0 | 69,27902 |
| 4,669  | 35,7961  | 1079,081 | 52,6381  | 0 | 0 | 0 | 71,59224 |
| 4,8256 | 36,9954  | 1096,009 | 53,46385 | 0 | 0 | 0 | 73,99078 |
| 4,9851 | 38,21849 | 1112,776 | 54,28177 | 0 | 0 | 0 | 76,437   |
| 5,1475 | 39,46427 | 1129,746 | 55,10955 | 0 | 0 | 0 | 78,92851 |
| 5,3128 | 40,7316  | 1146,656 | 55,93444 | 0 | 0 | 0 | 81,46318 |
| 5,481  | 42,02084 | 1163,425 | 56,75242 | 0 | 0 | 0 | 84,04167 |
| 5,6521 | 43,33314 | 1180,198 | 57,57062 | 0 | 0 | 0 | 86,66631 |
| 5,829  | 44,68929 | 1196,927 | 58,38671 | 0 | 0 | 0 | 89,3786  |
| 6,0088 | 46,06698 | 1213,619 | 59,20089 | 0 | 0 | 0 | 92,13398 |
| 6,1944 | 47,49078 | 1230,323 | 60,01577 | 0 | 0 | 0 | 94,98153 |
| 6,3858 | 48,95842 | 1247,155 | 60,83681 | 0 | 0 | 0 | 97,91687 |
| 6,5859 | 50,49183 | 1264,046 | 61,66075 | 0 | 0 | 0 | 100,9837 |
| 6,7889 | 52,04868 | 1280,821 | 62,47909 | 0 | 0 | 0 | 104,0974 |
| 7,0035 | 53,69245 | 1297,56  | 63,29559 | 0 | 0 | 0 | 107,3849 |
| 7,2268 | 55,40578 | 1314,36  | 64,11511 | 0 | 0 | 0 | 110,8116 |
| 7,4646 | 57,22871 | 1331,049 | 64,92919 | 0 | 0 | 0 | 114,4574 |
| 7,7401 | 59,34004 | 1347,78  | 65,74534 | 0 | 0 | 0 | 118,68   |
| 8,2592 | 63,32078 | 1329,466 | 64,852   | 0 | 0 | 0 | 126,6416 |
| 8,2621 | 63,34308 | 1298,169 | 63,32532 | 0 | 0 | 0 | 126,6862 |
| 8,265  | 63,36539 | 1249,326 | 60,94272 | 0 | 0 | 0 | 126,7308 |
| 8,2679 | 63,38768 | 1187,807 | 57,9418  | 0 | 0 | 0 | 126,7754 |

## Продовження табл. Т.3

Зразок №10.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,0754     | 0,424079       | 6,201372 | 0,302506     | 0              | 0                    | 0                    | 0,848157            |
| 0,0957     | 0,617598       | 25,31871 | 1,235059     | 0              | 0                    | 0                    | 1,235195            |
| 0,1131     | 0,778612       | 44,42147 | 2,166901     | 0              | 0                    | 0                    | 1,557224            |
| 0,1305     | 0,934712       | 63,84543 | 3,114411     | 0              | 0                    | 0                    | 1,869424            |
| 0,1479     | 1,084387       | 82,27218 | 4,013276     | 0              | 0                    | 0                    | 2,168773            |
| 0,1653     | 1,230282       | 98,95979 | 4,827307     | 0              | 0                    | 0                    | 2,460564            |
| 0,1943     | 1,466512       | 116,136  | 5,66517      | 0              | 0                    | 0                    | 2,933023            |
| 0,5104     | 3,91309        | 133,5655 | 6,515389     | 0              | 0                    | 0                    | 7,826178            |
| 0,5452     | 4,179557       | 150,9937 | 7,365541     | 0              | 0                    | 0                    | 8,359111            |
| 0,5713     | 4,37988        | 169,0469 | 8,246188     | 0              | 0                    | 0                    | 8,759758            |
| 0,5945     | 4,557902       | 186,151  | 9,080538     | 0              | 0                    | 0                    | 9,115802            |
| 0,6206     | 4,758224       | 204,4995 | 9,975585     | 0              | 0                    | 0                    | 9,516449            |
| 0,6467     | 4,958169       | 221,2789 | 10,79409     | 0              | 0                    | 0                    | 9,916336            |
| 0,6757     | 5,180414       | 238,7642 | 11,64703     | 0              | 0                    | 0                    | 10,36082            |
| 0,7047     | 5,402658       | 255,692  | 12,47278     | 0              | 0                    | 0                    | 10,80531            |
| 0,7366     | 5,646825       | 273,749  | 13,35361     | 0              | 0                    | 0                    | 11,29365            |
| 0,7685     | 5,892125       | 291,2243 | 14,20606     | 0              | 0                    | 0                    | 11,78425            |
| 0,8004     | 6,135914       | 308,1053 | 15,02953     | 0              | 0                    | 0                    | 12,27183            |
| 0,8352     | 6,403136       | 325,8018 | 15,89277     | 0              | 0                    | 0                    | 12,80627            |
| 0,87       | 6,669981       | 342,706  | 16,71737     | 0              | 0                    | 0                    | 13,33996            |
| 0,9077     | 6,959124       | 360,6116 | 17,59081     | 0              | 0                    | 0                    | 13,91825            |
| 0,9454     | 7,247889       | 378,0122 | 18,43962     | 0              | 0                    | 0                    | 14,49578            |
| 0,986      | 7,559338       | 395,8894 | 19,31168     | 0              | 0                    | 0                    | 15,11868            |
| 1,0266     | 7,87078        | 413,0564 | 20,1491      | 0              | 0                    | 0                    | 15,74156            |
| 1,0701     | 8,204527       | 430,7639 | 21,01287     | 0              | 0                    | 0                    | 16,40905            |
| 1,1136     | 8,537513       | 447,9402 | 21,85074     | 0              | 0                    | 0                    | 17,07503            |
| 1,16       | 8,893184       | 465,5917 | 22,71179     | 0              | 0                    | 0                    | 17,78636            |
| 1,2064     | 9,249229       | 482,5279 | 23,53794     | 0              | 0                    | 0                    | 18,49845            |
| 1,2557     | 9,627191       | 499,9942 | 24,38996     | 0              | 0                    | 0                    | 19,25439            |
| 1,305      | 10,00516       | 516,7715 | 25,20836     | 0              | 0                    | 0                    | 20,01032            |
| 1,3572     | 10,40543       | 533,9638 | 26,04702     | 0              | 0                    | 0                    | 20,81085            |
| 1,4123     | 10,82724       | 551,3852 | 26,89684     | 0              | 0                    | 0                    | 21,65448            |
| 1,4674     | 11,25018       | 568,3632 | 27,72504     | 0              | 0                    | 0                    | 22,50036            |
| 1,5254     | 11,69505       | 585,5748 | 28,56463     | 0              | 0                    | 0                    | 23,3901             |
| 1,5863     | 12,16146       | 602,8109 | 29,40541     | 0              | 0                    | 0                    | 24,32292            |

## Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 1,6472 | 12,629   | 619,5185 | 30,22042 | 0 | 0 | 0 | 25,25801 |
| 1,711  | 13,1181  | 636,5149 | 31,0495  | 0 | 0 | 0 | 26,23619 |
| 1,7777 | 13,62797 | 653,3242 | 31,86947 | 0 | 0 | 0 | 27,25595 |
| 1,8473 | 14,1628  | 670,4817 | 32,70644 | 0 | 0 | 0 | 28,32559 |
| 1,9169 | 14,69648 | 687,1908 | 33,52149 | 0 | 0 | 0 | 29,39297 |
| 1,9923 | 15,27364 | 704,4654 | 34,36417 | 0 | 0 | 0 | 30,54728 |
| 2,0677 | 15,85193 | 721,2138 | 35,18115 | 0 | 0 | 0 | 31,70386 |
| 2,146  | 16,45328 | 737,9701 | 35,99856 | 0 | 0 | 0 | 32,90655 |
| 2,2272 | 17,07541 | 754,6511 | 36,81225 | 0 | 0 | 0 | 34,15081 |
| 2,3113 | 17,71984 | 771,5843 | 37,63827 | 0 | 0 | 0 | 35,43968 |
| 2,3983 | 18,38695 | 788,3206 | 38,45466 | 0 | 0 | 0 | 36,7739  |
| 2,4882 | 19,07674 | 805,3391 | 39,28483 | 0 | 0 | 0 | 38,15349 |
| 2,5839 | 19,81037 | 822,479  | 40,12092 | 0 | 0 | 0 | 39,62075 |
| 2,6796 | 20,54401 | 839,4235 | 40,94749 | 0 | 0 | 0 | 41,08801 |
| 2,7811 | 21,32187 | 856,49   | 41,77999 | 0 | 0 | 0 | 42,64373 |
| 2,8826 | 22,10048 | 873,5759 | 42,61347 | 0 | 0 | 0 | 44,20096 |
| 2,9899 | 22,92256 | 890,6591 | 43,44679 | 0 | 0 | 0 | 45,84511 |
| 3,1001 | 23,76693 | 907,5862 | 44,27249 | 0 | 0 | 0 | 47,53386 |
| 3,2103 | 24,61207 | 924,3359 | 45,08956 | 0 | 0 | 0 | 49,22413 |
| 3,3263 | 25,50218 | 941,3624 | 45,9201  | 0 | 0 | 0 | 51,00436 |
| 3,4423 | 26,39154 | 958,0455 | 46,73393 | 0 | 0 | 0 | 52,78307 |
| 3,5641 | 27,32474 | 974,7551 | 47,54902 | 0 | 0 | 0 | 54,64947 |
| 3,6859 | 28,25869 | 991,5375 | 48,36768 | 0 | 0 | 0 | 56,51738 |
| 3,8135 | 29,23687 | 1008,407 | 49,1906  | 0 | 0 | 0 | 58,47374 |
| 3,944  | 30,23697 | 1025,148 | 50,00724 | 0 | 0 | 0 | 60,47394 |
| 4,0774 | 31,26013 | 1042,152 | 50,83667 | 0 | 0 | 0 | 62,52025 |
| 4,2137 | 32,3052  | 1058,905 | 51,65393 | 0 | 0 | 0 | 64,61041 |
| 4,3529 | 33,37258 | 1075,608 | 52,46867 | 0 | 0 | 0 | 66,74516 |
| 4,495  | 34,46075 | 1092,285 | 53,28218 | 0 | 0 | 0 | 68,92151 |
| 4,64   | 35,57348 | 1109,032 | 54,09914 | 0 | 0 | 0 | 71,14696 |
| 4,7908 | 36,72893 | 1125,923 | 54,92309 | 0 | 0 | 0 | 73,45784 |
| 4,9445 | 37,90818 | 1142,612 | 55,73719 | 0 | 0 | 0 | 75,81636 |
| 5,104  | 39,13015 | 1159,302 | 56,5513  | 0 | 0 | 0 | 78,26031 |
| 5,2664 | 40,37517 | 1175,982 | 57,36495 | 0 | 0 | 0 | 80,75036 |
| 5,4346 | 41,66555 | 1192,877 | 58,18916 | 0 | 0 | 0 | 83,33111 |
| 5,6086 | 42,99902 | 1209,6   | 59,00489 | 0 | 0 | 0 | 85,99804 |
| 5,7855 | 44,35592 | 1226,348 | 59,82186 | 0 | 0 | 0 | 88,71187 |
| 5,9711 | 45,77783 | 1243,151 | 60,64149 | 0 | 0 | 0 | 91,55569 |

Продовження табл. Т.3

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 6,1654 | 47,26816 | 1260,026 | 61,46471 | 0 | 0 | 0 | 94,53631 |
| 6,3742 | 48,86884 | 1276,745 | 62,28026 | 0 | 0 | 0 | 97,73771 |
| 6,6004 | 50,60296 | 1293,538 | 63,09945 | 0 | 0 | 0 | 101,2059 |
| 6,8904 | 52,82616 | 1310,305 | 63,91735 | 0 | 0 | 0 | 105,6523 |
| 7,134  | 54,69407 | 1292,413 | 63,04457 | 0 | 0 | 0 | 109,3881 |
| 7,1572 | 54,87209 | 1274,131 | 62,15276 | 0 | 0 | 0 | 109,7442 |
| 7,163  | 54,91669 | 1226,596 | 59,83396 | 0 | 0 | 0 | 109,8334 |
| 7,1659 | 54,93936 | 1178,536 | 57,48956 | 0 | 0 | 0 | 109,8787 |

Таблиця Т.4

Результати випробувань зразків з ПВХ з додаванням частинок довгої фракції ( $l/d = 8...10$ ) у напрямку відливу, отриманих на розривній машині „Instron-4200” при температурі  $T=20^{\circ}\text{C}$ .

Зразок №1.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetition s Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                     | 0                   |
| 0,078      | 0,447168       | -21,9167 | -1,05369     | 0              | 0                    | 0                     | 0,894336            |
| 0,102      | 0,687888       | 1,133985 | 0,054519     | 0              | 0                    | 0                     | 1,375777            |
| 0,12       | 0,862512       | 18,58527 | 0,893523     | 0              | 0                    | 0                     | 1,725025            |
| 0,135      | 1,004088       | 37,90213 | 1,822218     | 0              | 0                    | 0                     | 2,008176            |
| 0,153      | 1,16688        | 58,66945 | 2,820647     | 0              | 0                    | 0                     | 2,333761            |
| 0,174      | 1,352112       | 78,18257 | 3,758776     | 0              | 0                    | 0                     | 2,704225            |
| 0,195      | 1,531633       | 98,82072 | 4,750995     | 0              | 0                    | 0                     | 3,063265            |
| 0,219      | 1,731961       | 117,503  | 5,649181     | 0              | 0                    | 0                     | 3,463921            |
| 0,471      | 3,76829        | 135,6576 | 6,521999     | 0              | 0                    | 0                     | 7,536578            |
| 0,588      | 4,70465        | 153,6757 | 7,388258     | 0              | 0                    | 0                     | 9,409298            |
| 0,618      | 4,944146       | 171,7469 | 8,257068     | 0              | 0                    | 0                     | 9,888293            |
| 0,645      | 5,160794       | 191,6423 | 9,213574     | 0              | 0                    | 0                     | 10,32159            |
| 0,669      | 5,352147       | 210,7878 | 10,13403     | 0              | 0                    | 0                     | 10,70429            |
| 0,702      | 5,616122       | 230,5311 | 11,08323     | 0              | 0                    | 0                     | 11,23224            |
| 0,729      | 5,831955       | 249,9825 | 12,01839     | 0              | 0                    | 0                     | 11,66391            |
| 0,765      | 6,119595       | 268,4089 | 12,90427     | 0              | 0                    | 0                     | 12,23919            |
| 0,795      | 6,360315       | 287,7604 | 13,83463     | 0              | 0                    | 0                     | 12,72063            |
| 0,834      | 6,672027       | 306,1275 | 14,71767     | 0              | 0                    | 0                     | 13,34406            |
| 0,867      | 6,935595       | 324,8021 | 15,61548     | 0              | 0                    | 0                     | 13,87119            |
| 0,909      | 7,272194       | 344,3675 | 16,55613     | 0              | 0                    | 0                     | 14,54439            |
| 0,954      | 7,632461       | 363,1376 | 17,45854     | 0              | 0                    | 0                     | 15,26492            |
| 0,99       | 7,920504       | 381,3007 | 18,33176     | 0              | 0                    | 0                     | 15,84102            |
| 1,038      | 8,304437       | 399,6739 | 19,21509     | 0              | 0                    | 0                     | 16,60887            |
| 1,089      | 8,712029       | 417,7459 | 20,08394     | 0              | 0                    | 0                     | 17,42406            |
| 1,137      | 9,096365       | 435,9689 | 20,96004     | 0              | 0                    | 0                     | 18,19273            |
| 1,185      | 9,47988        | 454,2173 | 21,83737     | 0              | 0                    | 0                     | 18,95977            |
| 1,242      | 9,936439       | 472,605  | 22,72139     | 0              | 0                    | 0                     | 19,87287            |
| 1,305      | 10,44032       | 491,7604 | 23,64232     | 0              | 0                    | 0                     | 20,88063            |
| 1,368      | 10,94379       | 509,7615 | 24,50776     | 0              | 0                    | 0                     | 21,88758            |
| 1,434      | 11,47134       | 527,9651 | 25,38294     | 0              | 0                    | 0                     | 22,94266            |
| 1,503      | 12,02376       | 546,1533 | 26,25737     | 0              | 0                    | 0                     | 24,04753            |
| 1,578      | 12,62475       | 564,2783 | 27,12876     | 0              | 0                    | 0                     | 25,2495             |
| 1,668      | 13,34406       | 582,5029 | 28,00495     | 0              | 0                    | 0                     | 26,6881             |

