

**ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ
ЕКСТРУДЕРІВ І ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТІВ
В АБРАЗИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

МОНОГРАФІЯ

Під загальною редакцією д-р тех. наук, проф. В.Г.Каплуна

Хмельницький – 2014

УДК 678.057:621.787

Друкується за рішенням вченої ради Хмельницького національного університету, протокол № 11 від 29.05.2014р.

Зносостійкість деталей екструдерів і термопластавтоматів в абразивному середовищі / Під загальною редакцією В.Г.Каплуна. – ХНУ.– 2014.–244с.

Авторський колектив:

Гончар В. А. канд. техн. наук; Каплуна В. Г. докт. техн. наук, проф.; Каплун П. В. канд. техн. наук, доц.; Матвійшин П. В. канд. техн. наук; Павліський В. М. докт. техн. наук, проф.

Рецензенти:

Бриков М. М. докт. техн. наук, проф. Запорізький національний технічний університет;

Стухляк П. Д. докт. техн. наук, проф. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.

В монографії наведені результати досліджень деталей екструдерів і термопластавтоматів в абразивному середовищі при виготовленні високоефективних комбікормів для тварин та переробці пластмас. Досліджувалась зносостійкість різних конструкційних сталей при різних видах зміцнення їх поверхні методами термічної та хіміко-термічної обробок на основі яких розроблено рекомендації з забезпечення максимальної зносостійкості деталей машин з врахуванням реальних умов їх роботи. Розроблені методики розрахунку деталей машин з градієнтними покриттями і різною структурою матеріалу. Описана конструкція обладнання та рецепти виготовлення високоефективних кормів для тварин методом екструдювання зерна з домішками мінералу сапоніту. Монографія корисна для інженерів-механіків, спеціалістів сільського господарства, студентів і аспірантів вищих технічних навчальних закладів.

ISBN 978-617-7094-17-2

ББК 30.820.4

3-77

ПЕРЕДМОВА

Зношування деталей, робочих органів є закономірним процесом, що постійно супроводжує роботу машин, механізмів та промислового обладнання і являє собою одну із форм їх фізичного старіння. Забезпечення високої зносостійкості деталей є однією з обов'язкових умов надійної роботи машин і механізмів та одержання максимального економічного ефекту від експлуатації.

Серед різних видів зношування деталей машин найбільш поширеним і швидкоплинним є абразивне зношування, при якому руйнування поверхневого шару деталей машин відбувається твердими частинками, що знаходяться в середовищах в різних станах і по різному впливають на матеріал. З пошукаками способів підвищення опору абразивному зношуванню пов'язане забезпечення оптимальної довговічності більшості машин і обладнання, що застосовуються в народному господарстві.

Процес руйнування поверхні сталей і сплавів при зношуванні є надзвичайно складний, що залежить від великої кількості одночасно взаємозв'язаних факторів, які включають як хімічний, структурний склад, механічні і фізичні властивості металів, з яких виготовлені деталі, так і аналогічні характеристики матеріалів, що переробляються, а також зовнішніх умов процесу зношування – робочого тиску, температури, швидкості переміщення в зоні контакту деталей, агресивності середовища. зрозумілим є те, що один якийсь показник, наприклад, твердість чи границя міцності, чи будь-який інший показник механічних властивостей матеріалу не може характеризувати рівень здатності опору зношуванню, оскільки не віддзеркалює всього комплексу явищ, що відбувається металі при дії зовнішнього середовища. Необхідні глибокі систематичні дослідження механізму руйнування робочої поверхні деталі не тільки на макро - але і на мікро - і субмікроструктурному рівнях для визначення тих властивостей сплавів, які виявляють здатність створювати опір зношувальній дії середовища в різних умовах експлуатації.

Ефективність застосування матеріалів для деталей, що швидко зношуються, і технології їх зміцнення суттєво залежить від того, на скільки повно враховані особливості експлуатації обладнання, характер зношувальної дії матеріалу, що переробляється, і степені його абразивності.

В вивченні абразивного зношування і зносостійкості матеріалів за останні роки досягнуті значні успіхи. Багато досліджень присвячено вивченню механізму і закономірностей зношування, створенню основ методології вивчення зносостійкості матеріалів і деталей машин в вирішенні багатьох складних практичних завдань. Не дивлячись на це, в питаннях вивчення процесів абразивного зношування матеріалів є ще багато не зрозумілого, які необхідно досліджувати.

Завдання знаходження кількісної залежності зносостійкості матеріалів і сплавів від фізико-механічних властивостей і мікроструктури може бути вирішені створенням математичної моделі зношування, що основана на сучасних фізичних уявленнях про елементарні акти пластичної деформації і руйнування під дією абразивного зерна з врахуванням нерівномірного розвитку цих процесів, обумовлених неоднорідністю структури реальних матеріалів і різницею фізико-механічних властивостей структурних складових.

Абразивне зношування слід розглядати як процес перетворення механічної енергії, що передається абразивами поверхневому шару металу, в енергію утворень нових поверхонь. В будь-який момент часу він повинен відповідати закону збереження енергії. З двох взаємодіючих тіл – абразиву і мікроб'єму металу, першим руйнується те, яке раніше буде насичене енергією, що є достатньою для руйнування в ньому міжатомних зв'язків і утворення нових поверхонь. Таким чином, кількість енергії, що необхідна для руйнування абразивного тіла, є тим максимумом енергії, яку воно може передати матеріалу в процесі зношування за один робочий цикл. Збільшення здатності матеріалу акумулювати енергію, не руйнуючись, буде приводити до підвищення його опору зношуванню.

Одним з ефективних шляхів підвищення зносостійкості деталей машин в абразивному середовищі є застосування зміцнюючі технологій, які дозволяють змінювати властивості зміцненого шару в широких межах. Це відкриває можливості до оптимізації властивостей поверхневого шару деталей машин за критерієм максимальної зносостійкості з врахуванням реальних умов експлуатації обладнання. В даній книзі наводяться результати досліджень зносостійкості деталей екструдерів і термопластавтоматів в абразивному середовищі при переробці

фаражного зерна з домішками мінералів в процесі виготовлення високоєфективних комбікормів для тварин та при виготовленні виробів зі склонаповнених полімерів. Екструдери і термопластавтомати мають подібні за конструкцією і технологією вузли екструдуювання – матеріальні циліндри. В матеріальному циліндрі в процесі екструдуювання виникають високі температури і тиски, які нерівномірно розподіляються по його довжині. В процесі зношування між шнеком і циліндром змінюється величина зазору, що приводить до перерозподілу тиску на різних ділянках матеріального циліндра. Наявність абразивного середовища прискорює процеси зношування шнека і циліндра, що суттєво впливає на продуктивність машини. При нагріванні і екструдуюванні полімерних матеріалів утворюється агресивне середовище, що інтенсифікую процес зношування за рахунок корозійного руйнування поверхонь тертя. Принципова їх відмінність полягає в тому, що термопластавтомати є машини циклічної дії і умови їх роботи мають відмінності. Ці відмінності слід враховувати при вивченні процесів зношування та виборі матеріалів для виготовлення деталей матеріального циліндра і розробленні раціональної конструкції окремих елементів.

Книга написана на основі наукових досліджень, що виконані авторським колективом в Хмельницькому національному університеті з застосуванням прогресивних технологій зміцнення поверхні – азотування в тліючому розряді у безводневих середовищах та нітрогартування розроблених в даному навчальному закладі.

ЧАСТИНА І.

Гончар В.А., Каплун П.В.

**ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ ЕКСТРУДЕРІВ ПРИ
ВИГОТОВЛЕННІ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ КОМБІКОРМІВ**

ВСТУП

Створення нових конкурентноздатних технологій і обладнання для виготовлення вискоефективних комбікормів для тваринництва є одним з важливих завдань сільськогосподарського виробництва.

Прогресивним напрямком у вирішенні цього завдання є переробка фуражного зерна методом екструдуювання. Цей метод заключається в обробці зерна при підвищеній температурі (до 160 °С) і тиску (до 10 МПа). Такий режим багаторемічної обробки в процесі екструзії викликає глибокі структурні зміни в поживних речовинах зерна. Високомолекулярні органічні з'єднання руйнуються, перетворюючись в більш прості, які добре засвоюються тваринами, підвищуючи їх продуктивність. Спосіб екструдуювання фуражного зерна широко застосовується за рубежом і створене відповідне обладнання. На Україні і в країнах СНД такий спосіб відомий, але ще не набув широкого застосування. Однією з основних причин такого положення є відсутність надійного і недорогого обладнання для впровадження технології екструдуювання. Нові перспективи у створенні вискоефективних конкурентоспроможних комбікормів відкривають технології і обладнання для переробки методом екструдуювання фуражного зерна та відходів зернового виробництва (насіння трав, лузги гречки, грису тощо) з добавками мінералу сапоніту. Мінерал сапоніт має в своєму складі понад 20 елементів і мікроелементів, які сприяють росту та збільшенню продуктивності тварин. Крім того він є добрим сорбентом, сприяє зберіганню молодняка від захворювань. Проте мінерал сапоніт містить в своєму складі абразивні частинки, що суттєво зменшують зносостійкість і довговічність обладнання. Використання відходів зернового виробництва у виробництві комбікормів здешевлює їх собівартість. Існуючі конструкції екструдерів не придатні переробляти фуражне зерно в суміші з відходами та мінеральними добавками.

На сьогодні є багато досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених, присвячених конструкції і принципам роботи екструдерів, але досліджень їх зносостійкості в абразивному середовищі недостатньо. З огляду на це, дослідження зносостійкості та довговічності екструдерів для переробки фуражного зерна з

домішками відходів зернового виробництва і мінералів є актуальними.

На сучасному етапі розвитку комбікормової промисловості все більше уваги приділяється поглибленій переробці зерна з метою підвищення перетравлюваності і засвоєння поживних речовин, а отже, більш високій ефективності використання комбікормів, що обумовлює зниження витрат корму на одиницю приросту тварини.

За останній час при виробництві комбікормів знаходять застосування різні способи поглибленої переробки зернової сировини: обсмажування, плющення, мікронізація (обробка ІЧ-промінням), екструдкування. З названих способів найбільш перспективним є екструдкування. Використання екструдерів безпосередньо в технологічному процесі виробництва комбікормів може забезпечити глибокі біохімічні перетворення поживних речовин-вуглеводів, клітковини, білків. Тому за допомогою екструзійної технології виробляють спеціальні комбікорми для молодняка тварин. Подальший розвиток екструзійної технології і її застосування при виробництві комбікормів дозволить значно підвищити їх якість.

З метою відпрацювання технологічних режимів виготовлення комбікормів з різних видів фуражного зерна, відходів зернового виробництва та мінеральних добавок (сапоніту) виготовлена експериментальна установка для переробки зазначених вище продуктів методом екструдкування. Дана установка дозволила з невеликими затратами сировини відпрацювати технології виготовлення комбікормів з фуражного зерна різних культур (ячменю, пшениці, кукурудзи) з домішками відходів зернопереробного виробництва (висівок, лушпиння, гречки, відходів насіння трав тощо) та мінералу сапоніту.

Для впровадження даних технологій в виробництво комбікормів ВАТ “Термопластавтомат” спільно з Хмельницьким національним університетом виготовлена серія промислових екструдерів К24-127, які експлуатуються на сільськогосподарських підприємствах Хмельниччини.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕКСТРУДЕРІВ

1.1. Наукові основи процесу екструзії

Екструзією називають процес переробки продуктів в екструдері. Екструдер (від латинського extruclo – виштовхує) – це машина для розм'якшування або пластифікації продуктів і надання їм форми шляхом протискування через профілюючий інструмент – екструзійну головку, переріз якої забезпечує формування продукції [1].

Перший відомий одновальний екструдер створено в Англії у 1869 р. для виготовлення ковбас. Потім він став прототипом для нових одновальних екструдерів, розроблених приблизно в 1935 р. виконував функцію макаронних пресів безперервної дії. Ці екструдери лише змішували і формували оброблюваний продукт, не змінюючи його структури. Лише в кінці 40-х років ХХ ст. почали використовувати варильний екструдер, який змінював продукт перш за все через клестеризацію крохмалю [2].

Процес екструдювання належить до термодинамічних методів обробки, що включають як статичні режими впливу, так і динамічний ефект тиску, температур, осмосу тощо.

Основою екструдювання є два процеси – механо-хімічна деформація і “вибух”, або декомпресійний шок, що відбувається на ділянці ударного розрядження. Ці процеси неперервні, здійснюються під дією деформаційних напружень та тепла при певних швидкостях підведення і відведення та тиску [3].

Процес екструдювання здійснюється таким чином. Підготовлена вихідна сировина подається через завантажувальний бункер або живильник в екструдер. В міру переміщення продукту по робочій камері збільшується ступінь стиску, що визначається співвідношенням площі робочого каналу до сумарної площі фільтер на виході продукту з профілюючої матриці. Крім того, продукт, ущільнюючись, прогрівається як за рахунок сил тертя частинок об поверхню робочих органів, що обертаються, і деформації зсуву в самому продукті, так і за рахунок додаткового підведення тепла.