## Продовження табл. Т.4

|       |          |          |          |   |   |   |          |
|-------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 1,749 | 13,99278 | 601,5203 | 28,91925 | 0 | 0 | 0 | 27,98555 |
| 1,83  | 14,63905 | 619,7075 | 29,79363 | 0 | 0 | 0 | 29,27809 |
| 1,935 | 15,47994 | 638,0358 | 30,6748  | 0 | 0 | 0 | 30,95987 |
| 2,019 | 16,15232 | 656,0537 | 31,54105 | 0 | 0 | 0 | 32,30464 |
| 2,133 | 17,06338 | 674,4886 | 32,42734 | 0 | 0 | 0 | 34,12677 |
| 2,232 | 17,85613 | 692,4898 | 33,29278 | 0 | 0 | 0 | 35,71225 |
| 2,34  | 18,71986 | 710,5193 | 34,15959 | 0 | 0 | 0 | 37,43973 |
| 2,463 | 19,70396 | 728,8258 | 35,03969 | 0 | 0 | 0 | 39,40793 |
| 2,589 | 20,71254 | 747,1577 | 35,92104 | 0 | 0 | 0 | 41,42508 |
| 2,718 | 21,74478 | 765,3197 | 36,79421 | 0 | 0 | 0 | 43,48956 |
| 2,85  | 22,79864 | 783,6905 | 37,67741 | 0 | 0 | 0 | 45,59728 |
| 2,985 | 23,88066 | 802,3471 | 38,57437 | 0 | 0 | 0 | 47,76132 |

## Зразок №1

|          |          |          |          |   |   |   |          |
|----------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 3,123    | 24,98348 | 820,4033 | 39,44245 | 0 | 0 | 0 | 49,96697 |
| 3,291    | 26,32703 | 838,4047 | 40,3079  | 0 | 0 | 0 | 52,65405 |
| 3,435    | 27,48044 | 856,9174 | 41,19794 | 0 | 0 | 0 | 54,96089 |
| 3,582    | 28,6563  | 874,9714 | 42,06594 | 0 | 0 | 0 | 57,3126  |
| 3,759    | 30,07247 | 893,4502 | 42,95434 | 0 | 0 | 0 | 60,14493 |
| 3,939    | 31,51148 | 911,4566 | 43,82004 | 0 | 0 | 0 | 63,02298 |
| 4,092    | 32,73548 | 929,9383 | 44,70858 | 0 | 0 | 0 | 65,47098 |
| 4,278    | 34,22346 | 948,1421 | 45,58375 | 0 | 0 | 0 | 68,44692 |
| 4,467    | 35,73592 | 966,2422 | 46,45396 | 0 | 0 | 0 | 71,47183 |
| 4,659    | 37,27122 | 984,5777 | 47,33547 | 0 | 0 | 0 | 74,54246 |
| 4,851    | 38,80816 | 1002,724 | 48,20789 | 0 | 0 | 0 | 77,61629 |
| 5,046    | 40,36753 | 1020,786 | 49,07624 | 0 | 0 | 0 | 80,73504 |
| 5,244    | 41,9518  | 1039,02  | 49,95292 | 0 | 0 | 0 | 83,90362 |
| 5,445    | 43,55932 | 1057,676 | 50,84978 | 0 | 0 | 0 | 87,11863 |
| 5,646    | 45,16847 | 1075,758 | 51,71911 | 0 | 0 | 0 | 90,33696 |
| 5,886    | 47,08812 | 1093,913 | 52,59195 | 0 | 0 | 0 | 94,17622 |
| 6,093    | 48,74419 | 1112,53  | 53,48701 | 0 | 0 | 0 | 97,48836 |
| 6,303    | 50,42434 | 1130,702 | 54,36066 | 0 | 0 | 0 | 100,8487 |
| 6,546    | 52,36805 | 1148,895 | 55,23531 | 0 | 0 | 0 | 104,7361 |
| 6,795    | 54,3595  | 1167,182 | 56,11452 | 0 | 0 | 0 | 108,719  |
| 7,008    | 56,06371 | 1185,535 | 56,99686 | 0 | 0 | 0 | 112,1274 |
| 7,263    | 58,10412 | 1203,969 | 57,8831  | 0 | 0 | 0 | 116,2082 |
| 7,521    | 60,16778 | 1222,316 | 58,76518 | 0 | 0 | 0 | 120,3355 |
| 7,782    | 62,25593 | 1240,801 | 59,65389 | 0 | 0 | 0 | 124,5118 |
| 8,046    | 64,36815 | 1259,214 | 60,53917 | 0 | 0 | 0 | 128,7363 |
| 8,355    | 66,83981 | 1277,578 | 61,42203 | 0 | 0 | 0 | 133,6796 |
| 7,8775   | 68,99977 | 1295,872 | 62,30152 | 0 | 0 | 0 | 137,9995 |
| 8,16794  | 71,54405 | 1314,066 | 63,17622 | 0 | 0 | 0 | 143,0881 |
| 8,46386  | 74,13732 | 1332,385 | 64,057   | 0 | 0 | 0 | 148,2746 |
| 8,768    | 76,79952 | 1350,817 | 64,94315 | 0 | 0 | 0 | 153,599  |
| 9,1242   | 79,91986 | 1369,094 | 65,82181 | 0 | 0 | 0 | 159,8398 |
| 9,54068  | 83,56745 | 1387,135 | 66,68916 | 0 | 0 | 0 | 167,1348 |
| 10,50516 | 92,01629 | 1368,935 | 65,81416 | 0 | 0 | 0 | 184,0326 |
| 10,549   | 92,40019 | 1350,829 | 64,94368 | 0 | 0 | 0 | 184,8004 |
| 10,56544 | 92,54383 | 1328,642 | 63,87701 | 0 | 0 | 0 | 185,0877 |
| 10,56818 | 92,56752 | 1303,944 | 62,68964 | 0 | 0 | 0 | 185,135  |
| 10,57092 | 92,59157 | 1261,576 | 60,65268 | 0 | 0 | 0 | 185,1831 |
| 10,57366 | 92,61605 | 1204,599 | 57,91342 | 0 | 0 | 0 | 185,2321 |

## Продовження табл. Т.4

## Зразок №2.

| "Time<br>sec" | "Extension<br>mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle<br>Count " | "Total Cycle<br>Count " | "Repetitions<br>Count " | "Strain<br>[Exten.] %" |
|---------------|-------------------|----------|--------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| 0             | 0                 | 0        | 0            | 0                 | 0                       | 0                       | 0                      |
| 0,07398       | 0,487968          | -13,9998 | -0,67307     | 0                 | 0                       | 0                       | 0,975936               |
| 0,09316       | 0,696048          | 5,09438  | 0,244922     | 0                 | 0                       | 0                       | 1,392097               |
| 0,1096        | 0,869041          | 24,01765 | 1,154695     | 0                 | 0                       | 0                       | 1,738081               |
| 0,12604       | 1,03632           | 43,27239 | 2,080403     | 0                 | 0                       | 0                       | 2,072641               |
| 0,14248       | 1,197073          | 61,64631 | 2,963765     | 0                 | 0                       | 0                       | 2,394145               |
| 0,16166       | 1,379857          | 81,30118 | 3,908711     | 0                 | 0                       | 0                       | 2,759713               |
| 0,18358       | 1,582633          | 101,4816 | 4,878923     | 0                 | 0                       | 0                       | 3,165265               |
| 0,21098       | 1,832329          | 120,8087 | 5,80811      | 0                 | 0                       | 0                       | 3,664657               |
| 0,5069        | 4,439858          | 139,0203 | 6,683669     | 0                 | 0                       | 0                       | 8,879717               |
| 0,55622       | 4,87193           | 158,3414 | 7,612567     | 0                 | 0                       | 0                       | 9,743861               |
| 0,58362       | 5,11265           | 176,9653 | 8,507945     | 0                 | 0                       | 0                       | 10,2253                |
| 0,60828       | 5,328074          | 195,1744 | 9,383386     | 0                 | 0                       | 0                       | 10,65615               |
| 0,63568       | 5,568386          | 214,3726 | 10,30638     | 0                 | 0                       | 0                       | 11,13677               |
| 0,66582       | 5,832363          | 233,7428 | 11,23764     | 0                 | 0                       | 0                       | 11,66473               |
| 0,69596       | 6,095931          | 251,8649 | 12,10889     | 0                 | 0                       | 0                       | 12,19186               |
| 0,72884       | 6,383979          | 270,678  | 13,01337     | 0                 | 0                       | 0                       | 12,76795               |
| 0,76446       | 6,695691          | 289,9269 | 13,9388      | 0                 | 0                       | 0                       | 13,39138               |
| 0,80008       | 7,007811          | 308,1936 | 14,817       | 0                 | 0                       | 0                       | 14,01562               |
| 0,83844       | 7,344             | 326,7398 | 15,70864     | 0                 | 0                       | 0                       | 14,68801               |
| 0,87954       | 7,703856          | 345,4832 | 16,60977     | 0                 | 0                       | 0                       | 15,40772               |
| 0,92338       | 8,088192          | 364,1882 | 17,50905     | 0                 | 0                       | 0                       | 16,17639               |
| 0,96996       | 8,496194          | 382,7488 | 18,40139     | 0                 | 0                       | 0                       | 16,99239               |
| 1,01928       | 8,928266          | 401,198  | 19,28837     | 0                 | 0                       | 0                       | 17,85653               |
| 1,07134       | 9,383191          | 419,3038 | 20,15883     | 0                 | 0                       | 0                       | 18,76638               |
| 1,12888       | 9,887882          | 438,0753 | 21,06131     | 0                 | 0                       | 0                       | 19,77577               |
| 1,18916       | 10,41665          | 456,3657 | 21,94066     | 0                 | 0                       | 0                       | 20,83331               |
| 1,25492       | 10,99153          | 474,9234 | 22,83286     | 0                 | 0                       | 0                       | 21,98305               |
| 1,32342       | 11,59169          | 493,0992 | 23,70669     | 0                 | 0                       | 0                       | 23,18339               |
| 1,3974        | 12,2396           | 511,4871 | 24,59072     | 0                 | 0                       | 0                       | 24,47919               |
| 1,47686       | 12,93646          | 530,0294 | 25,48218     | 0                 | 0                       | 0                       | 25,87293               |
| 1,5618        | 13,68107          | 548,4429 | 26,36744     | 0                 | 0                       | 0                       | 27,36212               |
| 1,65222       | 14,47258          | 566,943  | 27,25687     | 0                 | 0                       | 0                       | 28,94517               |
| 1,74812       | 15,31184          | 585,3208 | 28,14042     | 0                 | 0                       | 0                       | 30,62367               |
| 1,8495        | 16,20006          | 603,7841 | 29,02808     | 0                 | 0                       | 0                       | 32,40011               |
| 1,95636       | 17,13478          | 622,0978 | 29,90855     | 0                 | 0                       | 0                       | 34,26957               |
| 2,0687        | 18,12051          | 640,3953 | 30,78824     | 0                 | 0                       | 0                       | 36,24102               |
| 2,18652       | 19,15194          | 658,6438 | 31,66556     | 0                 | 0                       | 0                       | 38,30388               |
| 2,30982       | 20,23191          | 676,6484 | 32,53118     | 0                 | 0                       | 0                       | 40,46383               |
| 2,4386        | 21,36044          | 694,6798 | 33,39806     | 0                 | 0                       | 0                       | 42,72088               |
| 2,5756        | 22,55996          | 712,8967 | 34,27388     | 0                 | 0                       | 0                       | 45,11992               |
| 2,71808       | 23,80803          | 731,1809 | 35,15291     | 0                 | 0                       | 0                       | 47,61607               |
| 2,86604       | 25,10384          | 749,2774 | 36,02294     | 0                 | 0                       | 0                       | 50,20768               |
| 3,01948       | 26,44698          | 767,3422 | 36,89144     | 0                 | 0                       | 0                       | 52,89396               |
| 3,1784        | 27,8403           | 785,4271 | 37,76093     | 0                 | 0                       | 0                       | 55,6806                |
| 3,34554       | 29,3042           | 803,669  | 38,63793     | 0                 | 0                       | 0                       | 58,60841               |
| 3,51542       | 30,79218          | 821,7137 | 39,50545     | 0                 | 0                       | 0                       | 61,58436               |
| 3,69078       | 32,32789          | 839,7734 | 40,37371     | 0                 | 0                       | 0                       | 64,65579               |
| 3,87162       | 33,91176          | 857,7857 | 41,23969     | 0                 | 0                       | 0                       | 67,8235                |
| 4,05794       | 35,54375          | 875,9606 | 42,1135      | 0                 | 0                       | 0                       | 71,08749               |
| 4,24974       | 37,22349          | 894,0514 | 42,98324     | 0                 | 0                       | 0                       | 74,44699               |
| 4,44702       | 38,9526           | 912,2537 | 43,85836     | 0                 | 0                       | 0                       | 77,90515               |

## Продовження табл. Т.4

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 4,64978 | 40,7278  | 930,425  | 44,73198 | 0 | 0 | 0 | 81,45562 |
| 4,86076 | 42,57522 | 948,6079 | 45,60615 | 0 | 0 | 0 | 85,15044 |
| 5,07448 | 44,44754 | 966,7102 | 46,47643 | 0 | 0 | 0 | 88,89509 |
| 5,29368 | 46,3684  | 984,8585 | 47,34897 | 0 | 0 | 0 | 92,73679 |
| 5,51836 | 48,33619 | 1003,064 | 48,22422 | 0 | 0 | 0 | 96,67238 |
| 5,74852 | 50,35212 | 1021,141 | 49,0933  | 0 | 0 | 0 | 100,7042 |
| 5,98416 | 52,4166  | 1039,165 | 49,95988 | 0 | 0 | 0 | 104,8332 |
| 6,22802 | 54,55248 | 1057,308 | 50,83211 | 0 | 0 | 0 | 109,105  |
| 6,47736 | 56,73528 | 1075,406 | 51,70224 | 0 | 0 | 0 | 113,4706 |
| 6,73492 | 58,99275 | 1093,416 | 52,56806 | 0 | 0 | 0 | 117,9855 |
| 7,00344 | 61,34486 | 1111,544 | 53,4396  | 0 | 0 | 0 | 122,6897 |
| 7,28566 | 63,81612 | 1129,65  | 54,31008 | 0 | 0 | 0 | 127,6322 |
| 7,57884 | 66,38448 | 1147,704 | 55,17806 | 0 | 0 | 0 | 132,7689 |
| 7,89394 | 69,14379 | 1165,796 | 56,04789 | 0 | 0 | 0 | 138,2876 |
| 8,24466 | 72,21521 | 1183,804 | 56,91365 | 0 | 0 | 0 | 144,4304 |
| 8,71046 | 76,2948  | 1201,812 | 57,77945 | 0 | 0 | 0 | 152,5896 |
| 8,97624 | 78,62407 | 1183,461 | 56,89716 | 0 | 0 | 0 | 157,2481 |
| 9,0146  | 78,96067 | 1165,08  | 56,01349 | 0 | 0 | 0 | 157,9214 |
| 9,03378 | 79,12793 | 1144,124 | 55,00596 | 0 | 0 | 0 | 158,2559 |
| 9,04474 | 79,22383 | 1124,299 | 54,05281 | 0 | 0 | 0 | 158,4477 |
| 9,05296 | 79,29605 | 1099,244 | 52,84826 | 0 | 0 | 0 | 158,5921 |
| 9,0557  | 79,32053 | 1078,837 | 51,86717 | 0 | 0 | 0 | 158,6411 |
| 9,05844 | 79,34465 | 1044,886 | 50,23488 | 0 | 0 | 0 | 158,6892 |

## Зразок №3.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Extens.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                    |
| 0,07398    | 0,488784       | -43,8553 | -2,10843     | 0              | 0                    | 0                    | 0,977568             |
| 0,0959     | 0,72624        | -24,4969 | -1,17773     | 0              | 0                    | 0                    | 1,45248              |
| 0,11782    | 0,954312       | -5,96772 | -0,28691     | 0              | 0                    | 0                    | 1,908625             |
| 0,14796    | 1,249705       | 13,36234 | 0,64242      | 0              | 0                    | 0                    | 2,499409             |
| 0,1781     | 1,532857       | 32,6557  | 1,569985     | 0              | 0                    | 0                    | 3,065714             |
| 0,20002    | 1,732776       | 51,612   | 2,481346     | 0              | 0                    | 0                    | 3,465553             |
| 0,2192     | 1,906584       | 69,71286 | 3,35158      | 0              | 0                    | 0                    | 3,81317              |
| 0,24112    | 2,102017       | 88,85916 | 4,272075     | 0              | 0                    | 0                    | 4,204033             |
| 0,26852    | 2,346001       | 108,0287 | 5,193687     | 0              | 0                    | 0                    | 4,692002             |
| 0,30688    | 2,684641       | 126,0857 | 6,061812     | 0              | 0                    | 0                    | 5,369282             |
| 0,58088    | 5,088986       | 144,5429 | 6,949178     | 0              | 0                    | 0                    | 10,17797             |
| 0,6165     | 5,40029        | 163,2254 | 7,847374     | 0              | 0                    | 0                    | 10,80058             |
| 0,64664    | 5,663858       | 183,1596 | 8,805751     | 0              | 0                    | 0                    | 11,32772             |
| 0,6713     | 5,880098       | 201,5272 | 9,68881      | 0              | 0                    | 0                    | 11,7602              |
| 0,69596    | 6,095931       | 220,731  | 10,61207     | 0              | 0                    | 0                    | 12,19186             |
| 0,72062    | 6,312171       | 239,5801 | 11,51827     | 0              | 0                    | 0                    | 12,62434             |
| 0,74802    | 6,551667       | 259,4902 | 12,47549     | 0              | 0                    | 0                    | 13,10333             |
| 0,77542    | 6,79198        | 278,2731 | 13,37851     | 0              | 0                    | 0                    | 13,58396             |
| 0,80556    | 7,055955       | 297,8486 | 14,31964     | 0              | 0                    | 0                    | 14,11191             |
| 0,8357     | 7,31993        | 316,4237 | 15,21268     | 0              | 0                    | 0                    | 14,63986             |
| 0,86858    | 7,607981       | 335,6487 | 16,13696     | 0              | 0                    | 0                    | 15,21596             |
| 0,90146    | 7,896031       | 353,8958 | 17,01422     | 0              | 0                    | 0                    | 15,79206             |
| 0,93708    | 8,208144       | 372,5713 | 17,91208     | 0              | 0                    | 0                    | 16,4163              |

## Продовження табл. Т.4

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 0,97544 | 8,54393  | 391,6332 | 18,82852 | 0 | 0 | 0 | 17,08786 |
| 1,0138  | 8,88053  | 409,704  | 19,69731 | 0 | 0 | 0 | 17,76106 |
| 1,0549  | 9,239983 | 427,8678 | 20,57057 | 0 | 0 | 0 | 18,47996 |
| 1,09874 | 9,623909 | 446,2188 | 21,45282 | 0 | 0 | 0 | 19,24782 |
| 1,14532 | 10,03231 | 464,5943 | 22,33626 | 0 | 0 | 0 | 20,06464 |
| 1,19464 | 10,46439 | 483,0238 | 23,2223  | 0 | 0 | 0 | 20,92878 |
| 1,2467  | 10,91971 | 501,3354 | 24,10266 | 0 | 0 | 0 | 21,83944 |
| 1,3015  | 11,39952 | 519,4549 | 24,9738  | 0 | 0 | 0 | 22,79905 |
| 1,35904 | 11,90341 | 537,61   | 25,84664 | 0 | 0 | 0 | 23,80681 |
| 1,42206 | 12,45584 | 556,2221 | 26,74145 | 0 | 0 | 0 | 24,91168 |
| 1,48782 | 13,03235 | 574,6795 | 27,62883 | 0 | 0 | 0 | 26,06468 |
| 1,55632 | 13,63292 | 592,6853 | 28,49448 | 0 | 0 | 0 | 27,26584 |
| 1,6303  | 14,28    | 611,1593 | 29,38266 | 0 | 0 | 0 | 28,56001 |
| 1,70702 | 14,95198 | 629,3277 | 30,25614 | 0 | 0 | 0 | 29,90396 |
| 1,78922 | 15,6721  | 647,8198 | 31,14518 | 0 | 0 | 0 | 31,34421 |
| 1,87416 | 16,41588 | 666,0873 | 32,02343 | 0 | 0 | 0 | 32,83177 |
| 1,96458 | 17,20741 | 684,2977 | 32,89893 | 0 | 0 | 0 | 34,41481 |
| 2,05774 | 18,02422 | 702,4093 | 33,76968 | 0 | 0 | 0 | 36,04845 |
| 2,15638 | 18,88837 | 720,5796 | 34,64324 | 0 | 0 | 0 | 37,77674 |
| 2,2605  | 19,80025 | 738,9331 | 35,52563 | 0 | 0 | 0 | 39,6005  |
| 2,36736 | 20,73661 | 756,9598 | 36,39229 | 0 | 0 | 0 | 41,47322 |
| 2,4797  | 21,7203  | 774,9835 | 37,25884 | 0 | 0 | 0 | 43,4406  |
| 2,59752 | 22,75172 | 793,3486 | 38,14175 | 0 | 0 | 0 | 45,50344 |
| 2,72082 | 23,83251 | 811,7071 | 39,02438 | 0 | 0 | 0 | 47,66503 |
| 2,84686 | 24,93534 | 829,7878 | 39,89364 | 0 | 0 | 0 | 49,87068 |
| 2,97838 | 26,08753 | 848,0045 | 40,76945 | 0 | 0 | 0 | 52,17507 |
| 3,11264 | 27,2642  | 866,1204 | 41,6404  | 0 | 0 | 0 | 54,52841 |
| 3,25238 | 28,48861 | 884,1766 | 42,5085  | 0 | 0 | 0 | 56,97722 |
| 3,3976  | 29,75994 | 902,3508 | 43,38224 | 0 | 0 | 0 | 59,51988 |
| 3,54556 | 31,05575 | 920,3551 | 44,24784 | 0 | 0 | 0 | 62,1115  |
| 3,699   | 32,40011 | 938,538  | 45,12201 | 0 | 0 | 0 | 64,80022 |
| 3,85518 | 33,76814 | 956,6438 | 45,99251 | 0 | 0 | 0 | 67,53627 |
| 4,01684 | 35,18389 | 974,8642 | 46,86846 | 0 | 0 | 0 | 70,3678  |
| 4,18124 | 36,62454 | 993,0384 | 47,74224 | 0 | 0 | 0 | 73,24906 |
| 4,35112 | 38,11211 | 1011,27  | 48,61875 | 0 | 0 | 0 | 76,22424 |
| 4,52374 | 39,62375 | 1029,38  | 49,48945 | 0 | 0 | 0 | 79,24752 |
| 4,70184 | 41,18354 | 1047,619 | 50,36628 | 0 | 0 | 0 | 82,36706 |
| 4,88542 | 42,79188 | 1065,838 | 51,24221 | 0 | 0 | 0 | 85,58374 |
| 5,07174 | 44,42387 | 1083,982 | 52,11449 | 0 | 0 | 0 | 88,84771 |
| 5,2608  | 46,07954 | 1101,987 | 52,98018 | 0 | 0 | 0 | 92,15906 |
| 5,45534 | 47,78376 | 1120,21  | 53,85623 | 0 | 0 | 0 | 95,56747 |
| 5,65262 | 49,51205 | 1138,296 | 54,72577 | 0 | 0 | 0 | 99,02412 |
| 5,85538 | 51,28808 | 1156,437 | 55,59795 | 0 | 0 | 0 | 102,5762 |
| 6,06362 | 53,11224 | 1174,578 | 56,47013 | 0 | 0 | 0 | 106,2245 |
| 6,27734 | 54,98374 | 1192,793 | 57,34581 | 0 | 0 | 0 | 109,9675 |
| 6,4938  | 56,88012 | 1210,866 | 58,21474 | 0 | 0 | 0 | 113,7602 |
| 6,71848 | 58,84831 | 1229,017 | 59,08733 | 0 | 0 | 0 | 117,6966 |
| 6,95412 | 60,91238 | 1247,057 | 59,95463 | 0 | 0 | 0 | 121,8248 |
| 7,19524 | 63,0242  | 1265,057 | 60,82006 | 0 | 0 | 0 | 126,0484 |
| 7,45006 | 65,25514 | 1283,154 | 61,69013 | 0 | 0 | 0 | 130,5103 |
| 7,71858 | 67,60848 | 1301,221 | 62,55868 | 0 | 0 | 0 | 135,2169 |
| 8,00628 | 70,12707 | 1319,324 | 63,42903 | 0 | 0 | 0 | 140,2541 |
| 8,33782 | 73,03162 | 1337,385 | 64,29736 | 0 | 0 | 0 | 146,0632 |
| 8,81458 | 77,20834 | 1293,81  | 62,20243 | 0 | 0 | 0 | 154,4167 |
| 8,81732 | 77,23238 | 1250,04  | 60,09804 | 0 | 0 | 0 | 154,4648 |



## Продовження табл. Т.4

## Зразок №4

| "Time<br>sec" | "Extension<br>mm" | "Load N" | "Stress<br>MPa" | "Cycle<br>Count " | "Total<br>Cycle<br>Count " | "Repetitions<br>Count " | "Strain<br>[Exten.] %" |
|---------------|-------------------|----------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|
| 0             | 0                 | 0        | 0               | 0                 | 0                          | 0                       | 0                      |
| 0,07124       | 0,439093          | -14,1522 | -0,6804         | 0                 | 0                          | 0                       | 0,878186               |
| 0,09042       | 0,639285          | 5,028223 | 0,241742        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,278571               |
| 0,10686       | 0,80546           | 24,77568 | 1,191139        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,610921               |
| 0,1233        | 0,966943          | 45,33906 | 2,179762        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,933887               |
| 0,13974       | 1,121779          | 65,08553 | 3,129112        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,243558               |
| 0,15618       | 1,272706          | 83,00272 | 3,990517        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,545411               |
| 0,17536       | 1,444745          | 101,0905 | 4,86012         | 0                 | 0                          | 0                       | 2,889492               |
| 0,20276       | 1,684429          | 118,3496 | 5,689885        | 0                 | 0                          | 0                       | 3,368857               |
| 0,50142       | 4,209117          | 135,9459 | 6,535864        | 0                 | 0                          | 0                       | 8,418235               |
| 0,53704       | 4,508232          | 153,7553 | 7,39208         | 0                 | 0                          | 0                       | 9,016465               |
| 0,56444       | 4,73814           | 172,3081 | 8,284043        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,476281               |
| 0,5891        | 4,945761          | 190,174  | 9,142983        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,891523               |
| 0,61376       | 5,152209          | 207,7636 | 9,988633        | 0                 | 0                          | 0                       | 10,30442               |
| 0,64116       | 5,382117          | 226,3197 | 10,88075        | 0                 | 0                          | 0                       | 10,76423               |
| 0,66856       | 5,612025          | 243,7528 | 11,71888        | 0                 | 0                          | 0                       | 11,22405               |
| 0,6987        | 5,864221          | 262,0419 | 12,59817        | 0                 | 0                          | 0                       | 11,72844               |
| 0,72884       | 6,118371          | 279,5216 | 13,43854        | 0                 | 0                          | 0                       | 12,23674               |
| 0,76172       | 6,394026          | 297,7381 | 14,31433        | 0                 | 0                          | 0                       | 12,78805               |
| 0,7946        | 6,669681          | 315,1103 | 15,14954        | 0                 | 0                          | 0                       | 13,33936               |
| 0,83022       | 6,969186          | 333,0099 | 16,01009        | 0                 | 0                          | 0                       | 13,93837               |
| 0,86858       | 7,291368          | 351,4336 | 16,89584        | 0                 | 0                          | 0                       | 14,58274               |
| 0,90694       | 7,613163          | 368,7768 | 17,72965        | 0                 | 0                          | 0                       | 15,22633               |
| 0,94804       | 7,958419          | 386,4338 | 18,57855        | 0                 | 0                          | 0                       | 15,91684               |
| 0,99188       | 8,325961          | 404,3907 | 19,44186        | 0                 | 0                          | 0                       | 16,65191               |
| 1,03846       | 8,71735           | 422,4326 | 20,30926        | 0                 | 0                          | 0                       | 17,4347                |
| 1,08778       | 9,131025          | 440,5    | 21,17788        | 0                 | 0                          | 0                       | 18,26206               |
| 1,13984       | 9,568168          | 458,5058 | 22,04355        | 0                 | 0                          | 0                       | 19,13633               |
| 1,3952        | 10,02837          | 476,3483 | 22,90136        | 0                 | 0                          | 0                       | 20,05675               |
| 1,4624        | 10,51087          | 494,1429 | 23,75687        | 0                 | 0                          | 0                       | 21,02173               |
| 1,5328        | 11,01643          | 511,815  | 24,60649        | 0                 | 0                          | 0                       | 22,03286               |
| 1,6064        | 11,54585          | 529,4143 | 25,45261        | 0                 | 0                          | 0                       | 23,09169               |
| 1,6864        | 12,12062          | 547,3442 | 26,31462        | 0                 | 0                          | 0                       | 24,24123               |
| 1,7696        | 12,71923          | 565,0925 | 27,16791        | 0                 | 0                          | 0                       | 25,43847               |
| 1,856         | 13,34014          | 582,5223 | 28,00588        | 0                 | 0                          | 0                       | 26,68029               |
| 1,9488        | 14,0068           | 600,152  | 28,85346        | 0                 | 0                          | 0                       | 28,0136                |
| 2,0448        | 14,69692          | 617,7201 | 29,69808        | 0                 | 0                          | 0                       | 29,39383               |
| 2,1472        | 15,43277          | 635,4414 | 30,55007        | 0                 | 0                          | 0                       | 30,86556               |
| 2,2528        | 16,19171          | 652,7528 | 31,38235        | 0                 | 0                          | 0                       | 32,38342               |
| 2,3648        | 16,99756          | 670,2498 | 32,22355        | 0                 | 0                          | 0                       | 33,99511               |
| 2,4832        | 17,84837          | 687,9337 | 33,07374        | 0                 | 0                          | 0                       | 35,69675               |
| 2,608         | 18,74494          | 705,5947 | 33,92283        | 0                 | 0                          | 0                       | 37,48988               |
| 2,736         | 19,66497          | 723,0144 | 34,76032        | 0                 | 0                          | 0                       | 39,32992               |
| 2,8704        | 20,63112          | 740,4293 | 35,59757        | 0                 | 0                          | 0                       | 41,26225               |
| 3,0112        | 21,64303          | 758,014  | 36,443          | 0                 | 0                          | 0                       | 43,28606               |
| 3,1584        | 22,70069          | 775,6331 | 37,29006        | 0                 | 0                          | 0                       | 45,40138               |
| 3,3088        | 23,7818           | 793,0246 | 38,12619        | 0                 | 0                          | 0                       | 47,56361               |
| 3,4688        | 24,93134          | 810,512  | 38,9669         | 0                 | 0                          | 0                       | 49,86269               |
| 3,632         | 26,10513          | 828,0945 | 39,81223        | 0                 | 0                          | 0                       | 52,21026               |
| 3,8016        | 27,32466          | 845,5971 | 40,6537         | 0                 | 0                          | 0                       | 54,64931               |
| 3,9776        | 28,58915          | 863,0913 | 41,49476        | 0                 | 0                          | 0                       | 57,1783                |
| 4,16          | 29,89939          | 880,6408 | 42,33852        | 0                 | 0                          | 0                       | 59,79879               |

## Продовження табл. Т.4

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 4,3424  | 31,2112  | 897,8963 | 43,16808 | 0 | 0 | 0 | 62,4224  |
| 4,5312  | 32,56719 | 915,1815 | 43,99913 | 0 | 0 | 0 | 65,13438 |
| 4,7264  | 33,97049 | 932,6654 | 44,83968 | 0 | 0 | 0 | 67,94097 |
| 4,9248  | 35,39725 | 949,9182 | 45,66913 | 0 | 0 | 0 | 70,79448 |
| 5,1296  | 36,86936 | 967,2869 | 46,50418 | 0 | 0 | 0 | 73,73871 |
| 5,3408  | 38,38684 | 984,7583 | 47,34414 | 0 | 0 | 0 | 76,77368 |
| 5,5552  | 39,92777 | 1002,108 | 48,17826 | 0 | 0 | 0 | 79,85556 |
| 5,776   | 41,51522 | 1019,476 | 49,01329 | 0 | 0 | 0 | 83,03046 |
| 6       | 43,12537 | 1036,733 | 49,84294 | 0 | 0 | 0 | 86,25076 |
| 6,2304  | 44,78125 | 1054,142 | 50,67991 | 0 | 0 | 0 | 89,56248 |
| 6,464   | 46,45981 | 1071,446 | 51,51183 | 0 | 0 | 0 | 92,91961 |
| 6,704   | 48,18491 | 1088,866 | 52,34932 | 0 | 0 | 0 | 96,36982 |
| 6,9504  | 49,95653 | 1106,22  | 53,18368 | 0 | 0 | 0 | 99,91304 |
| 7,2     | 51,75004 | 1123,601 | 54,01928 | 0 | 0 | 0 | 103,5001 |
| 7,456   | 53,58971 | 1140,871 | 54,84956 | 0 | 0 | 0 | 107,1794 |
| 7,7184  | 55,4751  | 1158,162 | 55,68086 | 0 | 0 | 0 | 110,9502 |
| 7,9872  | 57,40781 | 1175,424 | 56,51077 | 0 | 0 | 0 | 114,8157 |
| 8,2688  | 59,43163 | 1192,837 | 57,34791 | 0 | 0 | 0 | 118,8633 |
| 8,5568  | 61,50159 | 1210,12  | 58,17885 | 0 | 0 | 0 | 123,0032 |
| 8,8544  | 63,64154 | 1227,461 | 59,01257 | 0 | 0 | 0 | 127,2831 |
| 9,1648  | 65,8718  | 1244,747 | 59,8436  | 0 | 0 | 0 | 131,7436 |
| 9,488   | 68,19551 | 1262,093 | 60,67752 | 0 | 0 | 0 | 136,391  |
| 9,8336  | 70,67953 | 1279,504 | 61,51461 | 0 | 0 | 0 | 141,3591 |
| 10,2016 | 73,32306 | 1296,759 | 62,3442  | 0 | 0 | 0 | 146,6462 |
| 10,6048 | 76,2212  | 1314,021 | 63,17407 | 0 | 0 | 0 | 152,4424 |
| 11,0848 | 79,67216 | 1331,323 | 64,00594 | 0 | 0 | 0 | 159,3443 |
| 12,2048 | 87,72205 | 1313,864 | 63,16656 | 0 | 0 | 0 | 175,4442 |
| 12,2432 | 87,99812 | 1295,625 | 62,28969 | 0 | 0 | 0 | 175,9962 |
| 12,2688 | 88,18228 | 1276,474 | 61,36893 | 0 | 0 | 0 | 176,3646 |
| 12,2816 | 88,27412 | 1247,022 | 59,95297 | 0 | 0 | 0 | 176,5483 |
| 12,2848 | 88,29723 | 1216,644 | 58,49248 | 0 | 0 | 0 | 176,5945 |
| 12,288  | 88,32028 | 1170,173 | 56,25833 | 0 | 0 | 0 | 176,6406 |