Відомо, що біополімери в процесі екструдуювання зазнають фазових перетворень їх крихкою склоподібного стану у високоеластичній і потім у в'язкотекучий [3].

З урахуванням фаз перетворення стану продукту весь процес екструдуювання можна розділити на ряд технологічних зон: завантаження, стиск, гомогенізація та власне екструзія. Інші дослідники [2] в екструдері розрізняють зони завантаження (втягування), ущільнення, пластифікації, змішування і зрізу, а також зону вивантаження, в якій зростає тиск і продукт при цьому продавлюється через філь'єри (рис. 1.1).

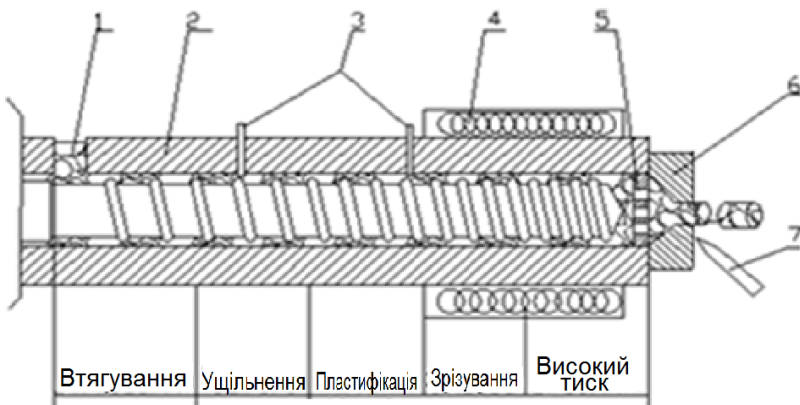


Рис. 1.1. Схема і технологічні зони по довжині робочої зони екструдера:

**1 – подача сировини; 2 – циліндр; 3 – термовари; 4 – обігрів;
5 – перфорована пластина (філь'єра); 6 – сопло; 7 – ножі**

В екструдерах спеціального призначення можна виділити зони дегазування, диспергування, змішування та інші.

Довжина функціональних зон екструдера може змінюватись в значних межах залежно від властивостей перероблюваного продукту, його технологічності і особливостей обробки.

У зоні завантаження змін у продукті практично не спостерігається. Високоеластичного стану продукт набуває в зоні стиску. Тут відбувається руйнування кліткової структури продукту, його крохмального і целюлозно-лігнінового компонентів. В зоні

гомогенізації продукт набуває в'язкотекучого стану, при якому відбуваються структурні перетворення білків і крохмалю.

Основні та найбільш важливі зміни відбуваються в зоні екструзії. При швидкому переході продукту із зони високого тиску ($16 \cdot 10^5$ Па і більше) в зону атмосферного тиску акумульована ним енергія вивільнюється зі швидкістю, приблизно рівною швидкості вибуху. При цьому в результаті “вибуху” (спучування) продукту відбуваються глибокі перетворення його структури: розрив кліткових стінок, деструкція, гідроліз.

Доведено, що розширення продукту на виході з філь'єр безпосередньо є наслідком фізичних властивостей води [4]. В екструдері температура змінюється від кімнатної до 200 °С. За цих термічних умов і під дуже великим тиском вода існує лише в рідкому стані. Коли суміш виходить із філь'єр і досягає атмосферного тиску, вода зразу ж випаровується, виділяючи значну кількість енергії.

Під дією тиску пари в продукті утворюються пори, а крохмальні зерна, що залишилися цілими, розриваються. Різке зниження температури забезпечує тверднення крохмалю і фіксує альвеолярну структуру, що утворюється під дією водяної пари. Встановлено визначальний вплив пластичного стану на весь характер екструдкування зернових кормів [5]. Про це свідчить лінійний характер залежності енергозатрат на екструдкування від швидкості переміщення зернового матеріалу і наявності шорстких зон по довжині робочого органу.

В результаті екструзії кормових продуктів відбуваються явища денатурації білків, інактивації антиспоживчих речовин, декстринізації крохмалю, деструкції целюлозно-легнінних утворень, практично повної стерилізації продуктів екструзії, створення мікропористої структури продукту. Це сприяє підвищенню засвоюваності поживних речовин екструдованого корму [3].

Із історії харчування людини і годування відомо, що поживні речовини в травному тракті з моменту їх поступлення до всмоктування зазнають механічної дії, гідрування кислотної обробки і ферментативного розщеплення. Все це зумовлює перетворення речовин із складних і прості і потребує значних затрат фізіологічної енергії.

Глобулярні білки в природному (нативному) стані стійкі до дії прогеліотичних ферментів. Це пов'язано з відсутністю в них точок, на які могли би діяти ферменти, утворюючи систему фермент-субстрат. В процесі екструдуювання глобулярна структура білка молекули перетворюється у фібрилярну. При цьому відбувається розгортання пептидних ланцюгів і вивільняються групи, що здатні зв'язуватись з ферментами.

Крохмаль є важливим джерелом енергії для людини і тварин. В рослинах він відкладається у вигляді зерен різної величини і форми. Зерна крохмалю мають дільниці з кристалічною структурою і дуже стійкі до руйнування. В процесі екструдуювання при певних режимах тиску і температури, а також деформативних навантаженнях, що розвиваються, створюються умови для сухої клейстеризації крохмалю. Більш глибокі зміни відбуваються на дільниці власне екструзії, тобто в момент безпосереднього виходу продукту з екструдера. Накопичуючи енергію, вода із стану перегрітої рідини миттєво ($1,2 \cdot 10^{-4}$ с) перетворюється в пару, руйнуючи при цьому молекули амілози і амінопектину до декстринів і цукрів.

Різноманітність процесів, що відбуваються при екструдуюванні, дозволяє класифікувати призначення екструзії за ступінню впливу на продукт таким чином: для розщеплення на клітковому рівні, текстурування, стерилізації, видалення вологи, надання форми.

Після екструдуювання продукту покращується перетравність поживних речовин, підвищуються стійкість при зберіганні, засвоюваність жиру, збільшується об'ємна маса.

Змінними параметрами екструзійного процесу обробки є склад сировини, його природа, вологість, способи попередньої підготовки, а також зміни температури, тиску, тривалості та інтенсивності механічного впливу на продукт під час екструзії [6].

Величина створюваного в екструдері тиску залежить від сукупності взаємопов'язаних параметрів [4] – природи вихідного продукту, температури екструдуювання, гідратації продукту, швидкості обертання робочого органу машини, розміру і форми філь'єр.

Найбільш важливим фактором, що впливає на створюваний тиск, є висока в'язкість крохмалю зернових, кореневульбоплодів після клейстеризації. Невелика кількість води в крохмальних

зернах під час екструзії збільшує в'язкість і спричиняє збільшення тиску для продавлювання продукту через філь'єри.

При дослідженні процесу екструзії оцінюють склад і властивості вихідної сировини, умови її обробки, фізичні і фізико-хімічні параметри кінцевого продукту, такі, як ступінь спучування, пористість, густина, об'ємна маса, розчинність, набухання водоутримуюча здатність, консистенція, в'язкість водних дисперсій тощо. Так, за кордоном вивчено вплив вмісту амілази і амінопектину в крохмалі на розширення і густину екструдату при варильній екструзії [4]. Якщо вміст амілази в крохмалі збільшується, то задовільне розширення екструдату спостерігається при підвищенні температури. Розширений, багатий амілазою крохмаль має дуже білий колір, тонку і рівномірну текстуру, він м'який і еластичний. Амілопектин крохмалю розширяється, починаючи з більш низької температури, проте цей процес швидко спадає зі збільшенням температури.

Встановлено також, що є прямо пропорційна залежність між в'язкістю кінцевого продукту і вмістом у ньому води, ліпідів і простих цукрів та обернено пропорційна залежність в'язкості від температури процесу екструдуювання і швидкості обертання шнека. Крім того, на в'язкість впливає конструкція екструдера і його робочих органів [4].

Таким чином, екструдуювання дозволяє цілеспрямовано змінювати властивості продукту і його складових компонентів, тому знаходять все більше практичне застосування в багатьох галузях народного господарства, в тому числі й в комбікормовій промисловості.

1.2. Конструкції екструдерів для переробки фуражного зерна

Основою екструдуювання є механічне стискування вихідного або підданого попередній обробці продукту. Попередня обробка може бути механічною (розмелювання), тепловою (нагрів) або гідротермічною (пропарювання з одночасним нагрівом).

Екструдер складається з декількох основних вузлів – корпусу, оснащеного нагрівальними елементами, робочого органу (шнека, диску, поршня), розміщеного в корпусі, вузла завантаження перероблюваного продукту, силового приводу,

системи підтримки оптимального температурного режиму та інших контроль-вимірювальних і регулюючих пристроїв [1].

За типом основного робочого органу екструдери підрозділяють на одношнекові, багатошнекові, дискові, поршневі та інші.

Найбільше розповсюдження в промисловості отримали шнекові екструдери. Захоплюючи вихідний продукт, шнек переміщує його від завантажувального пристрою уздовж корпусу екструдера. При цьому продукт стискується, розігрівається, пластифікується і гомогенізується. Максимальний тиск в екструдері досягає величини від 5 до 50 МПа.

За частотою обертання шнека екструдери підрозділяються на нормальні і швидкохідні з коловою швидкістю відповідно 0,5 і 7 м/хв, а за конструктивним виконанням – на стаціонарні та з корпусом, що обертається, з горизонтальним або вертикальним розташуванням шнека.

Є екструдери зі шнеками, що здійснюють не тільки обертовий, але й зворотно-поступальний рух.

Для ефективної гомогенізації продукту на шнеках встановлюють додаткові пристрої-зубці, шліци, диски, кулачки та ін.

Розповсюдження набули планетарно-вальні екструдери, у яких навколо центрального робочого органу (шпинделя) обертається декілька додаткових шнеків (до 12 шт.) [1].

Принцип дії дискового екструдера базується на використанні напружень, що виникають в пружно-в'язкому матеріалі та нормальних до зсувних. Основою конструкції такого екструдера є два плоскопаралельних диски, один з яких обертається, створюючи зсувні та нормальні напруження, а другий є нерухомим. В центрі нерухомого диску є отвір, через який видавлюється розм'якшений матеріал. Дискові екструдери мають більш високу пластикуючу і гомогенізуючу здатність, ніж шнекові, але тиск, який вони створюють нижчий. З огляду на це їх використовують головним чином як змішувачі-гранулятори або для підготовки матеріалу перед завантаженням у шнековий екструдер.

Поршневий екструдер через низьку продуктивність використовують обмежено, в основному для виготовлення труб і профілів з реактопластів.

Конструкції екструдерів можна класифікувати також за геометричною формою, механічними, функціональними або термодинамічними характеристиками. Крім того, екструдери рекомендується класифікувати за їх фізичними ознаками, так як вони впливають на хімічні структурні характеристики екструдованих продуктів. Особливе значення мають такі параметри, як нахил ріжучого краю кромки матриці та кількість теплової енергії, що утворюється в процесі екструдювання за рахунок механічного перетворення енергії; температура під час процесу; вологість маси, що екструдюється. З врахуванням цих характеристик екструдери можна розділити на такі групи:

- з коротким шнеком (автогенні);
- з великим нахилом ріжучого краю матриці;
- двошнекові з незначним нахилом ріжучого краю матриці;
- формуючі, з великим нахилом ріжучого краю матриці.

Екструдери з коротким шнеком характеризуються високою швидкістю обертання шнека і коротким циліндром. При цьому температуру важко регулювати через малий термін знаходження маси в екструдері. Саме тому його можливості застосування обмежені. Екструдер можна використовувати, наприклад, для переробки зернових і їх сумішей [7].

Характерними властивостями екструдерів з великим нахилом ріжучого краю матриці є високий тангенційний тиск і швидкість обертання шнека. Ці потужні екструдери оснащені довгим циліндром, системою терморегулювання і можуть застосовуватись для різних видів сировини. Серед недоліків можна назвати неможливість контролювати ступінь клейстеризації крохмаловміщувальних компонентів.

Особливою ознакою двошнекового екструдера є точне об'ємне дозування. Цей тип екструдерів може транспортувати як сухі і порошкоподібні продукти, так і розчини та суспензії. Проте для варильної екструзії крохмаловміщуючої сировини в промисловому об'ємі потрібна вологість продукту, що екструдюється, від 10 до 30 %. Терморегулююча система функціонує таким чином, щоб забезпечувалось збільшення і зменшення тепла. Недоліком цих екструдерів є високе зношення через тісний контакт шнеків між собою.

До групи екструдерів з незначним нахилом ріжучого краю матриці належать одношнекові екструдуючі установки з низькою

частотою обертання (від 25 до 80 хв⁻¹). Вони відрізняються відносно довгим циліндром і системою терморегуляції, що дає можливість для точного контролю за зміною температури під час процесу. Час обробки продукту в екструдері становить від 1 до 2 хв. Це дозволяє контролювати клейстеризацію продукту шляхом узгодження кількості тепла, що утворюється в результаті тертя, і кількістю тепла, що підводиться або відводиться шляхом терморегуляції.