## Зразок №5

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,0832     | 0,439093       | 0,224752 | 0,010805     | 0              | 0                    | 0                    | 0,878186            |
| 0,1056     | 0,639285       | 20,19346 | 0,97084      | 0              | 0                    | 0                    | 1,278571            |
| 0,1248     | 0,805852       | 38,2949  | 1,841101     | 0              | 0                    | 0                    | 1,611703            |
| 0,1408     | 0,940746       | 55,95158 | 2,68998      | 0              | 0                    | 0                    | 1,881493            |
| 0,1568     | 1,07095        | 74,59597 | 3,586346     | 0              | 0                    | 0                    | 2,141899            |
| 0,176      | 1,223048       | 92,7527  | 4,459265     | 0              | 0                    | 0                    | 2,446097            |
| 0,2048     | 1,445137       | 110,8606 | 5,32984      | 0              | 0                    | 0                    | 2,890273            |
| 0,4352     | 3,126828       | 128,3195 | 6,169208     | 0              | 0                    | 0                    | 6,253657            |
| 0,5728     | 4,117231       | 147,0616 | 7,070271     | 0              | 0                    | 0                    | 8,234467            |
| 0,6112     | 4,392887       | 164,5556 | 7,911326     | 0              | 0                    | 0                    | 8,785777            |
| 0,64       | 4,600117       | 181,9117 | 8,745757     | 0              | 0                    | 0                    | 9,200232            |
| 0,6752     | 4,853876       | 199,6907 | 9,600515     | 0              | 0                    | 0                    | 9,707755            |
| 0,7072     | 5,083002       | 218,8249 | 10,52042     | 0              | 0                    | 0                    | 10,166              |
| 0,7392     | 5,313692       | 236,6102 | 11,37549     | 0              | 0                    | 0                    | 10,62739            |
| 0,7712     | 5,542818       | 253,9773 | 12,21045     | 0              | 0                    | 0                    | 11,08564            |
| 0,8032     | 5,773118       | 271,3203 | 13,04424     | 0              | 0                    | 0                    | 11,54623            |

## Продовження табл. Т.4

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 0,8416 | 6,049164 | 289,4485 | 13,9158  | 0 | 0 | 0 | 12,09833 |
| 0,88   | 6,324428 | 307,0183 | 14,76049 | 0 | 0 | 0 | 12,64885 |
| 0,9184 | 6,600865 | 324,8494 | 15,61776 | 0 | 0 | 0 | 13,20173 |
| 0,9664 | 6,94612  | 342,7717 | 16,47941 | 0 | 0 | 0 | 13,89224 |
| 1,008  | 7,245235 | 360,6943 | 17,34107 | 0 | 0 | 0 | 14,49047 |
| 1,056  | 7,590097 | 378,0415 | 18,17507 | 0 | 0 | 0 | 15,18019 |
| 1,1136 | 8,004559 | 396,4583 | 19,0605  | 0 | 0 | 0 | 16,00911 |
| 1,1712 | 8,418628 | 414,3166 | 19,91906 | 0 | 0 | 0 | 16,83725 |
| 1,2288 | 8,832304 | 432,0651 | 20,77236 | 0 | 0 | 0 | 17,66461 |
| 1,2864 | 9,245979 | 449,514  | 21,61125 | 0 | 0 | 0 | 18,49197 |
| 1,3504 | 9,705795 | 466,9097 | 22,44758 | 0 | 0 | 0 | 19,4116  |
| 1,4208 | 10,21175 | 484,3641 | 23,28673 | 0 | 0 | 0 | 20,4235  |
| 1,4976 | 10,76384 | 501,6326 | 24,11696 | 0 | 0 | 0 | 21,52769 |
| 1,584  | 11,38475 | 519,0297 | 24,95335 | 0 | 0 | 0 | 22,7695  |
| 1,6672 | 11,98337 | 536,5655 | 25,79642 | 0 | 0 | 0 | 23,96674 |
| 1,7504 | 12,58083 | 554,2562 | 26,64694 | 0 | 0 | 0 | 25,16164 |
| 1,8528 | 13,31708 | 571,553  | 27,47851 | 0 | 0 | 0 | 26,63415 |
| 1,952  | 14,02947 | 589,4323 | 28,33809 | 0 | 0 | 0 | 28,05895 |
| 2,0672 | 14,85762 | 606,9327 | 29,17946 | 0 | 0 | 0 | 29,71523 |
| 2,1664 | 15,57041 | 624,2137 | 30,01028 | 0 | 0 | 0 | 31,14082 |
| 2,2944 | 16,49043 | 641,8553 | 30,85843 | 0 | 0 | 0 | 32,98086 |
| 2,4256 | 17,43391 | 659,4847 | 31,70599 | 0 | 0 | 0 | 34,86783 |
| 2,56   | 18,39968 | 676,8897 | 32,54277 | 0 | 0 | 0 | 36,79937 |
| 2,6976 | 19,38931 | 694,2925 | 33,37946 | 0 | 0 | 0 | 38,77862 |
| 2,8416 | 20,4239  | 711,9468 | 34,2282  | 0 | 0 | 0 | 40,84779 |
| 2,9888 | 21,48194 | 729,755  | 35,08437 | 0 | 0 | 0 | 42,96388 |
| 3,136  | 22,54077 | 747,1865 | 35,92242 | 0 | 0 | 0 | 45,08154 |
| 3,3184 | 23,85023 | 764,5724 | 36,75829 | 0 | 0 | 0 | 47,70046 |
| 3,4752 | 24,97709 | 781,9301 | 37,59281 | 0 | 0 | 0 | 49,95419 |
| 3,664  | 26,33504 | 799,365  | 38,43101 | 0 | 0 | 0 | 52,67007 |
| 3,8272 | 27,50882 | 816,9062 | 39,27434 | 0 | 0 | 0 | 55,01764 |
| 4,0288 | 28,95708 | 834,7793 | 40,13362 | 0 | 0 | 0 | 57,91416 |
| 4,2304 | 30,40613 | 852,3425 | 40,97801 | 0 | 0 | 0 | 60,81226 |
| 4,4352 | 31,87863 | 869,8078 | 41,81768 | 0 | 0 | 0 | 63,75727 |
| 4,64   | 33,34997 | 887,162  | 42,65202 | 0 | 0 | 0 | 66,69994 |
| 4,848  | 34,84477 | 904,521  | 43,48659 | 0 | 0 | 0 | 69,68952 |
| 5,0592 | 36,36262 | 921,8048 | 44,31753 | 0 | 0 | 0 | 72,72524 |
| 5,2736 | 37,90356 | 939,3819 | 45,16258 | 0 | 0 | 0 | 75,80713 |
| 5,488  | 39,44448 | 956,7195 | 45,99615 | 0 | 0 | 0 | 78,88894 |
| 5,7056 | 41,00888 | 974,0254 | 46,82815 | 0 | 0 | 0 | 82,01775 |
| 5,9648 | 42,87239 | 991,3437 | 47,66076 | 0 | 0 | 0 | 85,74478 |
| 6,1856 | 44,45907 | 1008,827 | 48,50129 | 0 | 0 | 0 | 88,91816 |
| 6,4512 | 46,36792 | 1026,292 | 49,34093 | 0 | 0 | 0 | 92,73586 |
| 6,6784 | 48,00113 | 1043,719 | 50,1788  | 0 | 0 | 0 | 96,00225 |
| 6,9472 | 49,93385 | 1061,516 | 51,03444 | 0 | 0 | 0 | 99,8677  |
| 7,2192 | 51,88807 | 1079,061 | 51,87797 | 0 | 0 | 0 | 103,7761 |
| 7,4944 | 53,86614 | 1096,598 | 52,72105 | 0 | 0 | 0 | 107,7323 |
| 7,7728 | 55,86728 | 1114,304 | 53,57235 | 0 | 0 | 0 | 111,7345 |
| 8,0544 | 57,89109 | 1131,995 | 54,42287 | 0 | 0 | 0 | 115,7822 |
| 8,336  | 59,91491 | 1149,286 | 55,25414 | 0 | 0 | 0 | 119,8298 |
| 8,6688 | 62,30627 | 1166,964 | 56,10404 | 0 | 0 | 0 | 124,6126 |
| 8,96   | 64,40007 | 1184,543 | 56,94919 | 0 | 0 | 0 | 128,8002 |
| 9,2992 | 66,83757 | 1202,221 | 57,79906 | 0 | 0 | 0 | 133,6751 |
| 9,6448 | 69,32161 | 1219,955 | 58,6517  | 0 | 0 | 0 | 138,6431 |
| 9,9936 | 71,82907 | 1237,502 | 59,49528 | 0 | 0 | 0 | 143,6581 |

## Продовження табл. Т.4

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 10,3488 | 74,38193 | 1254,875 | 60,33052 | 0 | 0 | 0 | 148,7638 |
| 10,768  | 77,39495 | 1272,244 | 61,16556 | 0 | 0 | 0 | 154,7899 |
| 11,3152 | 81,32802 | 1289,548 | 61,99749 | 0 | 0 | 0 | 162,656  |
| 12,192  | 87,62979 | 1271,971 | 61,15245 | 0 | 0 | 0 | 175,2596 |
| 12,2368 | 87,95161 | 1252,651 | 60,22361 | 0 | 0 | 0 | 175,9031 |
| 12,2464 | 88,02082 | 1221,395 | 58,72088 | 0 | 0 | 0 | 176,0416 |
| 12,2496 | 88,04386 | 1185,375 | 56,9892  | 0 | 0 | 0 | 176,0877 |
| 12,2528 | 88,06732 | 1134,57  | 54,54663 | 0 | 0 | 0 | 176,1346 |

## Зразок №6.

| "Time<br>sec" | "Extension<br>mm" | "Load N" | "Stress<br>MPa" | "Cycle<br>Count " | "Total<br>Cycle<br>Count " | "Repetitions<br>Count " | "Strain<br>[Exten.] %" |
|---------------|-------------------|----------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|
| 0             | 0                 | 0        | 0               | 0                 | 0                          | 0                       | 0                      |
| 0,0832        | 0,432837          | -6,04442 | -0,2906         | 0                 | 0                          | 0                       | 0,865675               |
| 0,1056        | 0,634202          | 13,14426 | 0,631936        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,268404               |
| 0,1248        | 0,801941          | 32,90212 | 1,581833        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,603883               |
| 0,144         | 0,964597          | 53,45635 | 2,570017        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,929195               |
| 0,1632        | 1,119824          | 73,19161 | 3,518828        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,239649               |
| 0,1824        | 1,437385          | 102,9914 | 4,95151         | 0                 | 0                          | 0                       | 2,874769               |
| 0,2048        | 1,632307          | 123,0246 | 5,914645        | 0                 | 0                          | 0                       | 3,264614               |
| 0,4384        | 3,560312          | 142,6242 | 6,856936        | 0                 | 0                          | 0                       | 7,120623               |
| 0,5952        | 4,835482          | 163,453  | 7,858321        | 0                 | 0                          | 0                       | 9,670963               |
| 0,6304        | 5,12234           | 184,9291 | 8,890822        | 0                 | 0                          | 0                       | 10,24468               |
| 0,6592        | 5,356601          | 206,2712 | 9,916889        | 0                 | 0                          | 0                       | 10,7132                |
| 0,688         | 5,590861          | 227,2389 | 10,92495        | 0                 | 0                          | 0                       | 11,18172               |
| 0,72          | 5,850314          | 248,6765 | 11,9556         | 0                 | 0                          | 0                       | 11,70063               |
| 0,752         | 6,110211          | 268,7304 | 12,91973        | 0                 | 0                          | 0                       | 12,22042               |
| 0,7872        | 6,396185          | 289,5013 | 13,91834        | 0                 | 0                          | 0                       | 12,79237               |
| 0,8224        | 6,681276          | 309,2257 | 14,86662        | 0                 | 0                          | 0                       | 13,36255               |
| 0,8608        | 6,993769          | 329,5859 | 15,84547        | 0                 | 0                          | 0                       | 13,98754               |
| 0,9024        | 7,331899          | 350,5437 | 16,85306        | 0                 | 0                          | 0                       | 14,6638                |
| 0,944         | 7,670029          | 370,4932 | 17,81217        | 0                 | 0                          | 0                       | 15,34006               |
| 0,9888        | 8,034234          | 390,5731 | 18,77755        | 0                 | 0                          | 0                       | 16,06848               |
| 1,0368        | 8,423641          | 411,2029 | 19,76937        | 0                 | 0                          | 0                       | 16,84727               |
| 1,088         | 8,840005          | 431,6507 | 20,75244        | 0                 | 0                          | 0                       | 17,68001               |
| 1,1424        | 9,282008          | 452,2008 | 21,74043        | 0                 | 0                          | 0                       | 18,56401               |
| 1,1968        | 9,724003          | 471,8874 | 22,68689        | 0                 | 0                          | 0                       | 19,44801               |
| 1,2576        | 10,21727          | 492,1741 | 23,66221        | 0                 | 0                          | 0                       | 20,43455               |
| 1,3216        | 10,73839          | 512,5066 | 24,63975        | 0                 | 0                          | 0                       | 21,47679               |
| 1,3888        | 11,28427          | 532,6537 | 25,60835        | 0                 | 0                          | 0                       | 22,56853               |
| 1,4592        | 11,85577          | 552,301  | 26,55293        | 0                 | 0                          | 0                       | 23,71154               |
| 1,5328        | 12,45336          | 571,8662 | 27,49356        | 0                 | 0                          | 0                       | 24,90671               |
| 1,6128        | 13,10398          | 591,9464 | 28,45896        | 0                 | 0                          | 0                       | 26,20796               |
| 1,696         | 13,78024          | 611,5752 | 29,40265        | 0                 | 0                          | 0                       | 27,56048               |
| 1,7856        | 14,50822          | 631,6219 | 30,36644        | 0                 | 0                          | 0                       | 29,01643               |
| 1,8784        | 15,2627           | 651,2439 | 31,3098         | 0                 | 0                          | 0                       | 30,52542               |
| 1,9776        | 16,06759          | 670,9001 | 32,25481        | 0                 | 0                          | 0                       | 32,13518               |
| 2,1312        | 16,89988          | 690,5909 | 33,20148        | 0                 | 0                          | 0                       | 33,79976               |
| 2,1888        | 17,78388          | 710,199  | 34,14419        | 0                 | 0                          | 0                       | 35,56775               |
| 2,304         | 18,71959          | 730,0565 | 35,09888        | 0                 | 0                          | 0                       | 37,43918               |
| 2,4256        | 19,70835          | 749,8628 | 36,05109        | 0                 | 0                          | 0                       | 39,41669               |
| 2,5536        | 20,74749          | 769,6833 | 37,004          | 0                 | 0                          | 0                       | 41,49498               |
| 2,6848        | 21,81403          | 789,3179 | 37,948          | 0                 | 0                          | 0                       | 43,62807               |