Формувальні екструдери з великим нахилом ріжучого краю матриці відрізняються невеликим внутрішнім тертям і низькою температурою маси (менше 60 °С) [7].

Як уже було зазначено, розрізняють одно- і двовальні екструдери, причому серед останніх є екструдери зі шнеками, що торкаються один одного, і екструдери, шнеки яких знаходяться в тимчасовому зачепленні [8].

Екструдери з одним шнеком (рис. 1.2, а) підрозділяються на:

- зі шнеком, крок витка якого зменшується;
- зі шнеком, діаметр вала якого збільшується;
- такі, що містять в циліндрі спіралі;
- з конічним корпусом;
- з кроком витка, що зменшується, і конічним корпусом.

У цих машинах використовують, як правило, декілька послідовно з'єднаних шнекових стержнів різної конструкції, кожний з яких забезпечує спеціальну функцію при обробці – переміщення, варіння, зрізування, стискування [4].

Недоліками одношнекових екструдерів є погане змішування оброблюваного продукту, відсутність примусового транспортування, а також нерівномірне транспортування продукту з високим вмістом жиру і води. Крім того, при проходженні сухого продукту є небезпека його спікання на шнеку, відсутнє самоочищення.

Машини з двома шнеками (рис. 1.2, б), що не входять в зачеплення один з одним, підрозділяються на:

- екструдери з валами, що синхронно обертаються і торкаються один одного;
- екструдери зі шнеками, що обертаються в протилежних напрямках і торкаються один одного.

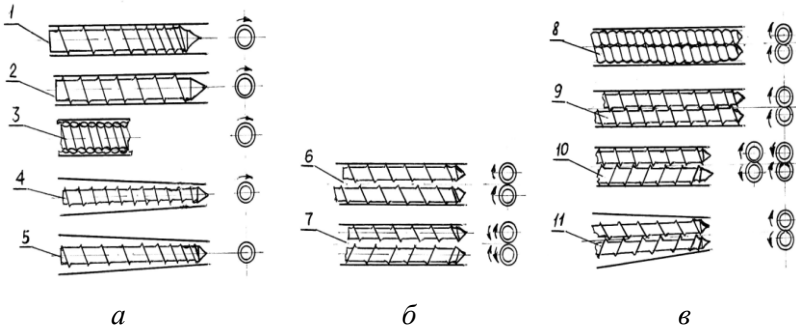


Рис. 1.2. Системи екструдерів:

***a* – одношнекові; *б* – двошнекові (без зачеплення);**

***в* – двошнекові (з зачепленням);**

1 – з кроком витка, що зменшується; 2 – з діаметром вала, що збільшується; 3 – такі, що містять в циліндрі спіралі; 4 – з конічним корпусом; 5 – з кроком витка, що зменшується в конічному корпусі; 6 – зі шнеками, що торкаються один одного і синхронно обертаються в одну сторону; 7 – зі шнеками, що торкаються і обертаються в протилежні сторони; 8 – зі шнеками, що обертаються в одну сторону і самоочищаються; 9 – зі шнеками, що обертаються в одну сторону і частково самоочищаються; 10 – зі шнеками, що обертаються в протилежні сторони і частково самоочищаються; 11 – зі шнеками, що обертаються в протилежні сторони, в конічному корпусі

Екструдери з двома шнеками (рис. 1.2, *в*), що входять в зачеплення один з одним, підрозділяються на екструдери:

- шнеки яких рухаються синхронно і самоочищаються;
- з шнеками, що частково самоочищаються;
- з камерним шнеком;
- з конічним шнеком і конічним корпусом.

Різьба шнеків цих машин має трикутний або трапецієвидний профіль і сприяє хорошій передачі тиску. Шнеки складаються з модулів, що представляються і замінюються у відповідності з видом продукту. Функції різних модулів наступні. Модуль з довгим кроком шнека забезпечує переміщення і декомпресію-дегазацію продукту; модуль, що має звужений крок шнеку – стискування; ексцентричні диски – перемішування

(помірне зрізування) модуль з протилежним кроком шнека – змішування, періодичне подрібнення (інтенсивне зрізування).

Розен і Міллер (США) запропонували поділяти екструдери за термодинамічними властивостями [9]:

- автогенні екструдери (тобто практично адіабатичні), в яких продукт нагрівається лише за рахунок переходу механічної енергії в теплово;

- ізотермічні екструдери, в яких тепло підводиться ззовні, а надлишкове тепло відводиться носієм (повітря, вода, мастило);

- політропні екструдери, що мають автогенні та ізотермічні властивості.

Ці ж автори запропонували більш раціональну, так звану “механічну”, класифікацію екструдерів залежно від деформації зсуву. Встановлено, що при підвищенні деформації зсуву швидкість зсуву і температура підвищуються, а отриманий продукт має понижено вологість.

Обидві запропоновані класифікації мають суттєві недоліки, так як базуються на єдиному фізичному критерії. Разом з тим екструзія є складним технологічним процесом, на кінцевий результат якого значною мірою впливають різні взаємопов’язані нюанси. З огляду на це Харпер (США) запропонував свою класифікацію екструдерів, прийнявши за основу вологість продукту [10] (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Класифікація екструдерів залежно від вологості продукту

Характеристика екструдерів	Вологість продукту, %		
	нижче 20	середня 20–28	вище 28
Вид енергії	Механічна	1/2 механічна 1/2 пара	Із застосуванням пари
Питома витрата енергії, кВт·год/кг	0,10	0,04	0,02 і нижче
Собівартість продукту	Висока	Помірна	Низька

Таким чином, екструзійна технологія покликана випускати нові види продуктів при використанні широкої гама вихідних сировинних компонентів, замінивши традиційні технологічні процеси.

1.2.1. Конструкції та характеристики екструдерів для переробки зерна, що випускаються за кордоном

На сьогодні зарубіжна промисловість постачає на ринок екструдери, що забезпечують неперервність і гнучкість процесу, виготовлення продуктів з різкими фізико-хімічними і функціональними властивостями. Залежно від типорозмірів продуктивність екструдерів складає від 30 до 9000 кг/год.

Екструдери випускаються різними зарубіжними фірмами, серед яких “Anderson” (США), “Lalesse” (Швейцарія), “Clextral” (Франція), “Wenger” (США) та ін.

В таблиці 1.2 подано характеристики деяких екструдерів, що випускаються за кордоном.

Таблиця 1.2

Характеристики екструдерів

Фірма виготовлення екструдера	Діаметр шнека, мм	Потужність приводу, кВт	Складений (+) чи суцільний (-)	Циліндр						Привод				Подача продукту			
				Охолодження, обігрів		Відведення повітря	Рознімна конструкція	Вимірювання тиску	Вимірювання температури	Передача	Число обертів		Захист від перевантаження	сухого	рідкого		
				Електричне	Рідинне						клинопасова	редукторна за вибором фіксоване					
ZSK 40 (Німеччина)	40	30	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+
Continua 37	37	9,5	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Continua 58	58	33	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+
Continua 120	120	200	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+
Continua 170	170	520	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+
Continua 240	240	980	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+

Фірма “Clextral” (Франція) випускає шість типів двошнекових екструдерів, що мають переваги порівняно з обладнанням інших фірм. Основним з них є використання індуктивного нагріву продукту, який має дуже високий ККД (від 65 до 70 %) порівняно з кондуктивним нагрівом. Екструзійні установки виготовлено з корпусів трубчастої конструкції, що дозволяє повністю або частково перебудувати технологічний процес при зміні виду сировини і готового продукту.

Для розширення сфери застосування як з точки зору сировинних компонентів, так і отримання кінцевих продуктів, фірма розробила оригінальну конструкцію шнека з наборних змінних елементів або модулів. Шнеки аналогічно до корпусів, легкозбірні, можуть включати транспортні елементи, елементи стискування, ексцентричні дробильні диски, а також різноманітні фільтри, що забезпечують ретельну переробку сировини. Продуктивність екструдера залежить від виду сировини, швидкості шнеків, набору елементів на валках, а отже, від створюваного в корпусі тиску.

Шліцові вали, на яких набираються шнеки, мають високу стійкість і витримують значні крутильні моменти.

На Істринському комбінаті молочних продуктів для виготовлення дитячого харчування обладнано лінію екструдуювання, що має екструдер фірми “Clextral”, сушарку-охолоджувач віброкиплячого шару, подрібнювач готового продукту. Продуктивність лінії – до 1 т/год. Екструдер двошнековий корисної довжини 2000 мм. Шнеки діаметром 130 мм збираються з 10 частин довжиною по 200 мм з нарізкою різної конфігурації. Швидкість обертання шнеків – до 200 хв⁻¹. Корпус шнеків має індукційний підігрів потужністю до 120 кВт. Температура термообробки регулюється від 150 до 200 °С. Встановлена потужність головного приводу – 175 кВт. В корпус шнека подається вода, витрата якої складає від 0 до 174 л/год. Води використовується для підтримання потрібного режиму екструдуювання і промивання шнеків після закінчення роботи. Екструдуюється рисове і гречане борошно. Вологість вихідного продукту – від 11 до 12 %, вологість продукту на виході із установки від 9 до 12 %.

У харчовій, комбікормовій промисловості та сільському господарстві Франції все більше застосування знаходить екструджування зернових культур. Фірма “Crezaux-Loire” розробила і випускає екструдер, який, на відміну від аналогічних машин, замість одного шнека обладнаний двома. Це дозволяє подавати для обробки сировину різної величини, перешкоджає поверненню продукту всередину зони живлення і, таким чином, дає можливість використовувати циліндри з гладкою поверхнею, що забезпечує їх чистоту. Друга особливість цієї машини – використання системи обігріву, що базується на індукційному нагріванні струмами промислової частоти. Це дає економію енергії від 20 до 25 % порівняно зі звичайним резисторним способом нагрівання [11]. Екструдують з великим ефектом різноманітну сировину – пшеницю, рис, кукурудзу, сорго, маніок, крохмаль. У результаті продукти набувають необхідних функціональних властивостей – густину, поживність, засвоюваність. Окрім того, цей екструдер дозволяє створювати комплекс амілази і ліпідів у процесі запарювання з екструзією.

Фірма “Matador” (Данія) виготовляє екструдер Matador, що має номінальну продуктивність від 2,5 до 5 т/год. залежно від складу комбікормів і номінальну потужність від 164 до 186 кВт. Екструдер випускають з шістьма різними типами шнеків, в тому числі дискретного і неперервного варіантів екструджування, що дозволяє виробляти сухі, напівсухі та вологі корми. Фірма вважає, що ця машина буде мати найбільше розповсюдження при виробництві спеціальних кормів, наприклад, кормів для риби, домашніх і хутрових тварин.

Фірма “Walter” (Німеччина) розробила механічно-гідротермічний спосіб екструджування за допомогою екструдерів типу ПШО, який застосовують для зерна рапсу, люпину, ячменю, сорго, кукурудзи, сої, а також для комбікорму, зараженого афлатоксинами. За цією технологією можна отримати комбікорм для всіх видів молодняку тварин (телят, поросят, лоша́т та ін.). При цьому в екструдер вводиться до чотирьох видів рідких компонентів. М'яса вводиться перед направленням продукту на відволоження. Екструдер не потребує попереднього підігріву або охолодження, управляється автоматично.

Лінії з виробництва комбікормів з використанням запропонованого способу їх екструджування включають очищення

зерна на аспірааторах і магнітних сепараторах, кондиціонування зі зволоженням на 2–2,5 %, відволожування у спеціальному котлі з обігрівальним днищем, екструдуювання, подрібнення зерна в дробарці з додаванням жиру [12].

Розроблений фірмою “Buhler-Buhler” МІАС (Швейцарія – Німеччина) одновальний екструдер DNEB працює за принципом гальмівного дискового пристрою і має вставні змінні елементи на шнеку. Шнек, що обертається в циліндрі екструдера, проводиться в рух головним двигуном через просту кулачкову муфту у вузькому редукторі. Завдяки самонесучому виконанню фланцевого двигуна і редуктора не потрібно ніякої додаткової конструкції шасі [2].

Випуск продукту відбувається роздільно через шість розташованих по периметру цільових сопел, що безступінчато регулюються під час роботи машини. При цьому отримують продукти екструзії невизначеної форми. Для задоволення спеціальних вимог щодо форми є фасонні сопла з фіксованим перерізом (круглі, чотирикутні та ін.).

Екструдер VI-EX фірми “Buhler-Buhler” МІАС можна використовувати для різної мети. Це двошнековий екструдер з шнеками, що обертаються в одному напрямку і самоочищаються. Він має суттєві удосконалення порівняно з машиною DNEB.

Діаметр шнека екструдерів VI-EX становить від 43 до 250 мм. Конструкцією машин передбачається:

- вибір двигунів з різними можливостями;
- підтримання в корпусі певного температурного режиму;
- електронно контрольована проковзуюча муфта для захисту від статичних зламів при дії разового навантаження;
- прифланцевий редуктор;
- центральне мастилопостачання приводу;
- легке відведення валів шнека від приводу;
- шліцевий вал, використання якого дає можливість передачі обертаючого моменту при забезпеченні надійної безпеки експлуатації;
- можливість зміни довжини екструдера завдяки системі уніфікації частин корпусу і вставним елементам шнека;
- можливість введення додаткових твердих компонентів;
- відкидний різальний апарат зі зміною числа обертів, який може бути оснащений різним числом ножів;
- можливість заміни насадок;

– установка приводної і екструдуючої частин на одній основі, що полегшує транспортування.

Двошнековий екструдер CONTINUA фірми “Werner & Pfleiderer” (Німеччина) застосовують в основному для неперервного приготування і обробки харчових продуктів на базі крохмалю, борошна і рослинних протеїнів. В екструдері можна переробляти порошкоподібні, зернисті та пастоподібні продукти. Є можливість швидкого переналагодження машини при зміні виду або якості вихідної сировини (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

**Технічні характеристики екструдерів CONTINUA фірми
“Werner&Pfleiderer”**

Показник	Модель					
	C37	C58	C83	C120	C170	C240
Діаметр шнеків, мм	37	58	83	120	170	240
Обертаючий момент кожного вала (максимум), Н·м	73	270	800	2400	7100	18800
Число обертів шнеків n_{\max} , хв ⁻¹	500	400	400	400	350	250
Приводна потужність N_{\max} , кВт	9,5	23	67	200	520	980
Зовнішні розміри при довжині технологічної частини, що дорівнює 12 діаметрам, мм, біля:						
– довжина;	1900	3000	3700	4900	5600	7600
– висота;	1200	1260	1300	1330	1350	1400
– ширина	900	900	1300	1350	1400	1450

Два шнекових вала, що зачіпляються, складені із посаджених двозахідних шнекових втулок і місильних елементів, обертаються в одному напрямку і поміщаються в корпусі, що має в розрізі форму вісімки. При цьому забезпечується вимушене самоочищення і переміщення продукту вздовж стінок корпусу по траєкторії у вигляді вісімки. В екструдері можуть змінюватись розташування, кількість, напрямок кроку і кут зміщення місильних елементів, що дозволяє досягати необхідних ефектів для відповідної технології.

Фірма “Werner & Pfleiderer” виготовляє екструдери декількох типових рядів для різних специфічних задач: ZPM, Continua Standart, Continua Kompakt, Continua Heavy, Continua Duty. Всі машини монтуються на міцній рамі. Приводна частина серійно

комплектується електродвигуном постійного струму з тиристорним управлінням і регульованим числом обертів.

Фірма “Werner” (США) є однією з провідних з виробництва екструзійної техніки. Вона випускає сім моделей екструдерів двадцяти модифікацій, в тому числі лабораторні та промислові установки продуктивністю до 10 т/год. Фірма випускає як одношнекові (Х–20, Х–25, Х–155, Х–175, Х–200), так і двошнекові екструдери (ТХ–80, ТХ–138).

Екструзійні апарати неперервної дії х-200 характеризуються більш високою продуктивністю і термодинамічною ефективністю порівняно з іншими екструдерами, призначеними для отримання якісних рослинних білків, желювання і спучування зерен, круп і їх компонентів (табл. 1.4).

Таблиця 1.4

Продуктивність екструдерів фірми “Werner”

Модель	Продуктивність при вологості 10 %, кг/год.			
	Отриманий продукт			
	Текстурована соя	Спучені злакові та крупа	Спучені легкі закуски	Парене зерно
Х–20	60–90	60–90	75–90	130–170
Х–20	180–270	220–320	300–350	510–680
Х–155	4509–550	–	–	1800–2000
Х–175	800–1200	–	–	3800–6500
Х–200	1200–1600	1000–1200	–	6500–9000
ТХ–80	450–600	250–425	250–425	–
ТХ–138	1500–1900	900–1000	700–1200	–

Простота технічного обслуговування, швидкість і ефективність очищення, висока продуктивність сприяють значному скороченню витрат енергії і вартості робочої сили, забезпечують високу відповідність апарата Х–200 нормам санітарно-гігієнічних і експлуатаційних вимог, а також вимог до ефективності.

Одношнековий екструдер Х–235 є кращим з усіх одношнекових і двошнекових екструдерів фірми “Werner” (рис. 1.3). Він відрізняється тим, що до конструкції входить новий подвійний циліндр для попереднього кондиціонування. Завдяки цьому забезпечується висока ефективність екструзування і висока якість комбікормів.

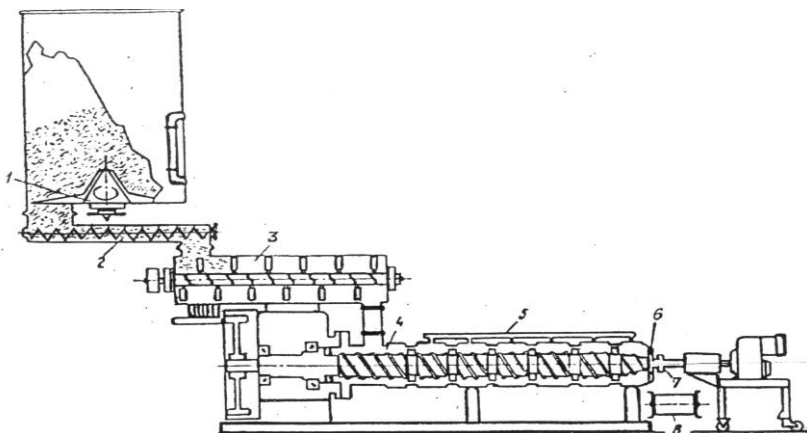


Рис. 1.3. Одношнековий екструдер X-235 фірми Wenger:
1 – розвантажувач, 2- живильник, 3 – змішувач для попереднього кондиціонування, 4 – секція екструдуння, 5 – подача води і пари, 6 – матриця, 7 – ніж зрегульованою швидкістю обертання, 8 – стрічковий конвейєр

“Cronдона Nimet” виробляє комбікорми для риб, кімнатних (домашніх) тварин; зернові продукти для годівлі молодняку, що відрізняються різним ступенем желатинізації крохмалю; зернові та бобові кормові суміші з інактивованими антипоживними факторами; замінники молока.

Продуктивність екструдерів цієї фірми моделей В4, В3, В2, В1 становить відповідно 500–600, 1000–1200, 2000–2400, 4000–5000 кг/год.

Фірма “Sprout-Bauer” (США) випускає екструдери неперервної дії переважно для виробництва комбікормів для домашніх тварин. Екструдери марки MDL 450 мають продуктивність від 0,9 до 2,7 т/год., а марки TME 1500 і TME 2000 мають продуктивність відповідно від 5,9 до 7,26 і від 7,26 до 9 т/год. на комбікормах для собак.

Фірмою “Baker Perkins” (Великобританія) розроблено двоступінчастий екструдер марки MPE-50, що має співвідношення довжини шнека і його діаметра 35:1 [13]. Це дає можливість

обробляти харчові продукти, що потребують тривалого перемішування.

Фірма “Textruder Engineering AC” (Португалія) освоїла випуск одно- і двошнекових екструдерів для промислового виробництва харчових продуктів продуктивністю від 100 до 4000 кг/год. Екструдери, оснащені конічними шнеками, дозволяють отримувати продукти, що складаються на 100 % з білків. При цьому харчова сировина обробляється досить обережно, що зберігає вітаміни й амінокислоти.

Фірма “Buhler” (Швейцарія) розробила лінію виробництва комбікормів для риб із застосуванням екструдерів. Вироблений на неосновному виробництві незбагачений розсипний комбікорм поступає на лінію. До складу лінії входить апарат для пропарування, екструдер, подрібнювач, сушарка-охолоджувач, просіююча машина, установка для нанесення на поверхню гранул жиру і вітамінів. Лінія забезпечена автоматизованим управлінням процесу.

Таким чином, метод екструдкування на сьогодні є більш раціональним і прогресивним способом при традиційних виробництвах, а також при створенні нової продукції. Порівняння конструктивних і технологічних переваг одношнекових і двошнекових екструдерів свідчить про значну перевагу останніх.

1.2.2. Розвиток екструзійної техніки виготовленої в Україні та країнах СНД

Інститут “УкрНДПластмаш” розробив прес-екструдер ПЕК-125-8, призначений для виробництва карбамідного концентрату на основі розмолотого зерна (ячменю, жита, кукурудзи, пшениці), сечовини і бентоніту натрію (табл. 1.5).

У 1988 р. створено першу дослідну двошнекову екструзійну установку марки РЗ-КЭД-88, призначену для приготування харчових продуктів з кукурудзяної, рисової, пшеничної та інших круп. Наборні шнеки діаметром 88 мм, що самоочищаються, насаджуються на шліцові вали. Число обертів шнеків регулюється в діапазоні від 10 до 280 хв⁻¹. Частота обертання шнеків живильника становить від 10 до 240 хв⁻¹, ріжучих ножів – від 150 до 3000 хв⁻¹.

Термостатування корпусу екструдера здійснюється за допомогою електронагріву і водяної сорочки, що дозволяє

виконувати обробку продукту при температурах від 50 до 300 °С. Тривалість обробки становить від 5 до 120 с. Продуктивність – 250 кг/год. Габаритні розміри установки 4300×1500×2200 мм, маса – 3150 кг. Управління тепловим режимом і частотою обертання шнеків автоматичне.

Таблиця 1.5

Технічна характеристика ПЕК-125-8

Продуктивність, кг/год.	550–650
Потужність приводу, кВт	55
Параметри, що контролюються і регулюються	Температура по трьох зонах; тиск маси на виході; навантаження приводу
Габаритні розміри (без шафи КВП і управління), мм:	
– довжина;	3330
– ширина;	710
– висота.	1690
Маса, кг	2130

Освоєно серійний випуск двох моделей екструдерів марки А1-КХП і А1-КХ-2П, що є модифікацією першого. Ці установки призначені для обробки сировини, що містить крохмаль, і відрізняється способом кріплення та знімання робочих органів, а також конструкцією механізму різання.

У Всесоюзному науково-дослідному інституті комбікормового виробництва вивчено технологію екструдуння окремих зернових компонентів (ячменю, кукурудзи, пшениці), сумішей зернових компонентів різних рецептів, сумішей ячменю, висівку, соєвого шроту, рибного борошна, а також екструдованих цих же компонентів і сумішей з введенням жиру і фосфатидного концентрату із застосуванням екструдера КМЗ-2 [14, 15, 16]. Результати досліджень показали, що при екструдунні перетравність протеїну не підвищується, на підставі чого було зроблено висновок про недоцільність обробки в екструдерах білкової сировини.

На основі досліджень розроблено також рекомендації для режимів підготування і екструдуння зернових компонентів та сумішей. Екструдуння зернової частини комбікорму здійснюється із застосуванням серійних екструдерів КМЗ-2.

Зернова сировина, що поступає на лінію екструдуювання, повинна бути очищена від сміття, сторонніх і металомагнітних домішок за нормами комбикормового виробництва.

Технологічна схема лінії екструдуювання передбачає підготовку зернової частини комбикорму до екструдуювання, обробку в екструдерах, охолодження і подрібнення екструдованого продукту.

Підготовка зернової сировини при виробленні комбикорму за рецептами, до складу яких входять ячмінь і кукурудза, полягає в подрібненні, дозуванні подрібненого зерна і висівок відповідно до рецепту, змішуванні цих компонентів. Подрібнення зернових здійснюють на молотковій дробарці з отворами сипі діаметром 3мм. Подрібнені зернові компоненти і висівки направляють в наддозаторні бункери.

Підготовка зернової сировини при виробленні комбикорму за рецептами, до складу яких входить тільки ячмінь, полягає у зволоженні його до 17–18 %, наступному подрібненні до потрібної крупності, дозуванні і змішуванні з висівками. При цьому зволоження зерна рекомендується виконувати одним з двох способів – водою або парою. При зволоженні зерна водою в лінію монтують зволожувальну машину ЗУМ-2 або БУВ-10 і бункери для відлежування.

Для зволоження зерна до потрібної вологості регулюють продуктивність зволожувальних машин (подачу зерна) і кількість води.

Зерно після зволожувальної машини направляють в бункери для відволоження. Бункери повинні мати спеціальні випускні пристрої. Тривалість відволоження від 1 до 2 год.

Зволожене зерно подрібнюють на молотковій дробарні з діаметром отворів сипі від 3 до 4 мм. Підготовлене подрібнене зерно направляють в бункери над дозаторами.

При зволоженні зерна паром в лінію додатково установлюють пропарники і бункери для відволоження. При цьому тиск пари в системі складає від 2 до 4 кг/см² (від 0,2 до 0,4 МПа), а витрати пари – від 150 до 200 кг/т.

Підготовлені зернові компоненти і висівки дозують на об'ємних і вагових дозаторах у співвідношенні згідно з рецептом.

Змішування компонентів після дозування здійснюють в змішувачах неперервної дії при об'ємному дозуванні або в

змішувачі періодичної дії при ваговому дозуванні. Необхідна якість змішування забезпечується при роботі змішувача в паспортному режимі.