## Продовження табл. Т.4

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 2,8256  | 22,95837 | 809,2126 | 38,90446 | 0 | 0 | 0 | 45,91675 |
| 2,9696  | 24,12702 | 828,7726 | 39,84485 | 0 | 0 | 0 | 48,25404 |
| 3,1168  | 25,3244  | 848,3857 | 40,78777 | 0 | 0 | 0 | 50,6488  |
| 3,2736  | 26,59781 | 867,9286 | 41,72735 | 0 | 0 | 0 | 53,19561 |
| 3,4368  | 27,92336 | 887,7344 | 42,67952 | 0 | 0 | 0 | 55,84672 |
| 3,6032  | 29,27633 | 907,2648 | 43,6185  | 0 | 0 | 0 | 58,55266 |
| 3,776   | 30,68056 | 926,8241 | 44,55883 | 0 | 0 | 0 | 61,36112 |
| 3,9552  | 32,13607 | 946,4208 | 45,501   | 0 | 0 | 0 | 64,27213 |
| 4,1408  | 33,64373 | 966,2312 | 46,45345 | 0 | 0 | 0 | 67,28746 |
| 4,3296  | 35,17791 | 985,9044 | 47,39925 | 0 | 0 | 0 | 70,35583 |
| 4,5248  | 36,76381 | 1005,564 | 48,34445 | 0 | 0 | 0 | 73,52762 |
| 4,7232  | 38,37534 | 1025,079 | 49,28265 | 0 | 0 | 0 | 76,75067 |
| 4,928   | 40,04035 | 1044,855 | 50,23342 | 0 | 0 | 0 | 80,08073 |
| 5,136   | 41,73012 | 1064,57  | 51,18123 | 0 | 0 | 0 | 83,46023 |
| 5,3504  | 43,47249 | 1084,163 | 52,12321 | 0 | 0 | 0 | 86,94496 |
| 5,5712  | 45,26569 | 1103,933 | 53,0737  | 0 | 0 | 0 | 90,5314  |
| 5,7952  | 47,08628 | 1123,626 | 54,02047 | 0 | 0 | 0 | 94,1726  |
| 6,0256  | 48,9586  | 1143,195 | 54,96129 | 0 | 0 | 0 | 97,91722 |
| 6,2592  | 50,8561  | 1162,91  | 55,90913 | 0 | 0 | 0 | 101,7122 |
| 6,496   | 52,77969 | 1182,495 | 56,85071 | 0 | 0 | 0 | 105,5594 |
| 6,7392  | 54,75543 | 1202,155 | 57,79589 | 0 | 0 | 0 | 109,5108 |
| 6,9856  | 56,75857 | 1221,684 | 58,73483 | 0 | 0 | 0 | 113,5171 |
| 7,2352  | 58,78603 | 1241,335 | 59,67958 | 0 | 0 | 0 | 117,5721 |
| 7,4912  | 60,86564 | 1260,886 | 60,61955 | 0 | 0 | 0 | 121,7312 |
| 7,7568  | 63,02392 | 1280,565 | 61,56562 | 0 | 0 | 0 | 126,0478 |
| 8,0256  | 65,20784 | 1300,164 | 62,50787 | 0 | 0 | 0 | 130,4157 |
| 8,3008  | 67,44437 | 1319,668 | 63,44558 | 0 | 0 | 0 | 134,8888 |
| 8,5824  | 69,73216 | 1339,264 | 64,3877  | 0 | 0 | 0 | 139,4643 |
| 8,8736  | 72,09818 | 1358,769 | 65,32541 | 0 | 0 | 0 | 144,1964 |
| 9,1744  | 74,54157 | 1378,308 | 66,26481 | 0 | 0 | 0 | 149,0831 |
| 9,4848  | 77,06405 | 1397,943 | 67,20877 | 0 | 0 | 0 | 154,1281 |
| 9,8144  | 79,74213 | 1417,549 | 68,15136 | 0 | 0 | 0 | 159,4843 |
| 10,1568 | 82,52322 | 1437,124 | 69,09252 | 0 | 0 | 0 | 165,0464 |
| 10,528  | 85,54073 | 1456,632 | 70,03038 | 0 | 0 | 0 | 171,0815 |
| 10,9472 | 88,9459  | 1476,212 | 70,97169 | 0 | 0 | 0 | 177,8918 |
| 11,9776 | 97,31826 | 1445,786 | 69,50895 | 0 | 0 | 0 | 194,6365 |
| 11,9808 | 97,34431 | 1409,003 | 67,74054 | 0 | 0 | 0 | 194,6887 |
| 11,984  | 97,37091 | 1353,624 | 65,07807 | 0 | 0 | 0 | 194,7417 |
| 11,9872 | 97,39696 | 1285,396 | 61,79789 | 0 | 0 | 0 | 194,7939 |

## Зразок №7.

| "Time<br>sec" | "Extension<br>mm" | "Load N" | "Stress<br>MPa" | "Cycle<br>Count " | "Total<br>Cycle<br>Count " | "Repetitions<br>Count " | "Strain<br>[Exten.] %" |
|---------------|-------------------|----------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|
| 0             | 0                 | 0        | 0               | 0                 | 0                          | 0                       | 0                      |
| 0,0864        | 0,529074          | -24,3619 | -1,17124        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,058149               |
| 0,1088        | 0,754936          | -4,73628 | -0,22771        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,509873               |
| 0,1312        | 0,9724            | 17,31347 | 0,832379        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,944801               |
| 0,1536        | 1,181908          | 39,14767 | 1,882099        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,363817               |
| 0,176         | 1,382134          | 59,76122 | 2,873135        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,764269               |
| 0,2016        | 1,605787          | 81,78534 | 3,931987        | 0                 | 0                          | 0                       | 3,211574               |
| 0,2272        | 1,823251          | 102,9811 | 4,951013        | 0                 | 0                          | 0                       | 3,646502               |
| 0,256         | 2,065467          | 124,4222 | 5,98184         | 0                 | 0                          | 0                       | 4,130934               |
| 0,528         | 4,290054          | 143,9806 | 6,922144        | 0                 | 0                          | 0                       | 8,580109               |

Продовження табл. Т.4

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 0,6592 | 5,355716 | 165,0616 | 7,935658 | 0 | 0 | 0 | 10,71144 |
| 0,6912 | 5,616497 | 185,1763 | 8,902709 | 0 | 0 | 0 | 11,23299 |
| 0,72   | 5,850314 | 205,4998 | 9,8798   | 0 | 0 | 0 | 11,70063 |
| 0,7488 | 6,084133 | 225,2039 | 10,82711 | 0 | 0 | 0 | 12,16827 |
| 0,7808 | 6,344029 | 245,2081 | 11,78885 | 0 | 0 | 0 | 12,68806 |
| 0,816  | 6,629561 | 265,7322 | 12,77559 | 0 | 0 | 0 | 13,25912 |
| 0,8544 | 6,942055 | 286,8212 | 13,78948 | 0 | 0 | 0 | 13,88411 |
| 0,8928 | 7,254108 | 306,9961 | 14,75943 | 0 | 0 | 0 | 14,50822 |
| 0,9344 | 7,591795 | 327,5471 | 15,74746 | 0 | 0 | 0 | 15,18359 |
| 0,976  | 7,929925 | 347,3263 | 16,69838 | 0 | 0 | 0 | 15,85985 |
| 1,0208 | 8,293693 | 367,5495 | 17,67065 | 0 | 0 | 0 | 16,58739 |
| 1,0688 | 8,684419 | 387,6373 | 18,63641 | 0 | 0 | 0 | 17,36884 |
| 1,12   | 9,100338 | 408,0376 | 19,6172  | 0 | 0 | 0 | 18,20068 |
| 1,1744 | 9,542341 | 428,4271 | 20,59745 | 0 | 0 | 0 | 19,08468 |
| 1,232  | 10,00998 | 448,9601 | 21,58462 | 0 | 0 | 0 | 20,01996 |
| 1,2928 | 10,50369 | 468,8172 | 22,53929 | 0 | 0 | 0 | 21,00738 |
| 1,3568 | 11,02348 | 488,8902 | 23,50433 | 0 | 0 | 0 | 22,04697 |
| 1,424  | 11,56979 | 508,6478 | 24,45422 | 0 | 0 | 0 | 23,13959 |
| 1,4976 | 12,16782 | 528,9483 | 25,43021 | 0 | 0 | 0 | 24,33565 |
| 1,5744 | 12,79149 | 548,9989 | 26,39417 | 0 | 0 | 0 | 25,58297 |
| 1,6544 | 13,44255 | 568,6184 | 27,33742 | 0 | 0 | 0 | 26,8851  |
| 1,7408 | 14,14401 | 588,5945 | 28,29781 | 0 | 0 | 0 | 28,28801 |
| 1,8336 | 14,8985  | 608,7729 | 29,26793 | 0 | 0 | 0 | 29,797   |
| 1,9296 | 15,67819 | 628,4648 | 30,21466 | 0 | 0 | 0 | 31,35637 |
| 2,032  | 16,51003 | 648,3668 | 31,17148 | 0 | 0 | 0 | 33,02007 |
| 2,1376 | 17,36751 | 667,895  | 32,11033 | 0 | 0 | 0 | 34,73503 |
| 2,2528 | 18,30367 | 687,8811 | 33,0712  | 0 | 0 | 0 | 36,60734 |
| 2,3712 | 19,26634 | 707,544  | 34,01653 | 0 | 0 | 0 | 38,53269 |
| 2,496  | 20,27985 | 727,3176 | 34,9672  | 0 | 0 | 0 | 40,5597  |
| 2,6272 | 21,34596 | 747,0409 | 35,91543 | 0 | 0 | 0 | 42,69192 |
| 2,7648 | 22,46466 | 766,6324 | 36,85732 | 0 | 0 | 0 | 44,92932 |
| 2,9088 | 23,63463 | 786,3476 | 37,80517 | 0 | 0 | 0 | 47,26927 |
| 3,0592 | 24,85588 | 805,9982 | 38,74992 | 0 | 0 | 0 | 49,71176 |
| 3,216  | 26,12973 | 825,8445 | 39,70405 | 0 | 0 | 0 | 52,25945 |
| 3,3792 | 27,45573 | 845,5465 | 40,65128 | 0 | 0 | 0 | 54,91145 |
| 3,5488 | 28,83344 | 865,1581 | 41,59413 | 0 | 0 | 0 | 57,66688 |
| 3,7248 | 30,26464 | 884,8913 | 42,54285 | 0 | 0 | 0 | 60,52928 |
| 3,9072 | 31,74622 | 904,5566 | 43,48831 | 0 | 0 | 0 | 63,49244 |
| 4,0928 | 33,25389 | 924,3031 | 44,43764 | 0 | 0 | 0 | 66,50777 |
| 4,288  | 34,83978 | 944,0738 | 45,38816 | 0 | 0 | 0 | 69,67956 |
| 4,4864 | 36,4522  | 963,7173 | 46,33255 | 0 | 0 | 0 | 72,90439 |
| 4,6912 | 38,11544 | 983,36   | 47,27691 | 0 | 0 | 0 | 76,23088 |
| 4,9024 | 39,83173 | 1003,142 | 48,22799 | 0 | 0 | 0 | 79,66343 |
| 5,1168 | 41,5741  | 1022,653 | 49,16598 | 0 | 0 | 0 | 83,14823 |
| 5,3376 | 43,36773 | 1042,27  | 50,1091  | 0 | 0 | 0 | 86,73545 |
| 5,5648 | 45,21353 | 1061,861 | 51,05099 | 0 | 0 | 0 | 90,42704 |
| 5,7984 | 47,11236 | 1081,549 | 51,99754 | 0 | 0 | 0 | 94,2247  |
| 6,0384 | 49,06158 | 1101,252 | 52,94481 | 0 | 0 | 0 | 98,12314 |
| 6,2816 | 51,0382  | 1120,773 | 53,88334 | 0 | 0 | 0 | 102,0764 |
| 6,5312 | 53,06566 | 1140,405 | 54,82718 | 0 | 0 | 0 | 106,1313 |
| 6,7904 | 55,17135 | 1160,133 | 55,77562 | 0 | 0 | 0 | 110,3427 |
| 7,0528 | 57,30488 | 1179,813 | 56,7218  | 0 | 0 | 0 | 114,6098 |
| 7,3184 | 59,46229 | 1199,337 | 57,66045 | 0 | 0 | 0 | 118,9246 |
| 7,5936 | 61,69792 | 1218,9   | 58,60096 | 0 | 0 | 0 | 123,3958 |
| 7,8784 | 64,01312 | 1238,539 | 59,54513 | 0 | 0 | 0 | 128,0262 |

## Продовження табл. Т.4

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 8,176   | 66,43042 | 1258,201 | 60,4904  | 0 | 0 | 0 | 132,8608 |
| 8,4832  | 68,92551 | 1277,853 | 61,43523 | 0 | 0 | 0 | 137,851  |
| 8,8     | 71,50017 | 1297,551 | 62,38227 | 0 | 0 | 0 | 143,0004 |
| 9,136   | 74,22951 | 1317,189 | 63,32641 | 0 | 0 | 0 | 148,459  |
| 9,4816  | 77,03842 | 1336,844 | 64,27135 | 0 | 0 | 0 | 154,0768 |
| 9,8592  | 80,10678 | 1356,445 | 65,21369 | 0 | 0 | 0 | 160,2136 |
| 10,272  | 83,46023 | 1375,954 | 66,15164 | 0 | 0 | 0 | 166,9205 |
| 10,7712 | 87,51647 | 1395,563 | 67,09436 | 0 | 0 | 0 | 175,0329 |
| 11,7376 | 95,36771 | 1375,411 | 66,1255  | 0 | 0 | 0 | 190,7354 |
| 11,7472 | 95,44556 | 1348,228 | 64,81869 | 0 | 0 | 0 | 190,891  |
| 11,7504 | 95,47161 | 1313,089 | 63,1293  | 0 | 0 | 0 | 190,9432 |
| 11,7536 | 95,49766 | 1260,683 | 60,60973 | 0 | 0 | 0 | 190,9953 |

## Зразок №8.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,0832     | 1,802919       | -25,6478 | -1,23307     | 0              | 0                    | 0                    | 3,605838            |
| 0,1056     | 2,031875       | -4,17221 | -0,20059     | 0              | 0                    | 0                    | 4,06375             |
| 0,128      | 2,254643       | 16,12328 | 0,775158     | 0              | 0                    | 0                    | 4,509286            |
| 0,1472     | 2,438957       | 36,16488 | 1,738696     | 0              | 0                    | 0                    | 4,877914            |
| 0,1664     | 2,6162         | 58,40788 | 2,808071     | 0              | 0                    | 0                    | 5,232398            |
| 0,1888     | 2,816426       | 78,45599 | 3,771922     | 0              | 0                    | 0                    | 5,63285             |
| 0,2144     | 3,038309       | 98,6831  | 4,744381     | 0              | 0                    | 0                    | 6,076619            |
| 0,2368     | 3,228369       | 119,6455 | 5,75219      | 0              | 0                    | 0                    | 6,456739            |
| 0,2976     | 3,735344       | 139,5174 | 6,707568     | 0              | 0                    | 0                    | 7,470687            |
| 0,6464     | 6,578289       | 159,8134 | 7,683339     | 0              | 0                    | 0                    | 13,15658            |
| 0,688      | 6,916419       | 180,6647 | 8,685799     | 0              | 0                    | 0                    | 13,83284            |
| 0,7136     | 7,123717       | 200,7416 | 9,651041     | 0              | 0                    | 0                    | 14,24743            |
| 0,7424     | 7,357978       | 220,7287 | 10,61195     | 0              | 0                    | 0                    | 14,71596            |
| 0,7776     | 7,643509       | 241,8178 | 11,62585     | 0              | 0                    | 0                    | 15,28702            |
| 0,8096     | 7,903849       | 261,4645 | 12,57041     | 0              | 0                    | 0                    | 15,8077             |
| 0,848      | 8,216341       | 281,4358 | 13,53057     | 0              | 0                    | 0                    | 16,43268            |
| 0,8864     | 8,527951       | 301,4621 | 14,49338     | 0              | 0                    | 0                    | 17,05591            |
| 0,9248     | 8,840005       | 321,4525 | 15,45445     | 0              | 0                    | 0                    | 17,68001            |
| 0,9728     | 9,230286       | 341,6508 | 16,42552     | 0              | 0                    | 0                    | 18,46058            |
| 1,0112     | 9,542785       | 362,0687 | 17,40714     | 0              | 0                    | 0                    | 19,08556            |
| 1,0624     | 9,95826        | 382,7497 | 18,40142     | 0              | 0                    | 0                    | 19,91653            |
| 1,12       | 10,4259        | 403,6484 | 19,40617     | 0              | 0                    | 0                    | 20,8518             |
| 1,1776     | 10,89442       | 424,056  | 20,3873      | 0              | 0                    | 0                    | 21,78884            |
| 1,2288     | 11,31034       | 444,04   | 21,34808     | 0              | 0                    | 0                    | 22,62069            |
| 1,2864     | 11,77842       | 464,0392 | 22,30958     | 0              | 0                    | 0                    | 23,55684            |
| 1,3536     | 12,32385       | 484,3723 | 23,28713     | 0              | 0                    | 0                    | 24,6477             |
| 1,424      | 12,89579       | 504,4673 | 24,25323     | 0              | 0                    | 0                    | 25,7916             |
| 1,5008     | 13,52034       | 524,3005 | 25,20675     | 0              | 0                    | 0                    | 27,04069            |
| 1,5936     | 14,27395       | 544,343  | 26,17033     | 0              | 0                    | 0                    | 28,54791            |
| 1,6768     | 14,95066       | 564,2009 | 27,12505     | 0              | 0                    | 0                    | 29,90132            |
| 1,76       | 15,62647       | 584,4617 | 28,09912     | 0              | 0                    | 0                    | 31,25295            |
| 1,872      | 16,53611       | 604,2699 | 29,05144     | 0              | 0                    | 0                    | 33,07222            |
| 1,9648     | 17,28928       | 624,7494 | 30,03603     | 0              | 0                    | 0                    | 34,57856            |
| 2,0896     | 18,30367       | 644,9031 | 31,00496     | 0              | 0                    | 0                    | 36,60734            |
| 2,1888     | 19,10988       | 664,8051 | 31,96178     | 0              | 0                    | 0                    | 38,21976            |
| 2,3136     | 20,12471       | 684,5091 | 32,90909     | 0              | 0                    | 0                    | 40,24942            |