Екструдування підготовленої суміші подрібненого зерна і висівок відбувається в екструдері КМЗ-2. Процес екструдування здійснюють в такому режимі:

- температура продукту на виході від 120 до 130 °С;
- навантаження основного двигуна від 50 до 65 А;
- напруга в мережі двигуна живильника від 100 до 125 В.

В шнеку екструдера встановлюють шайби діаметром 117,5 мм і 125 мм. Продуктивність екструдера складає від 250 до 300 кг/год. Розігрів екструдера і виведення його на робочий режим здійснюється із застосуванням кукурудзи, так як кукурудза екструдується без ускладнень.

Продукт, що виходить з екструдера у вигляді гранул діаметром від 10 до 15 мм, довжиною від 20 до 30 мм має спучену пористу структуру. Об'ємна маса такого продукту від 300 до 320 кг/м³; при найкращому режимі – від 120 до 200 кг/м³.

Охолодження гранул роблять в спеціальних охолоджувачах з продуванням їх шару зовнішнім повітрям до температури, що не перевищує більше ніж на 10 °С температури оточуючого середовища. При цьому можна застосовувати охолоджувачі для карбамідного концентрату (Б6-ДОБ) і скребкові транспортери, уздовж яких продувається повітря.

Подрібнення охолоджених гранул здійснюють на молоткових дробарках із застосуванням сит, що забезпечують крупність згідно зі стандартом.

Отриманий подрібнений екструдований продукт має хороші технологічні властивості: хорошу сипучість і здатність до дозування, стікає з бункерів без ускладнень, не злежується. Вологість продукту від 8 до 10 %, об'ємна маса від 580 до 600 кг/м³.

Екструдування зернових компонентів комбикормів на екструдерах КМЗ, обладнаних пропарниками. При використанні екструдерів КМЗ-2, обладнаних пропарниками, відпадає необхідність у зволоженні зерна і в два рази підвищується їх продуктивність. В цьому випадку технологічна схема передбачає подрібнення зернових, дозування і змішування з висівками,

екструдують суміші на модернізованому екструдері КМЗ-2, охолодження і подрібнення екструдованого продукту.

Модернізація екструдера полягає у виготовленні і встановленні пропарника-змішувача замість живильника. Живильник встановлюється над пропарником.

Змішувач-пропарник являє собою циліндричну камеру діаметром 200 мм і довжиною 670 мм, в якому розміщено ротор з лопатками, що обертається. Лопатки товщиною 6 мм і шириною 30 мм встановлено під кутом 45° до осі валу з кроком 50 мм і зміщенням на 90° . Привод ротора здійснюється від окремого двигуна потужністю 3 кВт, частота обертання ротора 360 хв^{-1} . Продукт, що надійшов у змішувач, переміщується уздовж нього завдяки куту встановлення лопаток.

Режим роботи пропарника: тиск пари від 0,1 до 0,3 МПа; витрати пари від 50 до 75 кг/т; температура пропареної суміші на виході з пропарника від 70 до 80 $^\circ\text{C}$, вологість пропареної суміші від 17 до 18 %.

Пропарена суміш поступає безпосередньо в прийомний патрубок шнека екструдера, режим роботи якого такий: температура продукту на виході від 120 до 130 $^\circ\text{C}$; навантаження основного двигуна від 55 до 60 А.

В шнеку екструдера встановлюють шайби діаметром 117,5 і 125 мм. Для збільшення продуктивності можна використати шайби менших розмірів – до 85 мм. Продуктивність екструдера досягає 600 кг/год.

Отриманий екструдований подрібнений продукт також має хороші технологічні властивості: хорошу сипучість і здатність до дозування, стікає з бункерів без утруднень, не злежується. Вологість продукту від 10 до 10,5 %, об'ємна маса від 530 до 550 кг/м^3 .

Якісні показники продукту, обробленого в екструдері з пропарником, вищі, ніж із зволоженням водою. При цьому вміст декстринів досягає 25 %.

Для екструдуювання зернових компонентів комбікормів у виробництві на Кузнецовському експериментальному комбікормовому заводі в робочій башті елеватора змонтовано і впроваджено промислово лінію екструдуювання зернових компонентів.

Лінія включає таке технологічне обладнання: пропарник зерна АСК-10 (одна секція), бункери над дозаторами, чотири дозатори ДДТ для дозування зернових і висівок, збірний шнек, змішувач ЗСМ-1, дробарку ДМ-440У, бункери над екструдерами, чотири екструдери КМЗ-2, збірний ланцюговий транспортер ТСЦ-25, охолоджувач спеціальної конструкції, дробарку ДМ для подрібнення екструдованого продукту.

Випробування лінії проводились при виробленні комбікормів за рецептом СК-11, в процесі яких налагоджувалась робота всього обладнання.

При дотриманні встановленого режиму зволоження зерна екструдери працювали стало і стабільно. Розігрів екструдерів до необхідної температури здійснено з використанням кукурудзи. Температура в екструдерах становила від 110 до 140 °С. Екструдований продукт розрізали ножем, що обертається на гранули, потім цей продукт надходив на транспортер і далі в охолоджувач. Охолоджувач обслуговує всі чотири екструдери. Заміри температури показали, що після охолодження і подрібнення в наддозаторний бункер надходив продукт, що мав температуру, від 5 до 8 °С вищу температури навколишнього середовища, що в межах норми. Продуктивність одного екструдера становила від 250 до 350 кг/год.

Виробництво екструдованого зерна в галузі організували як в окремих цехах, так і на лініях комбікормових заводів.

Найбільші цехи з виробництва екструдованого зерна знаходяться в м Тейково Івановської області (Росія), на Бобруйському (Білорусія), Волновахському (Україна), Вевіському (Литва) комбінатах хлібопродуктів.

На Бобруйському комбінаті хлібопродуктів екструдкування зерна організовано в колишньому цеху карбамідного концентрату. Технологія виробництва згідно з інструкціями передбачає очищення зерна від домішок на сепараторах ЗСМ-10 і в магнітних колонках, подрібнення – на дробарках А1-ДДП, екструдкування – на екструдерах КМЗ-2М, модернізованих із встановленням пропарювачів, охолодження – на охолоджувачах Б6-ДОБ. Охолоджений екструдат подрібнюється на дробарках до розміру згідно з вимогами до цього показника на комбікорми. В цеху встановлено дев'ять екструдерів, обладнаних пропарювачами за

пропозицією ВНКІП. Цех виробляє в основному екструдовану кукурудзу (табл. 1.6). Річний виробіток становить 10 тис. т.

Таблиця 1.6

Режими обробки і показники якості екструдованої кукурудзи

Продукція	Температура екструдування, °С	Продуктивність, кг/год	Навантаження основного двигуна, кВт	Вологість, %		Об'ємна маса, кг/м ³
				до екструдування	після екструдування	
Кукурудза вихідна	–	–	–	12,8	–	–
Кукурудза екструдована на:						
Екструдері № 5	9–105	450	60–65	16,0	11,2	490
Екструдері № 6	125–130	300	60–65	15,6	10,2	440
Екструдері № 7	125–130	280	55–60	16,0	10,8	300
Екструдері № 9	130–135	260	50–55	15,6	10,2	260

На Волновахському комбінаті хлібопродуктів підготовка зерна полягає у зволоженні неподрібненого зерна із застосуванням машини БУВ-10, відлежуванні протягом двох годин, подрібнення в дробарці, екструдуванні на серійних екструдерах КМЗ-2, охолодженні на Б6-ДОБ. При вивченні технології визначено, що вологість зерна після зволоження становила від 14,5 до 16 %, температура екструдування – від 120 до 135 °С. Якість продукції відповідала ТУ. Продуктивність цеху досягає 11 тисяч тон на рік.

У Хмельницькому національному університеті розроблено конструкцію екструдерів і технологію для баротермічної обробки зерна з домішками сапоніту [17–22].

У роботах багатьох вчених [23–27] показано, що додавання до кормів мінералів, багатих на мікроелементи, значно підвищує продуктивність тварин, їх приріст та зменшує захворюваність. До таких мінералів відноситься сапоніт. Цей мінерал має в своєму

складі понад 20 дуже цінних макро і мікроелементів. Навіть незначне (до 5 %) додавання сапоніту до кормів сприяє росту тварин, підвищує якість тваринницької продукції, виводить радіонукліди з їх організму, знищує хвороботворні мікроби [24; 25]. В Україні в Хмельницькій області є багаті запаси сапонінів.

Пошук в мережі Internet показав, що на сьогодні пропонується велика кількість екструдерів різних марок для виготовлення комбікормів: ХР-3, ЭКСПРО-02У, Э-100, ЭКЗ-130 тощо [28]. Як видно з описів екструдерів, їх переважна кількість потребує попередньої підготовки сировини (очищення, зволоження).

1.3. Умови роботи вузла екструдювання при переробці фуражного зерна

Переробка фуражного зерна на екструдерах є перспективним напрямком порівнянно з іншими способами (пропарювання, розмелювання тощо).

Спосіб екструдювання при виготовленні комбікормів широко застосовують у країнах світу (США, Німеччині, Франції, Канаді, Голландії тощо), де створене відповідне обладнання [2–4].

Слід зазначити, що існуючі зарубіжні конструкції екструдерів для виготовлення комбікормів вимагають спеціальної підготовки сировини по чистоті, вологості тощо.

Основним елементом екструдера є циліндр, всередині якого обертається шнек. Конструкція циліндра може містити додатковий пристрій підігріву. На виході з циліндра встановлюють дозувальний механізм, яким регулюють технологічні параметри залежно від складу сировини. Привід екструдера являє собою переважно електродвигун необхідної потужності з муфтою і редуктором. Екструдер обладнаний пристроями контролю температури і тиску в середині циліндра, а також швидкості обертання вала.

В процесі переробки сировина (зерно, відходи зернового виробництва, мінерали і домішки) переміщується в осьовому напрямку по гвинтовому каналу черв'яка, ущільнюється, змішується, розмелюється, гомогенізується і продавлюється крізь філь'єри.

Надійність і довговічність екструдерів визначає надійність і довговічність його вузлів, зокрема вузла екструдування. Екструдери для переробки фуражного зерна і відходів зернопереробного виробництва (насіння трав, жмих, лушпиння) з домішками мінералів працюють в складних умовах, а саме: при підвищених температурах 140–160 °С; в агресивно-абразивному середовищі; при високих питомих навантаженнях на поверхні тертя до 10 МПа (рис. 1.4) [129]. Підвищені температури виникають у результаті екструзії та інтрузії матеріалів всередині вузла екструдування. При цьому всередині вузла екструдування виникає агресивне середовище відносно матеріалів деталей екструдера в результаті утворення пари та піролізу зерна та його відходів.

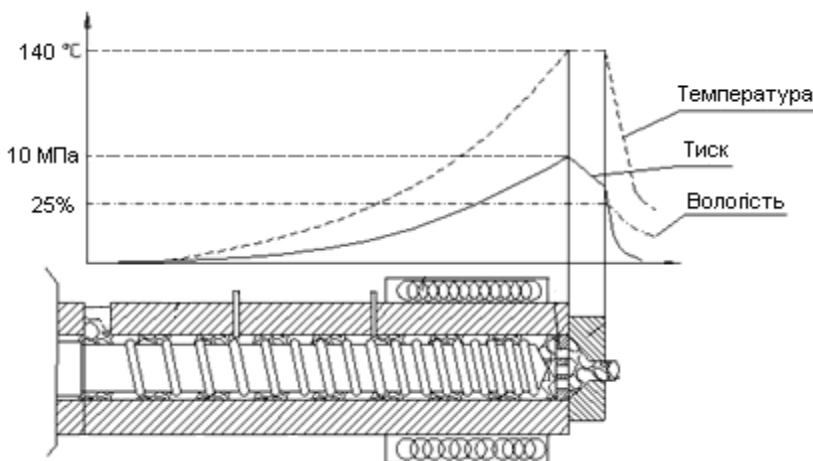


Рис. 1.4. Розподіл температури тиску і вологості по довжині циліндра

У випадках, коли фуражне зерно не піддається спеціальній попередній підготовці (очищення, пропарювання, зволоження), як це пропонується для зарубіжних екструдерів, сировина містить пил, пісок та інші абразивні частинки.

Додавання мінералу сапоніту та інших мінералів, в складі яких є значна частина піску, створює абразивне середовище. Експлуатація деталей машин у такому середовищі викликає інтенсивне зношування шнека і циліндра вузла екструдування. Велика інтенсивність зношування обумовлюється як корозійно-

окислювальним зношуванням від дії агресивної складової середовища, так і абразивним зношуванням від дії абразивної складової середовища. Характерні види пошкодження деталей вузла екструдуювання за подібних умов роботи це: задири, подряпини, тріщини, об'ємний знос, корозія.

При роботі екструдера однією з визначальних умов стабільної роботи є збереження радіального зазору між гребенями витків шнека і внутрішньою поверхнею циліндра, в межах заданого допуску. Збільшення зазору призводить до різкого зменшення продуктивності машини, погіршення якості продукції, збільшення затрат на виробництво [29–32].

Процес абразивного зношування однозначно залежить від виду руйнування поверхневого шару і знеміцнення матеріалу [33]. В процесі зношування можливе і підвищення міцності (наклеп) матеріалу, яке в більшості випадків не призводить до якісної зміни процесу зношування (не змінюється вид руйнування), а впливає тільки на інтенсивність руйнування матеріалу.

Розрізняють чотири основних види знеміцнення матеріалу при терті: механічне, теплове, адсорбційне і хімічне.

Механічне знеміцнення відбувається в результаті деформації поверхневого шару, що призводить до виникнення і розвитку дефектів структури, окрихчування матеріалу, підвищення внутрішніх напружень тощо.

Теплове знеміцнення матеріалу відбувається під дією генерованого при терті тепла (наприклад, відпуск сталі, розм'якшення полімерів).

Адсорбційне знеміцнення є результатом фізичної взаємодії матеріалу з поверхнево-активними речовинами, що викликає зниження твердості і роботи диспергування [35].

Хімічне знеміцнення характеризується утворенням продуктів хімічної взаємодії зношуваного матеріалу із зовнішнім середовищем або протіканням розслаблюючих матеріал внутрішніх хімічних і механо-хімічних процесів, зокрема, в полімерних матеріалах [35, 36]. У реальних умовах тертя можливі поєднання різних видів знеміцнення: фізико-хімічне, механо-хімічне та ін.

При заданих умовах роботи в цьому матеріалі триває певний процес зношування, але в різних матеріалах процеси зношування можуть різнитися. Зміна умов роботи в деяких межах не супроводжується зміною процесу зношування, а впливає тільки

на його інтенсивність. Зношування є самоналагоджувальним процесом, залежить від зовнішніх умов і властивостей зношуваного матеріалу.

У широкому діапазоні умов абразивного зношування різних матеріалів абразивні частинки можуть викликати різні види руйнування поверхневого шару: крихке, в'язке, полідеформаційне і втомне.

Крихке і в'язке руйнування (мікрорізанія) відбуваються при одноразовій дії абразивного зерна.

Полідеформаційне і втомне руйнування відбуваються при циклічному деформуванні матеріалу абразивними зернами з відповідно в пластичній та пружній ділянках [37–42].

З позицій дислокаційної теорії розділення крихкого та в'язкого руйнувань має умовний характер, так як в обох випадках відбуваються рух дислокацій, що не дозволяє говорити про відсутність залишкових деформацій, що передують крихкому руйнуванню [43]. Але практично при діагностиці виду поверхневого руйнування використовують відносно грубі зовнішні ознаки, що дозволяють однозначно кваліфікувати типове в'язке руйнування з явними слідами пластичного деформування матеріалу. Приклади в'язкого та крихкого руйнувань матеріалів при впливі на поверхневий шар абразивних часток показано на рис. 1.5, *а* та *б* [43].



Рис. 1.5. Сліди в'язкого руйнування поверхневого шару сталюго зразка під дією гострих и твердих абразивних зерен X 10 (*а*) і крихке руйнування поверхневого шару скла при uszkodженні абразивною частинкою X 8 (*б*)

Руйнування матеріалу при контактному пластичному деформуванні абразивними частинками пов'язане з виникненням і розвитком внутрішніх пошкоджень, зростанням концентрації напружень і утворенням мікротріщин, поступовим їх об'єднанням, що завершуються відділенням мікрооб'ємів матеріалу.

Характерні особливості втомного процесу руйнування матеріалу в об'ємі – наявність латентного періоду, залежність числа циклів до руйнування від рівня діючих напружень, чутливість до навколишнього середовища та ін. Ці чинники тією чи іншою мірою властиві й контактній циклічній дії абразивних частинок, але повної аналогії між об'ємною і контактною втомою все ж немає. При деформуванні поверхневого шару матеріалу абразивними частинками порівняно великою є ступінь концентрації контактних напружень, відбувається безперервний їх перерозподіл внаслідок множинності та незалежності контактів. Крім того, є особливості, зумовлені масштабним ефектом і набагато більш сильною дією на матеріал зовнішнього середовища в умовах контактного деформування.

У багатьох випадках встановлено пряму чи близьку до неї залежність зносостійкості металів і сплавів від їх твердості [44–49]. Невід'ємною частиною процесу руйнування поверхні тертя при абразивному зношуванні є проникнення в неї твердої частинки. Глибина проникнення визначається, як правило твердістю матеріалу. Але не завжди зносостійкість визначається твердістю [50, 51], оскільки при одній твердості може бути різна зносостійкість [45, 52, 53].

Академік П. А. Ребіндер розглядав зношування матеріалів як поверхневе диспергування в результаті багаторазової пластичної деформації, що призводить до зміцнення та втомного руйнування мікрооб'ємів матеріалу [35]. Процес руйнування можна інтенсифікувати в результаті фізичної (адсорбційної) або фізико-хімічної знеміцнювальної дії середовища.

Професор І. В. Крагельський запропонував кількісну теорію зношування твердих тіл з урахуванням втомної природи поверхневого руйнування, яку загалом можна застосовувати і для абразивного зношування [54, 55].

Автор роботи [56] серед факторів, які визначають зносостійкість, виділив наступні: твердість, наклеп, пластичність та в'язкість руйнування зношуваного матеріалу.

Процеси абразивного зношування підрозділяємо на прості, змішані та складні.

Прості процеси зношування характеризуються переважанням руйнування матеріалу якогось одного виду. Знеміцнення поверхневого шару при простих процесах зношування не відбувається. Є чотири простих процеси абразивного зношування по числу видів руйнування. Два з них відбуваються при мікрорізанні, зокрема тертям зразків матеріалів за абразивної поверхні з твердими і гострими зернами.

Змішані процеси зношування характеризуються одночасною дією декількох (зазвичай двох) видів руйнування; тут, як і у простих процесах, знеміцнення матеріалу не відіграє помітної ролі. Змішаних процесів абразивного зношування небагато. Одночасно протікають найчастіше процеси прямого і полідеформаційного руйнувань, прямого і втомного руйнувань.

Складні процеси зношування відрізняються від простих і змішаних істотним знеміцненням матеріалу, що визначає характер та інтенсивність руйнування поверхневого шару. В результаті знеміцнення того чи іншого виду опір матеріалу механічній дії абразивних частинок знижується і на окремих ділянках поверхні руйнуються мікроб'єми знеміцненого матеріалу. Число складних процесів зношування при цьому дуже велике у зв'язку з різноманітністю процесів знеміцнення.

У процесах зношування розкривається загальний характер реакції матеріалу на спільний вплив абразивних часток і навколишнього середовища, при цьому в заданих умовах тертя при зношуванні даного матеріалу триває один цілком визначений процес руйнування [43].

1.4. Відомі методи підвищення зносостійкості вузла екструдуювання

Технологія виготовлення комбикормів з використанням екструдуювання передбачає температуру в матеріальному циліндрі 140–160 °С. Ця температура активізує процес зношування при терті. Високий тиск до 10 МПа в зоні гомогенізації обумовлює високі контактні напруження при контактуванні абразивних частинок з матеріалом шнека і циліндра, які досягають значень границі пластичності матеріалів. Тому в таких випадках для

забезпечення високої зносостійкості поверхня тертя повинна мати високу твердість і стійкість до корозії.

На сьогодні є більше сотні різних технологій зміцнення поверхні деталей машин із застосуванням методів термічної і хіміко-термічної обробки, поверхневої пластичної деформації, наплавки, осадження покриття термомеханічним способом, фізичного хімічного осадження в вакуумі, електрофізичних методів з застосуванням гальваніки та електроіскрового легування поверхні, зміцнення з застосуванням висококонцентрованих джерел енергії, зокрема лазерів, електричних розрядів, електромагнітних і магнітних полів.

Проводиться велика робота щодо створення матеріалів [57–61] на основі сталей, чавунів, кобальтових, нікелевих, мідних та інших сплавів з різними легуючими добавками хрому, марганцю, титану, ванадію, ніобію, молібдену та рідкоземельних металів [62].

Технології, які застосовуються для зміцнення поверхні деталей робочих органів екструдерів, повинні забезпечувати певні вимоги щодо товщини зміцнюваної поверхні та ресурсу роботи обладнання, а саме [63]: зміцнена поверхня повинна мати товщину не меншу, запасу на знос (для черв'яків до 0,5 мм і більше, для циліндрів від 1,0 до 2,0 мм) для забезпечення заданого ресурсу роботи обладнання від 10 до 15 тис. год.

На вибір методу зміцнення також впливають такі фактори, як призначення машини, різноманітність форм і розмірів шнеків та циліндрів, мала серійність виробництва екструдерів. З огляду на це перевагу слід надавати таким методам зміцнення, які є універсальними [66, 68].

Є ряд методів зміцнення поверхні, що дозволяють змінювати структуру, фізико-механічні властивості, хімічний і фазовий склад, напружений стан поверхневих шарів деталей [66–85]. Розглянемо більш докладно традиційні методи підвищення зносостійкості деталей машин.

Поверхнєве пластичне деформування (ППД) застосовується для фінішної обробки циліндрів, гільз, дорнів для досягнення високого класу шорсткості та формування на поверхні залишкових напружень стиску, які підвищують експлуатаційні властивості виробів [67, 76, 86, 106]. ППД дозволяє підвищити зносостійкість обладнання лише при переробці ненаповнених абразивом вихідних матеріалів. Опір абразивному зношуванню при

збільшенні твердості методом ППД знижується [87], тому його не можна рекомендувати для зміцнення деталей при переробці фуражного зерна з абразивними матеріалами. Суттєвий недолік технології – те, що товщина зміцненого шару при ППД невелика.

Наплавка отримала широке застосування, як метод, що дозволяє отримати біметалеві деталі [88].

Одним з її видів є пічна відцентрова наплавка. Заготовку циліндра у вигляді труби з попередньо засипаним наплавочним порошком і завареними торцевими отворами встановлюють у печі. Заготовку розігрівають до температури, яка перевищує температуру плавлення порошку на 50 °С. Після цього трубу за допомогою маніпулятора з печі переставляють на ролики, які обертаються. Відцентрова сила рівномірно розподіляє розплав по внутрішній поверхні заготовки. Після кристалізації розплавленого шару обертання припиняють і деталь охолоджується. Недоліки: для цього методу потрібна великогабаритна високотемпературна піч; ускладненість контролю процесів наплавки і товщини наплавленого шару; складні умови роботи працівників.

Індукційний метод наплавки є більш досконалим тому, що дозволяє значно прискорити процес наплавки і дає можливість контролювати структуру наплавленого шару. Технологія полягає в нагріві індуктором циліндричної заготовки (чи її частини) з попередньо завантаженим в середину порошком. Наплавлений шар формується під дією відцентрових сил при обертанні розігрітої деталі [89].

Відомі також технології плазмової відцентрової наплавки [90] і наплавки неплавким електродом [91], але вони не рекомендуються при зміцненні шнеків і циліндрів екструдерів через обмеження по довжині та діаметру виробів, а також через складність і високу ціну технології.

Термічна обробка (гартування) деталей являє собою нагрів деталей до певної температури з подальшим охолодженням з отриманням структур мартенсит, бейніт, тростит та інших. У багатьох випадках структура мартенсит має найбільшу зносостійкість. З огляду на це для досягнення високої зносостійкості залізовуглецевих сплавів необхідно деталі піддавати гартуванню на максимальну твердість [42, 92–95, 106].

Гартування довгомірних деталей вузла пластикації (шнеків, циліндрів) не рекомендується через те, що:

– технологія не забезпечує високої і рівномірної твердості по всій довжині деталей;

– при гартуванні можливе значне деформування довгомірних деталей з викривленням поздовжньої осі, що недопустимо при заданих допусках на зазор між шнеком і циліндром;

– при абразивному зношуванні зносостійкість є досить мала.

Через ці недоліками гартування не забезпечує високої експлуатаційної якості довгомірних деталей, тому термін служби пари шнек-циліндр екструдерів досить малий [82].

Як показали дослідження [40, 53, 96–100], сталі та сплави з структурою на основі залишкового аустеніту добре працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування. Таку структуру можна отримати при гартуванні заевтектоїдних сплавів при температурі, яка значно перевищує A_{c1} [101]. Сплави з структурою аустеніту в деяких випадках можна використати як зносостійкі матеріали.

Гартування з допомогою лазерного променя дозволяє усунути деформації довгомірних деталей порівнянно з об'ємним гартуванням і підвищити твердість поверхні за рахунок утворення мілкодисперсних структур, при швидкому охолодженні. Але цей метод малопродуктивний, дорогий і забезпечує малу товщину (до 0,1 мм) зміцненого шару [83].

Хіміко-термічна обробка (ХТО) є ефективним способом підвищення зносостійкості робочих органів екструдерів за рахунок зміни хімічного і фазового складу поверхні, підвищення її твердості, створення залишкових напружень стиску [71, 72, 74–77]. При хіміко-термічній обробці поверхня металу насичується методом дифузії хімічними елементами: вуглецем, бором, азотом, киснем тощо з утворенням хімічних з'єднань цих елементів з металом (карбідів, нітридів, боридів, оксидів) та зоною твердих розчинів цих елементів. У результаті одержуємо на поверхні покриття значної товщини і високої твердості.