## Продовження табл. Т.4

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 2,448   | 21,21601 | 704,395  | 33,86514 | 0 | 0 | 0 | 42,43202 |
| 2,5856  | 22,33472 | 724,0998 | 34,81249 | 0 | 0 | 0 | 44,66942 |
| 2,7264  | 23,47861 | 743,9619 | 35,7674  | 0 | 0 | 0 | 46,95722 |
| 2,8704  | 24,6477  | 763,4705 | 36,70531 | 0 | 0 | 0 | 49,29539 |
| 3,0208  | 25,87028 | 783,1847 | 37,65312 | 0 | 0 | 0 | 51,74054 |
| 3,2064  | 27,37794 | 803,2487 | 38,61772 | 0 | 0 | 0 | 54,75588 |
| 3,36    | 28,62481 | 823,2892 | 39,58119 | 0 | 0 | 0 | 57,24964 |
| 3,5552  | 30,21293 | 843,2151 | 40,53918 | 0 | 0 | 0 | 60,42584 |
| 3,7536  | 31,82402 | 862,9483 | 41,48792 | 0 | 0 | 0 | 63,64803 |
| 3,9136  | 33,12394 | 882,6394 | 42,43458 | 0 | 0 | 0 | 66,24788 |
| 4,1184  | 34,78806 | 902,8375 | 43,40566 | 0 | 0 | 0 | 69,57612 |
| 4,3232  | 36,4522  | 922,3508 | 44,3438  | 0 | 0 | 0 | 72,90439 |
| 4,5408  | 38,21976 | 941,9007 | 45,28368 | 0 | 0 | 0 | 76,43951 |
| 4,7648  | 40,04035 | 961,7213 | 46,23658 | 0 | 0 | 0 | 80,08073 |
| 4,96    | 41,62625 | 981,2821 | 47,17702 | 0 | 0 | 0 | 83,25252 |
| 5,1872  | 43,47204 | 1000,889 | 48,11967 | 0 | 0 | 0 | 86,9441  |
| 5,4208  | 45,36999 | 1020,49  | 49,06203 | 0 | 0 | 0 | 90,73997 |
| 5,6576  | 47,29358 | 1040,033 | 50,0016  | 0 | 0 | 0 | 94,58717 |
| 5,904   | 49,29584 | 1059,697 | 50,94698 | 0 | 0 | 0 | 98,59169 |
| 6,1472  | 51,27202 | 1079,303 | 51,88958 | 0 | 0 | 0 | 102,544  |
| 6,4     | 53,32644 | 1098,809 | 52,82738 | 0 | 0 | 0 | 106,6528 |
| 6,656   | 55,40605 | 1118,38  | 53,76829 | 0 | 0 | 0 | 110,8121 |
| 6,9216  | 57,56434 | 1138,075 | 54,71517 | 0 | 0 | 0 | 115,1287 |
| 7,1936  | 59,77301 | 1157,773 | 55,66215 | 0 | 0 | 0 | 119,546  |
| 7,4688  | 62,00998 | 1177,489 | 56,61004 | 0 | 0 | 0 | 124,0199 |
| 7,7504  | 64,29865 | 1197,101 | 57,55292 | 0 | 0 | 0 | 128,5973 |
| 8,0416  | 66,66424 | 1216,808 | 58,50039 | 0 | 0 | 0 | 133,3285 |
| 8,3424  | 69,10761 | 1236,318 | 59,43837 | 0 | 0 | 0 | 138,2152 |
| 8,6496  | 71,60359 | 1255,99  | 60,3841  | 0 | 0 | 0 | 143,2071 |
| 8,9664  | 74,17824 | 1275,582 | 61,32603 | 0 | 0 | 0 | 148,3565 |
| 9,296   | 76,85543 | 1295,082 | 62,26354 | 0 | 0 | 0 | 153,7109 |
| 9,6416  | 79,66343 | 1314,68  | 63,20577 | 0 | 0 | 0 | 159,3269 |
| 10,0032 | 82,60145 | 1334,242 | 64,14626 | 0 | 0 | 0 | 165,2029 |
| 10,3968 | 85,79977 | 1353,838 | 65,08839 | 0 | 0 | 0 | 171,5995 |
| 10,832  | 89,33574 | 1373,372 | 66,02749 | 0 | 0 | 0 | 178,6715 |
| 11,3248 | 93,3394  | 1392,912 | 66,96695 | 0 | 0 | 0 | 186,6788 |
| 12,1184 | 99,78774 | 1412,422 | 67,9049  | 0 | 0 | 0 | 199,5755 |
| 12,6208 | 103,8705 | 1392,628 | 66,9533  | 0 | 0 | 0 | 207,741  |
| 12,6464 | 104,0791 | 1357,452 | 65,26212 | 0 | 0 | 0 | 208,1582 |
| 12,6496 | 104,1047 | 1322,71  | 63,59184 | 0 | 0 | 0 | 208,2095 |
| 12,6528 | 104,1309 | 1270,359 | 61,07498 | 0 | 0 | 0 | 208,2616 |
| 12,656  | 104,1569 | 1205,849 | 57,97348 | 0 | 0 | 0 | 208,3138 |

## Зразок №9.

| "Time<br>sec" | "Extension<br>mm" | "Load N" | "Stress<br>MPa" | "Cycle<br>Count " | "Total<br>Cycle<br>Count " | "Repetitions<br>Count " | "Strain<br>[Exten.] %" |
|---------------|-------------------|----------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|
| 0             | 0                 | 0        | 0               | 0                 | 0                          | 0                       | 0                      |
| 0,0832        | 0,49725           | -14,9646 | -0,71945        | 0                 | 0                          | 0                       | 0,994501               |
| 0,1056        | 0,723112          | 6,115736 | 0,294026        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,446225               |
| 0,1248        | 0,911404          | 27,7321  | 1,333274        | 0                 | 0                          | 0                       | 1,822809               |
| 0,144         | 1,093509          | 50,2161  | 2,414236        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,187017               |
| 0,1632        | 1,268541          | 71,89463 | 3,456473        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,537081               |
| 0,1824        | 1,439152          | 91,8592  | 4,416309        | 0                 | 0                          | 0                       | 2,878305               |



Продовження табл. Т.4

|        |          |          |          |   |   |   |          |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 0,2048 | 1,633191 | 112,4566 | 5,406568 | 0 | 0 | 0 | 3,266382 |
| 0,2368 | 1,904579 | 133,0998 | 6,39903  | 0 | 0 | 0 | 3,809158 |
| 0,5824 | 4,731613 | 153,0939 | 7,360281 | 0 | 0 | 0 | 9,463225 |
| 0,6304 | 5,12234  | 173,1116 | 8,32267  | 0 | 0 | 0 | 10,24468 |
| 0,6624 | 5,382237 | 192,7173 | 9,265253 | 0 | 0 | 0 | 10,76448 |
| 0,6912 | 5,616497 | 212,3422 | 10,20876 | 0 | 0 | 0 | 11,23299 |
| 0,7232 | 5,876392 | 233,3538 | 11,21894 | 0 | 0 | 0 | 11,75278 |
| 0,7552 | 6,135405 | 252,9794 | 12,16247 | 0 | 0 | 0 | 12,27081 |
| 0,7904 | 6,422263 | 273,2834 | 13,13862 | 0 | 0 | 0 | 12,84453 |
| 0,8288 | 6,733431 | 294,1326 | 14,14099 | 0 | 0 | 0 | 13,46686 |
| 0,8672 | 7,045925 | 314,0946 | 15,1007  | 0 | 0 | 0 | 14,09185 |
| 0,9088 | 7,384497 | 334,7373 | 16,09314 | 0 | 0 | 0 | 14,769   |
| 0,9536 | 7,748263 | 355,6585 | 17,09897 | 0 | 0 | 0 | 15,49653 |
| 0,9984 | 8,112031 | 375,4852 | 18,05217 | 0 | 0 | 0 | 16,22406 |
| 1,0464 | 8,501875 | 395,5719 | 19,01788 | 0 | 0 | 0 | 17,00375 |
| 1,0976 | 8,918239 | 415,8213 | 19,99141 | 0 | 0 | 0 | 17,83647 |
| 1,152  | 9,360679 | 436,1005 | 20,96637 | 0 | 0 | 0 | 18,72136 |
| 1,2096 | 9,827875 | 456,3547 | 21,94013 | 0 | 0 | 0 | 19,65575 |
| 1,2704 | 10,32159 | 476,4242 | 22,90501 | 0 | 0 | 0 | 20,64318 |
| 1,3344 | 10,84271 | 496,4495 | 23,86777 | 0 | 0 | 0 | 21,68541 |
| 1,4016 | 11,38813 | 516,0346 | 24,80935 | 0 | 0 | 0 | 22,77627 |
| 1,472  | 11,9592  | 535,5409 | 25,74716 | 0 | 0 | 0 | 23,9184  |
| 1,5488 | 12,58375 | 555,469  | 26,70524 | 0 | 0 | 0 | 25,16749 |
| 1,6288 | 13,23392 | 575,0654 | 27,64737 | 0 | 0 | 0 | 26,46786 |
| 1,7152 | 13,9367  | 595,2288 | 28,61677 | 0 | 0 | 0 | 27,87342 |
| 1,808  | 14,69032 | 615,2617 | 29,57989 | 0 | 0 | 0 | 29,38063 |
| 1,904  | 15,47001 | 635,0196 | 30,52979 | 0 | 0 | 0 | 30,94001 |
| 2,0064 | 16,30185 | 654,8194 | 31,4817  | 0 | 0 | 0 | 32,6037  |
| 2,1152 | 17,18585 | 674,8253 | 32,44353 | 0 | 0 | 0 | 34,37171 |
| 2,2272 | 18,09549 | 694,5086 | 33,38984 | 0 | 0 | 0 | 36,19098 |
| 2,3456 | 19,05772 | 714,1481 | 34,33405 | 0 | 0 | 0 | 38,11544 |
| 2,4704 | 20,07211 | 733,6687 | 35,27254 | 0 | 0 | 0 | 40,14423 |
| 2,6016 | 21,13822 | 753,311  | 36,21687 | 0 | 0 | 0 | 42,27644 |
| 2,7392 | 22,25604 | 772,969  | 37,16198 | 0 | 0 | 0 | 44,51207 |
| 2,8832 | 23,42601 | 792,7195 | 38,11151 | 0 | 0 | 0 | 46,85202 |
| 3,0336 | 24,6477  | 812,2639 | 39,05114 | 0 | 0 | 0 | 49,29539 |
| 3,1904 | 25,92243 | 832,1258 | 40,00605 | 0 | 0 | 0 | 51,84486 |
| 3,3536 | 27,24755 | 851,8146 | 40,95262 | 0 | 0 | 0 | 54,49509 |
| 3,5232 | 28,62481 | 871,4839 | 41,89828 | 0 | 0 | 0 | 57,24964 |
| 3,6992 | 30,05601 | 891,3146 | 42,85165 | 0 | 0 | 0 | 60,11203 |
| 3,8816 | 31,53804 | 911,0634 | 43,80113 | 0 | 0 | 0 | 63,07608 |
| 4,0704 | 33,07223 | 930,8801 | 44,75384 | 0 | 0 | 0 | 66,14444 |
| 4,2624 | 34,63248 | 950,4737 | 45,69586 | 0 | 0 | 0 | 69,26496 |
| 4,4608 | 36,24446 | 970,0275 | 46,63593 | 0 | 0 | 0 | 72,48892 |
| 4,6624 | 37,88207 | 989,5595 | 47,57498 | 0 | 0 | 0 | 75,76414 |
| 4,8704 | 39,57272 | 1009,068 | 48,51288 | 0 | 0 | 0 | 79,14543 |
| 5,0848 | 41,31464 | 1028,66  | 49,45482 | 0 | 0 | 0 | 82,6293  |
| 5,3056 | 43,10784 | 1048,291 | 50,39862 | 0 | 0 | 0 | 86,21566 |
| 5,5296 | 44,92844 | 1067,811 | 51,3371  | 0 | 0 | 0 | 89,85686 |
| 5,7632 | 46,82594 | 1087,493 | 52,28333 | 0 | 0 | 0 | 93,65187 |
| 6,0032 | 48,77649 | 1107,19  | 53,23027 | 0 | 0 | 0 | 97,55296 |
| 6,2464 | 50,75223 | 1126,9   | 54,17791 | 0 | 0 | 0 | 101,5044 |
| 6,496  | 52,78013 | 1146,417 | 55,11623 | 0 | 0 | 0 | 105,5603 |
| 6,752  | 54,85974 | 1166,157 | 56,06524 | 0 | 0 | 0 | 109,7195 |
| 7,0144 | 56,99239 | 1185,829 | 57,01098 | 0 | 0 | 0 | 113,9848 |

## Продовження табл. Т.4

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 7,28    | 59,15024 | 1205,473 | 57,95544 | 0 | 0 | 0 | 118,3005 |
| 7,5552  | 61,38587 | 1224,991 | 58,89378 | 0 | 0 | 0 | 122,7718 |
| 7,84    | 63,70018 | 1244,609 | 59,83699 | 0 | 0 | 0 | 127,4004 |
| 8,1344  | 66,09229 | 1264,116 | 60,77482 | 0 | 0 | 0 | 132,1846 |
| 8,4416  | 68,58738 | 1283,811 | 61,72166 | 0 | 0 | 0 | 137,1748 |
| 8,7616  | 71,18767 | 1303,329 | 62,66008 | 0 | 0 | 0 | 142,3754 |
| 9,104   | 73,97006 | 1322,931 | 63,60246 | 0 | 0 | 0 | 147,9401 |
| 9,4656  | 76,90759 | 1342,534 | 64,54493 | 0 | 0 | 0 | 153,8151 |
| 9,8752  | 80,23673 | 1362,167 | 65,48879 | 0 | 0 | 0 | 160,4735 |
| 10,4544 | 84,94184 | 1381,696 | 66,42769 | 0 | 0 | 0 | 169,8837 |
| 10,9088 | 88,63475 | 1360,842 | 65,42508 | 0 | 0 | 0 | 177,2695 |
| 10,928  | 88,79036 | 1336,65  | 64,26204 | 0 | 0 | 0 | 177,5807 |
| 10,9408 | 88,89418 | 1312,013 | 63,07754 | 0 | 0 | 0 | 177,7884 |
| 10,9504 | 88,97203 | 1290,026 | 62,02046 | 0 | 0 | 0 | 177,944  |
| 10,96   | 89,05018 | 1258,851 | 60,52171 | 0 | 0 | 0 | 178,1004 |
| 10,9632 | 89,07678 | 1233,685 | 59,31176 | 0 | 0 | 0 | 178,1535 |