Борування використовують для підвищення стійкості до спрацювання виробів, що експлуатуються при підвищених температурах і в агресивних середовищах. Насичення поверхні бором й утворення боридів відбувається при нагріванні виробів до температури 900–1100 °С [72] у середовищах, які містять бор (2–5

год), або при електролізному боруванні в розплаві. Товщина боридного шару становить 0,05–0,4 мм, твердість досягає 2000 HV [102–106]. Борування застосовують [107] для підвищення зносостійкості втулок грязьових нафтових насосів, штампів, шнеків екструдерів і ливарних машин тощо. Стійкість таких деталей після борування зростає у 2–10 разів.

Широкого застосування для зміцнення шнеків і циліндрів екструдерів борування не має в зв'язку з рядом недоліків: 1) борований шар має підвищену крихкість, що в багатьох випадках приводить до його сколювання і розтріскування в процесі експлуатації; 2) при боруванні довгих деталей типу шнеків екструдерів трапляються значні деформації осі деталі, що є недопустимим в зв'язку з можливим заїданням шнека і циліндра [108–110].

Дифузійне хромування є однією з ефективних технологій підвищення зносостійкості деталей машин [74, 102–105], яка забезпечує високу твердість (до 1500 HV) і товщину дифузійного шару (до 0,3 мм). Хромування сталевих деталей здійснюють при температурі 900–1400 °С в порошковому, рідкому або газовому середовищах, що містять хром. Тривалість процесу насичення становить 5–12 год. Хромовані сталеві деталі мають підвищену окалинотійкість до температури 800 °С, високу корозійну стійкість, а при концентрації хрому в поверхневому шарі 0,3–0,4 % – підвищену твердість та зносостійкість. Хромують різні сталеві деталі та інструменти: клапани, вентилі, патрубки, штампи для холодного штампування тощо. Хромуванню можна піддавати деталі, виготовлені з будь-яких сталей. В основному технологію хромування в машинах екструдерах і термопластах застосовують для зміцнення формуючого обладнання і ріжучого інструменту. Для зміцнення шнеків і циліндрів екструдерів застосовують цю технологію рідко через невелику товщину покриття та можливе деформування осі довгомірних деталей (шнеків, циліндрів).

Дифузійне цинкування – процес, що полягає в насиченні поверхні сталі цинком при температурах 300–550 і 700–1000 °С у відповідному середовищі. Його використовують для підвищення корозійної стійкості сталі на повітрі, в бензині, маслах і гарячих газах (300–500 °С), що містять сірководень. Цинкове покриття нестійке в кислотах та лугах, тому для екструдерів не рекомендується [102–104, 112].

Силіціювання – дифузійне насичення кремнієм поверхневих шарів виробів, його виконують при температурі 950–1100 °С у відповідних середовищах. Тривалість витримки становить 2–12 год. Товщина дифузійного шару лежить у межах 0,15–0,8 мм. Він має підвищену стійкість до корозії в морській воді та кислотах, а також підвищену зносостійкість при відносно невеликій твердості (200–250 HV) [102–106, 112].

Алітування – підвищення жаростійкості та корозійної стійкості поверхні деталей зі сталі та чавуну (деталі газогенераторних машин, цементацийних ящиків, чохла термопар, лопаті газотурбінних двигунів тощо). Насичення поверхні алюмінієм виконують при температурі 950–1050 °С протягом 3–12 год., внаслідок чого утворюється шар завглибшки 0,1–1 мм. Основна його структура – твердий розчин алюмінію в залізі; на поверхні можливі утворення інтерметалідних фаз: Fe_3Al , $FeAl$, $FeAl_2$, Fe_2Al_5 . Алітований шар має добру опірність корозії на повітрі і у морській воді. Твердість алітованого шару – до 500 HV, зносостійкість низька [102–106].

Сульфідкування залізовуглецевих сплавів – це насичення поверхні виробів сіркою. Його здійснюють у сульфуризаторах, що містять хлористий калій, сульфат натрію, тіосульфат натрію, ціанистий натрій, карбамід та ін.; тому поверхня виробів одночасно насичується вуглецем й азотом. У зв'язку з цим такий процес називають сульфоціануванням. Після сульфідкування підвищується зносостійкість виробів; поліпшується адсорбція мастила на поверхнях деталей, які працюють в умовах мащення; запобігається схоплювання і задирки під час різання; поліпшується припрацювання деталей при терті. З огляду на це сульфідуванню піддають високоточні деталі, що працюють в умовах тертя (наприклад, компресійні та маслоснімні кільця двигунів внутрішнього згоряння) [104–106, 112].

Цементация – процес насичення маловуглецевих сталей (0,1–0,25 %С) вуглецем при температурі 900–1000 °С з подальшим гартуванням [55] з метою отримання високої твердості поверхні HV до 8000 МПа і глибини зміцненого шару до 2000 мкм, при цьому в'язка серцевина зберігається [104–106, 112]. Цементацию в основному застосовують для підвищення зносостійкості деталей машин, що працюють в умовах тертя, наприклад, зубчастих коліс, кулачків, розподільних валиків, поршневих пальців, штовхачів

клапанів, шийок колінчастих валів, черв'яків, робочих поверхонь вимірювальних інструментів тощо. Цементують також деталі, які під час роботи витримують високий опір динамічним навантаженням й одночасно працюють на стирання та удар. Цементациї піддають в основному деталі, виготовлені з низьковуглецевих сталей марок 10, 15, 20. Коли ж потрібно забезпечити міцнішу серцевину та стійку до спрацювання поверхню, для виготовлення деталей використовують леговані цементовані сталі з вмістом вуглецю 0,12–0,32 %.

Для зміцнення шнеків і циліндрів екструдерів цементация не рекомендується в зв'язку з невисокою порівняно з іншими видами ХТО твердістю поверхні та значними деформаціями деталей.

Ціануванням і нітроцементациєю сталі називають одночасне насичення поверхневих шарів деталей вуглецем та азотом. Такі дифузійні шари мають високі твердість й опірність спрацюванню, підвищену міцність від утомленості та корозійну стійкість. Спільна дифузія вуглецю й азоту відбувається значно швидше, ніж кожного з них окремо, тому тривалість процесу скорочується (до 0,5–2 год.). Крім того, процес ціанування супроводжується значно меншими деформаціями деталей складної форми. Ціануванню піддають деталі, виготовлені з конструкційних вуглецевих і легованих сталей, а також інструменти, виконані зі швидкорізальних сталей.

Ціанування здійснюють у рідкому або твердому насичуючому середовищі. Залежно від температури нагрівання деталей при обробці розрізняють низькотемпературне (540–560 °С), середньотемпературне (820–860 °С) та високотемпературне (920–960 °С) ціанування. За підвищених температур поверхня деталей насичується більше вуглецем, ніж азотом, тобто процес швидше наближається до цементациї [102–106, 112].

Суттєвим недоліком ціанування сталі є отруйність ціаністих солей і висока вартість процесу.

Азотування відноситься до числа найбільш ефективних методів підвищення поверхневої твердості, міцності, зносостійкості та корозійної стійкості деталей машин. Його широко застосовується в сучасному виробництві.

На сьогодні значно розширився асортимент оброблюваних матеріалів. Крім азотування різних сталей, в останні роки цей метод застосовують для зміцнення спеціальних металокерамічних сплавів і тупоплавких металів.

Традиційне *пічне азотування* частіше проводять при 500–600 °С (низькотемпературне азотування) в середовищі аміаку тривалістю до 72 год. Азотуванню підлягають будь-які сталі перлітного, феритного і аустенітного класів, а також чавуни. В останні роки все ширше застосовують високотемпературне азотування (600–800 °С) феритних і аустенітних сталей та тугоплавких металів (Ti, Mo, Nb, V та ін.) [71, 72]. При застосуванні цієї технології можливе жолоблення довгомірних деталей і не завжди забезпечується висока якість поверхневого зміцненого шару. При азотуванні в середовищі аміаку відбувається насичення металу воднем, що викликає окрихчення поверхні та зменшення об'ємної міцності металу.

Конкретні умови експлуатації вимагають створення дифузійного шару з розвитком тих чи інших фазових і структурних складових, які визначають працездатність виробів в режимі корозії, зношування, знакозмінних навантажень та ін.

Порівнянно з традиційним пічним азотуванням, *азотування в тліючому розряді (іонне азотування)* у безводневих насичуючих середовищах є більш прогресивним [71, 75, 76, 85, 111, 113]. Процес відбувається у суміші азоту з аргоном при різних співвідношеннях цих компонентів. Технологія дозволяє прискорити процес в 5–10 разів при скороченні витрат електроенергії в 10 разів, а газів на два порядки. Технологічні параметри, які контролюються при цьому: температура дифузійного насичення, тиск у вакуумній камері, склад насичуючого середовища і часу дифузійного насичення. Технологія дозволяє керувати твердістю, фазовим складом, товщиною азотованого шару і залишковими напруженнями стиску в поверхневому шарі в широких межах [76]. Це дозволяє забезпечити властивості зміцненого шару максимальної зносостійкості в конкретних умовах експлуатації. Іонне азотування дозволяє зміцнювати всі марки сталей, титан і його сплави, чавуни, при цьому водневе окрихчення металів виключене [76, 85]. Технологія іонного азотування є екологічно чистою в порівнянні з пічним азотуванням [114].

Таким чином, аналіз способів зміцнення поверхні деталей машин за різними технологіями показав, що найбільш перспективними технологіями для підвищення зносостійкості деталей матеріального циліндра екструдерів для переробки фуражного зерна є цементація, гартування та азотування в тліючому розряді, які будуть досліджуватись в даній роботі.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Установки для проведення експериментів

Надійність і довговічність екструдерів визначає надійність і довговічність його вузлів, зокрема вузла екструдування. Екструдери для переробки фуражного зерна працюють у складних умовах, а саме: при підвищених температурах (420–433 °К); агресивно-абразивному середовищі; високих питомих навантажень на поверхні тертя (до 10 МПа). Підвищені температури виникають у результаті екструзії та інтрузії матеріалів всередині вузла екструдування. При цьому всередині вузла екструдування виникає агресивне середовище відносно матеріалів деталей екструдера в результаті утворення водяної пари та піролізу зерна і його відходів. Додавання мінералу сапоніту [25, 115] і наявність пилу в зерні та його відходах (насіння трав, лушпиння гречки, жмих тощо) створює абразивне середовище. Експлуатація деталей машин у такому середовищі викликає інтенсивне зношування шнека і циліндра вузла екструдування. Велика інтенсивність зношування обумовлюється як корозійно-окислювальним зношуванням від дії агресивної складової середовища, так і абразивним зношуванням від дії абразивної складової середовища.

Вузол екструдування екструдера, основними деталями якого є шнек і циліндр, характеризується різними умовами роботи на поверхнях цих деталей. Поверхні впадин і бокових сторін витків контактують тільки з сировиною. На гребенях витків умови роботи можуть бути іншими. Деформації шнека під дією осьових зусиль та його перекоси при несоосності шнека і циліндра в зв'язку з неточністю виготовлення вузла екструдування може викликати безпосередній контакт поверхонь цих деталей. При попаданні абразивних частинок в зазор між гребенями шнека і циліндром відбувається інтенсивне зношування поверхонь тертя.

Для моделювання умов роботи вузла екструдування ми застосовували два типи установок тертя, конструкції та принципи роботи яких наведено далі.

На рис. 2.1 подано загальний вид установки [116, 127], що моделювала умови роботи поверхонь тертя шнека і циліндра при контактуванні тільки з сировиною.

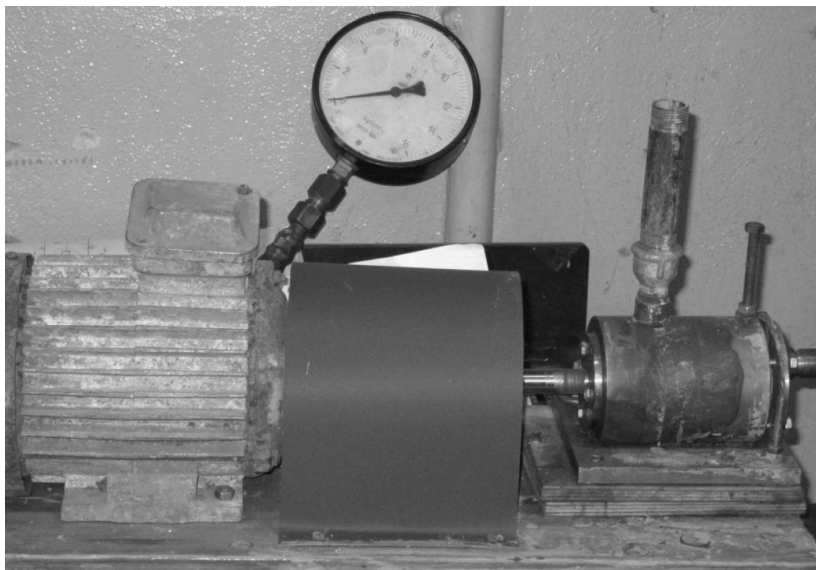


Рис. 2.1. Фотографія установки

На рис. 2.2 наведено конструктивну схему цієї установки, в якій рух від електродвигуна 22 (частота обертання 920 хв^{-1}) через муфту 21 передається на черв'ячний вал 2, на кінці якого закріплено рухомі зразки 8. Вал опирається на підшипники ковзання 11–12 з антифрикційного матеріалу, що розміщені в корпусі 1, в якому кріпляться нерухомі зразки 9. Модельний розчин подається з ємкості 4 в зону завантаження до черв'яка, який при обертанні подає в зазор між рухомими і нерухомими зразками і по замкнутому каналу подається в зону завантаження. Величина тиску модельної рідини регулюється гвинтом 18, який частково перекриває канал відтоку. Величина тиску вимірюється манометром 19.