## Зразок №10.

| "Time sec" | "Extension mm" | "Load N" | "Stress MPa" | "Cycle Count " | "Total Cycle Count " | "Repetitions Count " | "Strain [Exten.] %" |
|------------|----------------|----------|--------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0          | 0              | 0        | 0            | 0              | 0                    | 0                    | 0                   |
| 0,0832     | 0,496808       | 40,31138 | 1,938047     | 0              | 0                    | 0                    | 0,993616            |
| 0,1056     | 0,723112       | 62,6376  | 3,011423     | 0              | 0                    | 0                    | 1,446225            |
| 0,1312     | 0,972843       | 84,8672  | 4,080156     | 0              | 0                    | 0                    | 1,945685            |
| 0,1536     | 1,181908       | 105,1032 | 5,05304      | 0              | 0                    | 0                    | 2,363817            |
| 0,2112     | 1,687999       | 124,7275 | 5,996512     | 0              | 0                    | 0                    | 3,375998            |
| 0,304      | 2,462825       | 144,4772 | 6,946021     | 0              | 0                    | 0                    | 4,92565             |
| 0,4928     | 4,003638       | 165,3269 | 7,948411     | 0              | 0                    | 0                    | 8,007277            |
| 0,5248     | 4,263976       | 185,0392 | 8,896111     | 0              | 0                    | 0                    | 8,527951            |
| 0,5632     | 4,576028       | 206,2058 | 9,913738     | 0              | 0                    | 0                    | 9,152052            |
| 0,6016     | 4,887638       | 226,3461 | 10,88202     | 0              | 0                    | 0                    | 9,775272            |
| 0,6464     | 5,251404       | 247,6076 | 11,90421     | 0              | 0                    | 0                    | 10,50281            |
| 0,6944     | 5,642132       | 267,5527 | 12,86311     | 0              | 0                    | 0                    | 11,28427            |
| 0,7232     | 5,876392       | 287,8982 | 13,84126     | 0              | 0                    | 0                    | 11,75278            |
| 0,7616     | 6,187561       | 307,4405 | 14,78079     | 0              | 0                    | 0                    | 12,37512            |
| 0,7904     | 6,422263       | 327,4124 | 15,74099     | 0              | 0                    | 0                    | 12,84453            |
| 0,8352     | 6,786029       | 348,5831 | 16,7588      | 0              | 0                    | 0                    | 13,57205            |
| 0,8704     | 7,071561       | 368,9841 | 17,73963     | 0              | 0                    | 0                    | 14,14312            |
| 0,9152     | 7,436211       | 389,6112 | 18,73131     | 0              | 0                    | 0                    | 14,87242            |
| 0,9632     | 7,82606        | 409,1364 | 19,67002     | 0              | 0                    | 0                    | 15,65211            |
| 1,0016     | 8,138107       | 429,1077 | 20,63018     | 0              | 0                    | 0                    | 16,27621            |
| 1,056      | 8,580546       | 449,86   | 21,62789     | 0              | 0                    | 0                    | 17,1611             |
| 1,1136     | 9,048187       | 469,6563 | 22,57963     | 0              | 0                    | 0                    | 18,09637            |
| 1,1712     | 9,51671        | 489,3237 | 23,52518     | 0              | 0                    | 0                    | 19,03341            |
| 1,2256     | 9,95826        | 509,0446 | 24,4733      | 0              | 0                    | 0                    | 19,91653            |
| 1,2832     | 10,4259        | 528,6923 | 25,4179      | 0              | 0                    | 0                    | 20,8518             |
| 1,3504     | 10,97177       | 548,8974 | 26,3893      | 0              | 0                    | 0                    | 21,94355            |
| 1,424      | 11,56936       | 568,8783 | 27,34992     | 0              | 0                    | 0                    | 23,13871            |
| 1,5072     | 12,24605       | 588,5388 | 28,29513     | 0              | 0                    | 0                    | 24,49212            |
| 1,5904     | 12,92143       | 608,0464 | 29,233       | 0              | 0                    | 0                    | 25,84287            |
| 1,6704     | 13,57205       | 627,929  | 30,18889     | 0              | 0                    | 0                    | 27,14412            |
| 1,7536     | 14,24788       | 648,1048 | 31,15889     | 0              | 0                    | 0                    | 28,49576            |
| 1,8624     | 15,13232       | 667,7199 | 32,10191     | 0              | 0                    | 0                    | 30,26464            |

## Продовження табл. Т.4

|         |          |          |          |   |   |   |          |
|---------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 1,9552  | 15,88504 | 688,1609 | 33,08466 | 0 | 0 | 0 | 31,77009 |
| 2,0736  | 16,84772 | 708,0009 | 34,03851 | 0 | 0 | 0 | 33,69545 |
| 2,1696  | 17,62785 | 728,2337 | 35,01124 | 0 | 0 | 0 | 35,2557  |
| 2,2976  | 18,66788 | 748,5387 | 35,98744 | 0 | 0 | 0 | 37,33575 |
| 2,4288  | 19,73398 | 768,4188 | 36,94322 | 0 | 0 | 0 | 39,46797 |
| 2,5632  | 20,82528 | 788,4716 | 37,90731 | 0 | 0 | 0 | 41,65056 |
| 2,7008  | 21,94443 | 808,587  | 38,87438 | 0 | 0 | 0 | 43,88885 |
| 2,8416  | 23,08832 | 828,2921 | 39,82172 | 0 | 0 | 0 | 46,17664 |
| 2,9856  | 24,25697 | 848,498  | 40,79317 | 0 | 0 | 0 | 48,51394 |
| 3,1296  | 25,42915 | 868,2274 | 41,74169 | 0 | 0 | 0 | 50,85832 |
| 3,2768  | 26,62344 | 887,7656 | 42,68102 | 0 | 0 | 0 | 53,24688 |
| 3,4656  | 28,15806 | 907,7531 | 43,64198 | 0 | 0 | 0 | 56,31612 |
| 3,6192  | 29,40627 | 927,8568 | 44,6085  | 0 | 0 | 0 | 58,81255 |
| 3,8144  | 30,99261 | 947,8763 | 45,57099 | 0 | 0 | 0 | 61,98522 |
| 3,9712  | 32,26557 | 967,4629 | 46,51265 | 0 | 0 | 0 | 64,53115 |
| 4,1696  | 33,87799 | 987,2569 | 47,46429 | 0 | 0 | 0 | 67,75598 |
| 4,3712  | 35,5156  | 1007,044 | 48,41556 | 0 | 0 | 0 | 71,03121 |
| 4,576   | 37,17929 | 1027     | 49,37501 | 0 | 0 | 0 | 74,35859 |
| 4,7808  | 38,84386 | 1046,635 | 50,31901 | 0 | 0 | 0 | 77,68772 |
| 4,9888  | 40,53363 | 1066,409 | 51,26965 | 0 | 0 | 0 | 81,06727 |
| 5,2     | 42,25035 | 1086,505 | 52,23583 | 0 | 0 | 0 | 84,50068 |
| 5,4112  | 43,96621 | 1106,089 | 53,17737 | 0 | 0 | 0 | 87,93244 |
| 5,6256  | 45,70724 | 1125,925 | 54,13103 | 0 | 0 | 0 | 91,41444 |
| 5,8432  | 47,47657 | 1145,673 | 55,08043 | 0 | 0 | 0 | 94,95314 |
| 6,1056  | 49,60701 | 1165,787 | 56,04745 | 0 | 0 | 0 | 99,21405 |
| 6,3264  | 51,40198 | 1185,743 | 57,00687 | 0 | 0 | 0 | 102,8039 |
| 6,592   | 53,55938 | 1205,554 | 57,95934 | 0 | 0 | 0 | 107,1187 |
| 6,8608  | 55,74463 | 1225,254 | 58,90644 | 0 | 0 | 0 | 111,4892 |
| 7,088   | 57,58953 | 1245,274 | 59,86893 | 0 | 0 | 0 | 115,1791 |
| 7,36    | 59,79909 | 1265,056 | 60,82002 | 0 | 0 | 0 | 119,5982 |
| 7,6352  | 62,0365  | 1284,563 | 61,75785 | 0 | 0 | 0 | 124,073  |
| 7,9136  | 64,29865 | 1304,235 | 62,70358 | 0 | 0 | 0 | 128,5973 |
| 8,1984  | 66,61252 | 1323,96  | 63,65195 | 0 | 0 | 0 | 133,225  |
| 8,5312  | 69,31536 | 1343,69  | 64,6005  | 0 | 0 | 0 | 138,6307 |
| 8,8256  | 71,70835 | 1363,36  | 65,54617 | 0 | 0 | 0 | 143,4167 |
| 9,168   | 74,48985 | 1382,946 | 66,48779 | 0 | 0 | 0 | 148,9797 |
| 9,5712  | 77,76551 | 1403,074 | 67,45548 | 0 | 0 | 0 | 155,531  |
| 9,9872  | 81,14683 | 1422,702 | 68,39914 | 0 | 0 | 0 | 162,2937 |
| 10,7424 | 87,28262 | 1399,321 | 67,27504 | 0 | 0 | 0 | 174,5653 |
| 10,7456 | 87,30875 | 1359,559 | 65,36339 | 0 | 0 | 0 | 174,6174 |
| 10,7488 | 87,33527 | 1302,535 | 62,62186 | 0 | 0 | 0 | 174,6705 |
| 10,752  | 87,36133 | 1234,621 | 59,3568  | 0 | 0 | 0 | 174,7227 |

## ДОДАТОК У

### АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА РОЗРАХУНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ

#### ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор виконавчої дирекції  
ТОВ "ВЗУТЕКС"



В.М. Манзело

\_\_\_\_\_ 2017 р.

#### АКТ

про впровадження у виробництво результатів  
дисертаційної роботи к.т.н., доцента Синюка О.М. на  
тему: **“Наукові основи проектування обладнання для  
переробки полімерних відходів у виробі легкої  
промисловості”**

Ми, ті, хто нижче підписалися, представник ТОВ “ВЗУТЕКС” технічний директор Міщук А.С. і представник Хмельницького національного університету к.т.н., доцент Синюк О.М. склали цей акт про те, що впроваджено у виробництво партія модернізованих прес-форм (у кількості 14 штук) для виготовлення полімерного низу чоловічих та жіночих напівчеревиків, армованого частинками перероблених полімерних відходів.

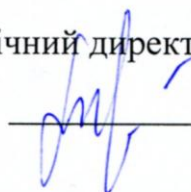
Вдосконалена за допомогою розробленого в дисертаційній роботі методу проектування конструкція прес-форм для лиття підошов чоловічих та жіночих напівчеревиків дозволяє заповнювати їх через три впускних отвори, що розташовані на бічній поверхні каблучної частини формувальної порожнини. При цьому рух розплаву відбувається переважно в напрямку, паралельному осі сліду взуття, що орієнтує частинки перероблених полімерних відходів в поверхневій області підошви вздовж напрямку навантажень, які діють на неї в процесі експлуатації взуття, що підвищує довговічність підошви. Впровадження модернізованих прес-форм дає можливість зменшити тривалість процесу їх заповнення на 6 % та витрати полімерного матеріалу на 12 %.

Очікуваний економічний ефект від використання модернізованих прес-форм для лиття підошов чоловічих та жіночих напівчеревиків на одному ливарному агрегаті моделі Б2С/14Е становить 128887 грн на рік за цінами 2016-2017 рр.

Успішне випробування модернізованих прес-форм дозволяють рекомендувати до широкого використання у взуттєвій промисловості та на підприємствах інших галузей виробництва, де отримують армовані вироби з полімерного матеріалу литтям під тиском, методу проектування прес-форм, розробленого Синюком О.М. в його дисертаційній роботі.

Представник ТОВ “ВЗУТЕКС”:

Технічний директор



Міщук А.С.

Представник Хмельницького  
національного університету:



к.т.н. Синюк О.М.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор виконавчої дирекції

ТОВ "ВЗУТЕКС"

В.М. Манзело

25 \_\_\_\_\_ 2017 р.



## РОЗРАХУНОК

річного економічного ефекту, очікуваного від впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи к.т.н., доцента Синюка О.М. на тему: **“Наукові основи проектування обладнання для переробки полімерних відходів у вироби легкої промисловості”**

1. Назва підприємства: ТОВ “ВЗУТЕКС” (м. Хмельницький).
2. Коротка характеристика технологічного процесу:

**До впровадження** – заповнення прес-форм при литті низу на заготовку верху чоловічих та жіночих напівчеревиків здійснювалося через шість впускних отворів, розташованих рівномірно на боковій поверхні формувальної порожнини. При цьому течія розплаву відбувалася переважно в напрямку, перпендикулярному осі сліду взуття.

**Після впровадження** – заповнення модернізованих прес-форм здійснюється через три впускних отвори, розташовані на боковій поверхні каблучної частини формувальної порожнини. При цьому течія розплаву відбувається переважно в напрямку, паралельному осі сліду взуття.

**В результаті модернізації** прес-форм, проведеної у відповідності до рекомендацій, розроблених к.т.н., доц. Синюком О.М. в його дисертаційній роботі, зменшилися витрати пластикату на 12 %, зменшилася довжина розвідних та кількість впускних ливникових каналів, а відповідно, й кількість

відходів на 7%, підвищилися експлуатаційні властивості взуття.

3. Сумарна економія розраховується за формулою:

$$E_{\text{сум}} = E_{\text{м}} + E_{\text{відх}},$$

де  $E_{\text{м}}$  – економія полімерного матеріалу за рахунок зменшення матеріалоємності взуття;  $E_{\text{відх}}$  – економія за рахунок зменшення відходів, що перероблюються.

Вихідні дані для розрахунку зазначених складових економії наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Дані для розрахунку очікуваного економічного ефекту

| Показники                                               | Позначення показників | Значення показників |                    |
|---------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
|                                                         |                       | До впровадження     | Після впровадження |
| 1. Річний випуск чоловічих і жіночих напівчеревику, пар | $n$                   | 54512               | 55080              |
| 2. Ціна за 1 кг пластикату, грн                         | $c$                   | 43                  | 43                 |
| 3. Норма витрат пластикату на одну пару взуття, кг      | $s$                   | 0,48                | 0,43               |
| 4. Норма відходів з однієї пари взуття, кг              | $v$                   | 0,05                | –                  |
| 5. Ціна 1 кг утилю, грн                                 | $c_v$                 | 3,8                 | –                  |

Економія за рахунок зменшення матеріалоємності взуття становить:

$$E_{\text{м}} = (s_1 - s_2) \cdot c \cdot n_2,$$

де позначення з індексом 1 відповідають даним до модернізації прес-форм; позначення з індексом 2 відповідають даним після модернізації прес-форм.

$$E_{\text{м}} = (0,48 - 0,43) \cdot 43 \cdot 55080 = 118422 \text{ грн.}$$

Економія на відходах досягається за рахунок зменшення витрат на їх

утилізацію, що пов'язана з переробкою цих відходів на сировину для подальшого лиття низу взуття:

$$E_{відх} = v \cdot c_v \cdot n_2 = 0,05 \cdot 3,8 \cdot 55080 = 10465 \text{ грн ,}$$

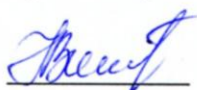
**Річний економічний ефект дорівнює:**

$$E_{\text{сум}} = 118422 + 10465 = 128887 \text{ грн.}$$

Представники  
ТОВ "ВЗУТЕКС":

Представник  
Хмельницького національного  
університету:

Головний бухгалтер



Цибулько Н.М.

Технічний директор



Міщук А.С.



к.т.н. Синюк О.М.



Затверджую

Головний технолог

ТОВ "Таланлепром"

Буринда К.С.



"12" грудня 2017 р.

## АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО

результатів дисертаційної роботи к.т.н., доцента  
Синюка О.М. на тему: **"Наукові основи проектування  
обладнання для переробки полімерних відходів у  
вироби легкої промисловості"**

Ми, ті, хто нижче підписалися, представник ТОВ "Таланлепром":  
головний технолог Буринда Костянтин Станіславович і представник  
Хмельницького національного університету к.т.н., доцент Синюк Олег  
Миколайович склали цей акт про те, що передано для впровадження у  
виробництво результати дисертаційної роботи, а саме метод проектування  
обладнання для переробки полімерних відходів.

В наш час в легкій промисловості майже відсутнє обладнання для  
механічної переробки відходів полімерних матеріалів, а те обладнання, що  
використовується, запозичено з інших галузей виробництва. Крім того,  
існуюче перероблювальне обладнання виготовлено без урахування змін у  
структурі полімеру, що виникають у процесі його переробки, в результаті  
чого основними недоліками процесу подрібнення полімерних відходів  
сучасним обладнанням є: значні витрати енергії та зниження  
експлуатаційних властивостей переробленого полімеру. Розроблений к.т.н.,  
доцентом Синюком О.М. метод проектування дозволяє проектувати  
енергозберігаюче обладнання для руйнування полімерних відходів на  
частинки з вираженою анізотропією механічних властивостей, які можна  
використовувати для армування нових полімерних виробів легкої  
промисловості.

Очікуваний економічний ефект при виготовленні підошов для чоловічих черевиків з додаванням частинок відходів з полівінілхлориду, отриманих на вдосконаленому обладнанні для переробки полімерних відходів, становить 203840 грн.

Випробування перероблювального обладнання, вдосконаленого згідно до результатів дисертаційної роботи, дозволяють рекомендувати підприємствам легкої промисловості розроблений Синюком О.М. метод проектування обладнання для переробки полімерних відходів з метою модернізації існуючих та створення нових перероблювальних пристроїв.

**Представник  
ТОВ "Таланлегпром"**

**Заступник головного  
технолога**



---

**Представник Хмельницького  
національного університету:**



---

**Синюк О.М.**



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ПП "Кредо"

Комарницький А.

"23" листопада 2017 р.



## АКТ

**впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи к.т.н.,  
доцента Синюка О.М. на тему: "НАУКОВІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ  
ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ У ВИРОБИ  
ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ"**

Ми, ті, хто нижче підписалися, представник ПП "Кредо": головний технолог Сіуліцька А.Л. і представник Хмельницького національного університету к.т.н., доцент Синюк О.М. склали цей акт про те, що впроваджено у виробництво обладнання для переробки полімерних відходів, яке розраховано і виготовлено у відповідності до методу проектування перероблювальних пристроїв, розробленого к.т.н., доцентом Синюком О.М. в його дисертаційній роботі. Це обладнання забезпечує руйнування полімерних відходів на частинки з вираженою анізотропією механічних властивостей при мінімальних енергетичних витратах.

Застосування впровадженого обладнання для переробки полімерних відходів дозволило отримати витягнуті частинки полівінілхлориду довжиною 4 мм, використання яких в процесі виготовлення полімерного низу чоловічих та жіночих чобіт зменшує витрати полівінілхлориду на 9% та підвищує стійкість підошви до розтріскування на 12 %.

Економічний ефект, що очікується при виготовленні підошов чоловічих та жіночих чобіт з додаванням частинок відходів з полівінілхлориду, отриманих на впровадженому обладнанні, становить 136800 грн.

Успішні випробування перероблювального обладнання, розробленого під час виконання дисертаційної роботи к.т.н., доцентом Синюком О.М., дозволяють рекомендувати це обладнання до використання у взуттєвому та інших виробництвах легкої промисловості, а метод проектування обладнання для переробки полімерних відходів – на машинобудівних підприємствах.

Представник  
ПП "Кредо":

Головний технолог

Сіуліцька А.Л.

Представник  
Хмельницького національного  
університету:

к.т.н., доцент

Синюк О.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ПП “Кредо”

Комарницький А.І.

“23”

листопада 2017 р.

**РОЗРАХУНОК**

річного економічного ефекту, очікуваного від впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи к.т.н., доцента Синюка О.М. на тему:  
**“Наукові основи проектування обладнання для переробки полімерних відходів у вироби легкої промисловості”**

1. Назва підприємства: ПП “Кредо” (м. Хмельницький).
2. Коротка характеристика технологічного процесу:
  - а) До впровадження – виготовлення чоловічих і жіночих чобіт здійснювалось без додавання перероблених відходів з полівінілхлориду.
  - б) Після впровадження – виготовлення підошов чоловічих і жіночих чобіт здійснювалось з додаванням частинок полівінілхлориду, отриманих на впровадженому обладнанні для переробки полімерних відходів.

В результаті виготовлення підошов з використанням відходів, перероблених на впровадженому обладнанні, розробленому за допомогою запропонованого к.т.н., доцентом Синюком О.М. в його дисертаційній роботі методу проектування пристроїв для переробки полімерних відходів, зменшилися витрати полімерного матеріалу на 8,5%, та підвищилися експлуатаційні властивості низу взуття.

3. Сумарна економія розраховується за формулою:

$$E_{\text{сум}} = E_{\text{м}} + E_{\text{ут}},$$

де  $E_{\text{м}}$  – економія полімерного матеріалу за рахунок добавлення у пластикат перероблених полімерних відходів;  $E_{\text{ут}}$  – економія за рахунок утилізації полімерних відходів.

Вихідні дані для розрахунку зазначених складових економії наведені в таблиці 1. Економія полімерного матеріалу за рахунок додавання у пластикат перероблених полімерних відходів:

$$E_{\text{м}} = H_{\text{відх}} \cdot \text{Ц} \cdot B_{\text{р}},$$

Таблиця 1 – Дані для розрахунку очікуваного економічного ефекту

| Показники                                       | Позначення показників | Значення показників |                    |
|-------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
|                                                 |                       | До впровадження     | Після впровадження |
| 1. Річний випуск чоловічих і жіночих чобіт, пар | $B_{\text{р}}$        | 75000               | 75000              |



| Показники                                              | Позначення показників | Значення показників |                    |
|--------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
|                                                        |                       | До впровадження     | Після впровадження |
| 2. Ціна за 1 кг пластикату, грн                        | $C$                   | 45                  | 45                 |
| 3. Норма витрат пластикату на одну пару взуття, кг     | $H$                   | 0,48                | 0,44               |
| 4. Норма витрат відходів з ПВХ на одну пару взуття, кг | $H_{відх}$            | 0,04                | —                  |
| 5. Ціна 1 кг утилю, грн                                | $C_{ут}$              | 0,6                 | —                  |

$$E_m = (0,48 - 0,44) \cdot 45 \cdot 75000 = 135000 \text{ грн.}$$

Економія на утилізації відходів з полівінілхлориду досягається за рахунок переробки цих відходів у готові вироби:

$$E_{ут} = K \cdot C_{ут}$$

де  $K = H_{відх} \cdot B_p$  – норма витрат відходів з полівінілхлориду на річну кількість пар чоловічих і жіночих чобіт.

$$K = 0,04 \cdot 75000 = 3000 \text{ кг}$$

$$E_{ут} = 3000 \cdot 0,6 = 1800 \text{ грн}$$

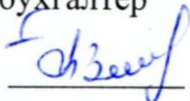
4. Модернізація прес-форм не потребує капітальних витрат, а пов'язана лише з поточними витратами, які включаються у витрати на утримання та експлуатацію обладнання і переносяться на собівартість взуття. У зв'язку з цим, річний економічний ефект дорівнює річній сумарній економії:

$$E_{сум} = 135000 + 1800 = 136800 \text{ грн.}$$

5. Отриманий річний економічний ефект відноситься до виробника. Крім цього, до виробника відноситься і соціальний ефект за рахунок утилізації відходів. Також досягається економічний та соціальний ефект у споживача за рахунок підвищення стійкості низу взуття до розтріскування на 12%.

Представники  
ПП "Кредо":

Головний бухгалтер



Навроцька Л.В.

Головний технолог



Сіулицька А.Л.

Представник  
Хмельницького національного  
університету:

к.т.н., доцент



Синюк О.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи  
Хмельницького національного  
університету



Войнаренко М.П.

2017 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Президент Української  
технологічної академії



Половніков І.І.

2017 р.

## АКТ

Ми, ті, хто нижче підписалися, представники Хмельницького національного університету д.т.н., професор Скиба М.Є., к.т.н., доцент Синюк О.М. склали цей акт про те, що Українській технологічній академії переданий для впровадження метод проектування обладнання для переробки полімерних відходів, розроблений в дисертаційній роботі Синюка О.М. на тему: *“Наукові основи проектування обладнання для переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості”*.

На сьогоднішній день в легкій промисловості майже відсутнє обладнання для механічної переробки полімерних відходів, а те обладнання, що використовується, в більшості випадків запозичено з інших галузей промисловості. Крім того, існуюче перероблювальне обладнання виготовлено без урахування змін у структурі полімеру, що виникають у процесі його переробки, в результаті чого основними недоліками процесу подрібнення полімерних відходів сучасним обладнанням є: значні витрати енергії та зниження експлуатаційних властивостей переробленого полімеру.

Розроблений, під час виконання дисертаційної роботи, метод проектування обладнання для переробки полімерних відходів дозволяє визначати конструкційні параметри цього обладнання та технологічні режими його роботи, при яких зменшуються витрати енергії на процес переробки та забезпечується анізотропія механічних властивостей в переробленому матеріалі.

Передали:

д.т.н., проф. Скиба М.Є.

к.т.н., доц. Синюк О.М.





ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор, проректор  
з науково-педагогічної та наукової роботи  
Хмельницького національного університету  
д.т.н., проф., Войнаренко М.П.

«20» листопада 2017 р.

### АКТ

про реалізацію результатів дисертаційного дослідження  
**Синюка Олега Миколайовича**

Комісія у складі: голова – декан факультету інженерної механіки, д.т.н., проф. Олександренко В.П.; члени комісії – завідувач кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії, д.т.н., проф. Кіницький Я.Т., завідувач кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем, к.т.н., доц. Поліщук О.С., доценти кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Романець Т.П. та Онофрійчук В.І. – склали цей акт про те, що результати дисертаційного дослідження Синюка Олега Миколайовича «Наукові основи проектування обладнання для переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості» реалізовано у навчальному процесі факультету інженерної механіки на кафедрі машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем. Зокрема, використовуються розроблені в дисертаційній роботі методи проектування пристроїв для переробки полімерних відходів, а також дослідні зразки перероблювальних валкових пристроїв та прес-форми для лиття під тиском армованих підошов.

Ефект від впровадження результатів роботи полягає у покращенні якості підготовки студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» у таких навчальних курсах, що пов'язані з проектуванням обладнання, яке використовується у легкій промисловості: «Машини та апарати галузі», «Інженерне обладнання підприємств галузі», «Механічна технологія та обладнання підприємств», «Основи розрахунку та конструювання типових машин», «Гідрогазодинаміка», «Інженерне проектування обладнання галузі», «Методи та засоби експериментальних досліджень». Крім цього, теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи використовуються у курсовому та дипломному проектуванні.

Голова комісії:

В.П. Олександренко

Члени комісії:

Я.Т. Кіницький

О.С. Поліщук

Т.П. Романець

В.І. Онофрійчук

## ДОДАТОК Ф

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

#### Колективні монографії

1. Бурмістенков О.П. Числові методи математичного моделювання в створенні технологічної оснастки для лиття виробів з полімерних матеріалів: монографія / О.П. Бурмістенков, Б.М. Злотенко, М.Є. Скиба, О.М. Синюк. – Хмельницький : ПП Ковальський В.В, 2002. – 148 с.
2. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантереїній промисловості: монографія / О.П. Бурмістенков, Б.М. Злотенко, В.П. Коновал, І.В. Панасюк, М.Є. Скиба, О.М. Синюк. – Хмельницький : РВЦ ХНУ, 2007. – 255 с.
3. Synyuk O. Formation of the model of the polymer material structure during orientational drawig / O. Synyuk, M. Skyba, T. Rfomanets // Actual problems of modern science [collective monograph], UTP University of Sciences and Technology in Bydgoszcz, Poland, 2017. – P. 395-413.

#### Статті у фахових виданнях України

4. Синюк О.М. Числове моделювання процесу заповнення порожнини прес-форми складної конфігурації / О.М. Синюк, М.Є. Скиба, Б.М. Злотенко // Вісник Технологічного університету Поділля. Технічні науки, 2004. – № 5. – С. 49-52.
5. Кулік Т.І. Прогнозування конфігурації частин литих комбінованих виробів з полімерних матеріалів / Т.І. Кулік, Б.М. Злотенко, О.М. Синюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну, 2005. – № 2. – С. 43-48.
6. Синюк О.М. Експериментальне дослідження процесу утворення спаїв та впливу орієнтації спаїв на експлуатаційні властивості полімерних виробів / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2005. – № 4. – Ч. 1. – Т. 2. – С. 245-248.
7. Синюк О.М. Зменшення витрат електроенергії для частотно-імпульсних приводів / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2013. – № 6. – С. 54-57.
8. Скиба М.Є. Структурно-механічна модель полімерних виробів, отриманих литтям під тиском / М.Є. Скиба, О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету, 2014. – № 6 (219). – С. 27-33.
9. Синюк О.М. Математична модель анізотропних властивостей полімерних матеріалів / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету, 2015. – № 1 (221). – С. 12-19.
10. Скиба М.Є. Математичне моделювання впливу геометрії шнека та кінематичних параметрів його руху на переміщення гранульованого полімеру в процесі лиття під тиском / М.Є. Скиба, О.М. Синюк, А.Ю. Михайловський // Вісник Хмельницького національного університету, 2015. – № 5 (229). – С. 38-45.
11. Синюк О.М. Метод визначення ефективних властивостей багатошарових полімерних матеріалів / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2015. – № 6 (231). – С. 54-62.
12. Синюк О.М. Модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету, 2016. – № 3 (237). – С. 181-188.
13. Синюк О.М. Моделювання зміни надмолекулярної структури полімерних матеріалів під час орієнтаційної витяжки / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2016. – № 6 (243). – С. 45-51.
14. Синюк О.М. Визначення пружних властивостей аморфно-кристалічних полімерів сферолітної структури / О.М. Синюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2016. – № 6. – С. 77-86.
15. Синюк О.М. Моделювання пружного відновлення струменя, що виходить з формуючої головки / О.М. Синюк // Вісник Херсонського національного технічного університету, 2016. – № 4 (59). – С. 203-212.
16. Синюк О.М. Метод розрахунку ефективних пружних властивостей полімерів з орієнтованою структурою / О.М. Синюк // Науковий журнал Чернігівського національного технологічного університету «Технічні науки та технології», 2016. – № 4. – С. 16-25.
17. Синюк О.М. Вплив тертя на об'ємну продуктивність переміщення відходів полімерного матеріалу в шнековому конвеєрі / О.М. Синюк // Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології», Хмельницький : ХНУ, 2016. – № 2 (80). – С. 89-96.
18. Синюк О.М. Моделювання процесу заповнення розплавом полімеру порожнини прес-форми з армуючими елементами / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету, 2017. – № 1 (245). – С. 251-257.



19. Синюк О.М. Визначення пружних властивостей полімерного матеріалу під час впливу на нього напружень зсуву / О.М. Синюк, Н.К. Медведчук // Вісник Хмельницького національного університету, 2017. – № 4 (251). – С. 73-81.
20. Синюк О.М. Визначення ефективних пружних властивостей орієнтованих полімерів в поперечному напрямку / О.М. Синюк, А.Ю. Михайловський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну, 2017. – №6 (116). – С. 139-148.
21. Синюк О.М. Експериментальні дослідження руйнування поліетиленових та поліпропіленових плівок / О.М. Синюк // Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології». – Хмельницький : ХНУ, 2017. – № 4 (86). – С. 51-59.
22. Скиба М.Є. Експериментальні дослідження процесу переробки полімерних відходів легкої промисловості / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2017. – № 6 (255). – С. 286-292.
23. Synyuk O. Modeling a process of filling the mold during injection molding of polymeric parts / O. Synyuk, T. Kulik, B. Zlotenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. – № 5/1(89). – P. 70-77.
24. Synyuk Oleh. Determination of rational structural parameters of device for polymer recycling / Oleh Synyuk // Scientific Journal of the TNTU, Ternopil : TNTU, 2017. – № 1. – P. 53-61.

#### **Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав**

25. Skyba M. Improvement of press-forms for polymeric items moulding / M. Skyba, O. Synyuk // Archives of foundry. Polish Academy of Sciences branch Katowice foundry commission, Katowice (Poland), 2004. – V. 4. – № 12. – P. 235-248.
26. Сынюк О.Н. Расчет основных параметров устройства для переработки полимерных отходов / О.Н. Сынюк, Т.И. Кулик // Вестник Витебского государственного технологического университета, 2017. – № 2 (33). – С. 78-87.

#### **Патенти на корисну модель**

27. Патент на корисну модель № 10263, Україна, МПК В29 С 45/73. Ливарна форма для пластмас / Синюк О. М., Кулік Т. І., Злотенко Б. М. – № u200503001; заяв. 01.04.2005; опубл. 15.11.2005; Бюл. № 11. – 2 с.
28. Патент на корисну модель № 63705, Україна, МПК Н02 Р 27/04. Спосіб зменшення витрат електроенергії для приводів / Синюк О.М., Михайловський Ю.Б. – № u201004865; заяв. 23.04.2010; опубл. 25.10.2011; Бюл. № 20. – 2 с.

#### **Тези доповідей**

29. Synyuk O. Improvement of Footwear Moulding Machines for the Production of the Advanced Reliability Items / O. Synyuk, M. Skyba // The eleventh world congress in Mechanism and Machine Science (1-4 April 2004). – Tianjin (China) : Editor Tian Huang School of Mechanical Engineering Tianjin University, 2004. – V. 5. – P. 2212-2216.
30. Синюк О. Розробка прес-форм для лиття полімерних виробів / О. Синюк // Технічно-економічне сприяння розвитку підприємництва: Зб. праць II міжнародної Польсько-Української наукової конференції (13-14 жовтня 2005 року). – Краків (Польща) : Краківська політехніка ім. Тадеуша Костюшки, 2005. – С. 287-296.
31. Синюк О.М. Використання полімерних відходів при литті двошарових підшов / О.М. Синюк // Матеріали міжнародної Українсько-Польської конференції “Techno and Design” (19-21 червня 2012). – Київ : Київський національний університет технологій та дизайну, 2012. – С.263-268.
32. Синюк О.М. Метод визначення ефективних властивостей багатошарових полімерних матеріалів / О.М. Синюк, А.Ю. Кравчук // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «VI Українсько-Польські наукові діалоги» (21-24 жовтня 2015). – Хмельницький-Яремче, 2015. – С. 19-21.
33. Синюк О.М. Проблема еволюції лінії контакту трьох фаз в процесі руху полімеру в прес-формі / О.М. Синюк // Збірник наукових праць міжнародної науково-технічної конференції молодих науковців «Сучасні технології в механіці» (21-23 квітня 2016 року). – Хмельницький: ХНУ, 2016. – С. 172-174.
34. Синюк О.М. Визначення ефективних пружних властивостей орієнтованих полімерів в поперечному до орієнтації напрямку / О.М. Синюк, А.Ю. Михайловський // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «VII Українсько-Польські наукові діалоги» (18-21 жовтня 2017). – Хмельницький-Меджибіж, 2017. – С. 112-113.
35. Карван С. А. Розробка захисного форменого одягу для військовослужбовців / С. А. Карван, С. Л. Горященко, О. М. Синюк // Тези доповідей V міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки» (11-12 жовтня 2017). – Київ, 2017. – С. 145-147.