Досліджувані зразки, що являють собою рухомі та нерухомі кільця товщиною 5 мм (рис. 2.3), виготовляють з різних матеріалів і зміцнюють за різними технологіями (табл. 2.1). Діаметри

поверхонь тертя кілець ми вимірювали в двох взаємно перпендикулярних площинах на мікроскопі ІМЦ 100×50А з точністю до 1 мкм через кожні 30 хвилин випробувань.

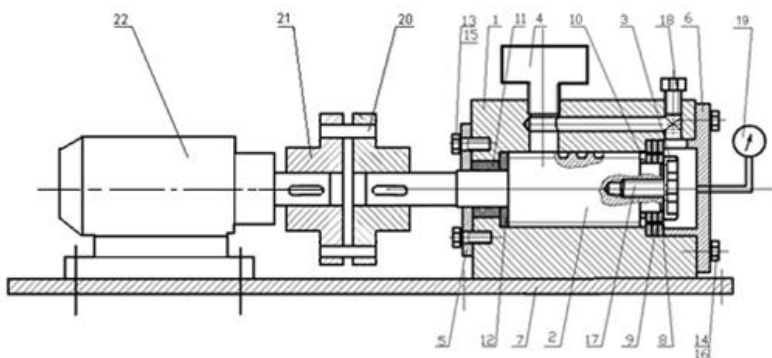


Рис. 2.2. Схема установки:

- 1 – корпус; 2 – вал з нарізаними на ньому витками черв'яка;
 3 – шайба фіксації зразків; 4 – сміксть з модельним розчином;
 5–6 – кришки корпусу; 7 – основа; 8–9– зразки;
 10 – втулка; 11–12 – втулки з антифрикційного матеріалу,
 13–14 – гвинти кріплення кришок; 15–16 – шайби; 17 – гвинт
 фіксації зразків; 18 – гвинт регулювання тиску середовища;
 19 – манометр; 20 – штифт муфти; 21 – муфта; 22 – двигун

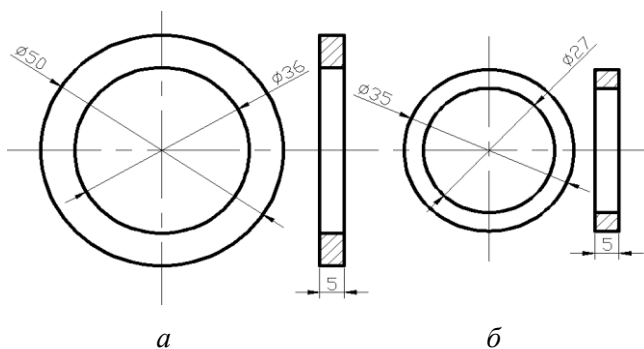


Рис. 2.3. Зразки: а) зовнішнє кільце; б) внутрішнє кільце

Для моделювання умов роботи, коли гребні шнека контактують з поверхнею циліндра, було застосовано установку [127], показано на рис. 2.4.

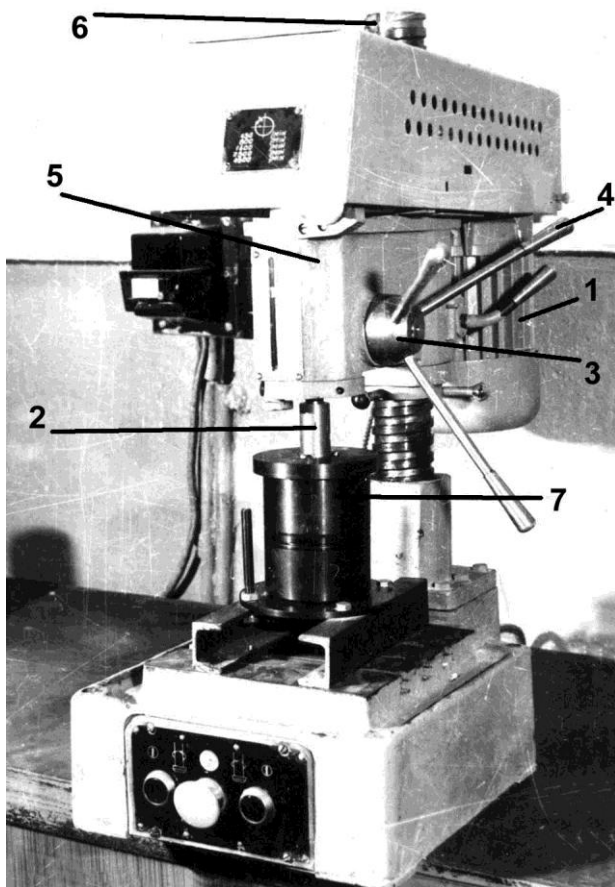


Рис. 2.4. Загальний вид експериментальної установки для випробувань на зношування на базі свердлувального верстата:
1 – електродвигун; 2 – шпиндель; 3 – вал-шестерня і маточина для переміщення шпинделя; 4 – держак; 5 – шпиндельна бабка верстата; 6 – колона для переміщення шпиндельної бабки; 7 – вузол тертя

Конструкцію вузла тертя експериментальної установки наведено на рис. 2.5.

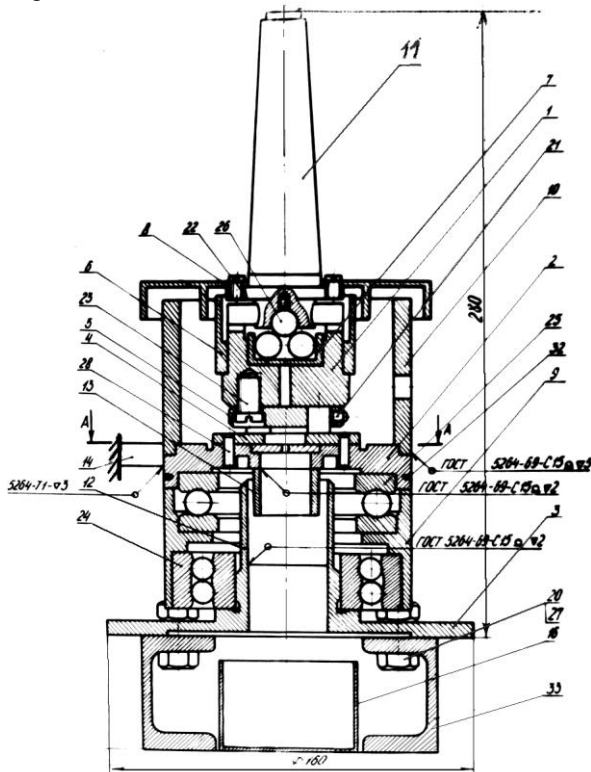


Рис. 2.5. Конструкція вузла тертя експериментальної установки:

- 1 – оправка; 2 – основа верхнього корпусу; 3 – основа;
- 4 – контргіло; 5 – державка; 6 – кожух; 7 – тарілка; 8 – кришка;
- 9 – нижній корпус; 10 – верхній корпус; 11 – хвостовик;
- 12 – патрубок основи; 13 – патрубок верхнього корпусу;
- 14 – пружний елемент з тензодатчиком; 16 – ємність для рідини;
- 20, 27 – болт, гайка; 21–23 – гвинти; 24 – сферичний підшипник;
- 25 – упорний підшипник; 26 – кульки; 28 – штифт; 32 – тросик;
- 33 – швелер

Установка має вузол тертя, що приводиться в рух свердильним верстатом. Шпindelь верстата з'єднується з вузлом тертя за допомогою конуса Морзе № 2. Вузол тертя, конструкцію

якого показано на рис. 2.5, є універсальним і його можна застосовувати при випробуваннях як на тертя кочення, так і на тертя ковзання в різних середовищах, змінюючи при цьому лише пару тертя та метод кріплення зразка. Зміною форми і розмірів зразків можна змінювати коефіцієнт перекриття та характер контакту в парі тертя. Досліджувані зразки кріпляться за допомогою різних пристроїв (планшайб, гвинтів, шпильок, шпонок тощо) до оправки 1. Обертовий рух та осьове навантаження передається оправці конусним хвостовиком 11. Для усунення можливого перекосу осей шпинделя і оправки та забезпечення рівномірного навантаження на поверхню тертя осьове зусилля від хвостовика 11 до оправки 1 передається через кульки 26. Контртіло 4 кріпиться штифтами 28 до основи 2 верхнього корпусу 10, який опирається на упорний підшипник 25, що встановлюється в нижньому корпусі 9. Верхній корпус може обертатися відносно вертикальної осі, тоді як нижній корпус не обертається. Сферичний підшипник 24 дозволяє ліквідувати можливу несоосність осей корпусів і шпинделя. Тросиком 32, що розміщується в канавці основи 2, прикріплюється до нерухомої пластинки 14, забезпечуючи кутову фіксацію верхнього корпусу 10.

На рис. 2.6 наведено схему кріплення і конструкцію досліджуваного зразка 2, що закріплюється шпонкою 5 в оправці 1.

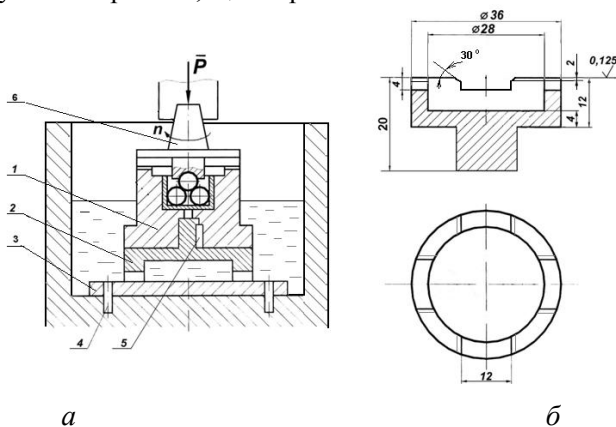
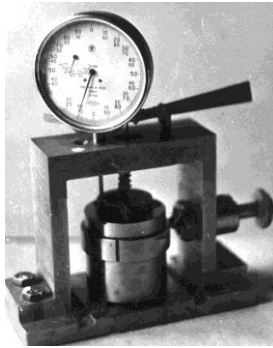


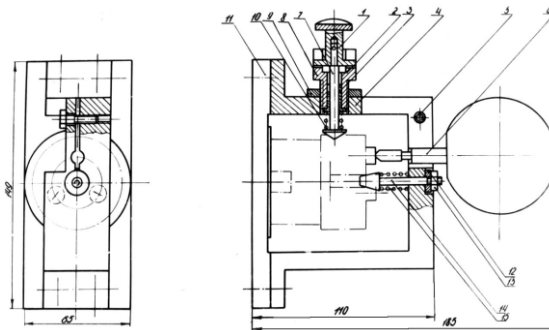
Рис. 2.6. Схема кріплення (а) та конструкція зразка (б) при випробуваннях на тертя ковзання: 1 – оправка; 2 – зразок, що досліджується; 3 – контртіло; 4 – штифт; 5 – шпонка;

б – хвостовик

Модельний розчин подається в зону контакту. Конструкція зразка передбачає наявність пазів на поверхні тертя, що забезпечує різний коефіцієнт перекриття. На кромках пазів є фаски, що утворюють кут 30° з контртілом 3 і забезпечують проникнення модельного розчину в зону контакту. Частота обертання зразка 180 хв^{-1} . Оправка з закріпленим зразком знімається через кожні 15 хв випробувань для вимірювання зносу на спеціальному пристрої (рис. 2.7) з точністю 1 мкм.



а



б

Рис. 2.7. Пристрій для вимірювання зносу:

а) загальний вид; б) конструкція;

- 1 – рукоятка; 2 – упор; 3 – направляюча втулка; 4 – корпус;
- 5 – гвинт; 6 – вимірювальна головка; 7 – фіксатор кутових переміщень; 8 – корпус фіксатора; 9 – контргайка; 10 – пружина

фіксатора; 11 – основа; 12, 13 – гайка і шайба; 14 – осьовий фіксатор; 15 – пружина осьового фіксатора

Для зміцнення поверхні зразків азотуванням в тліючому розряді використовувалась експериментальна установка “УАТР-1”, загальний вигляд якої показано на рис. 2.8. Цю установку розробив і виготовив колектив Хмельницького національного університету під загальним керівництвом професора Каплуна В. Г. Принципову схему установки показано на рис. 2.9.

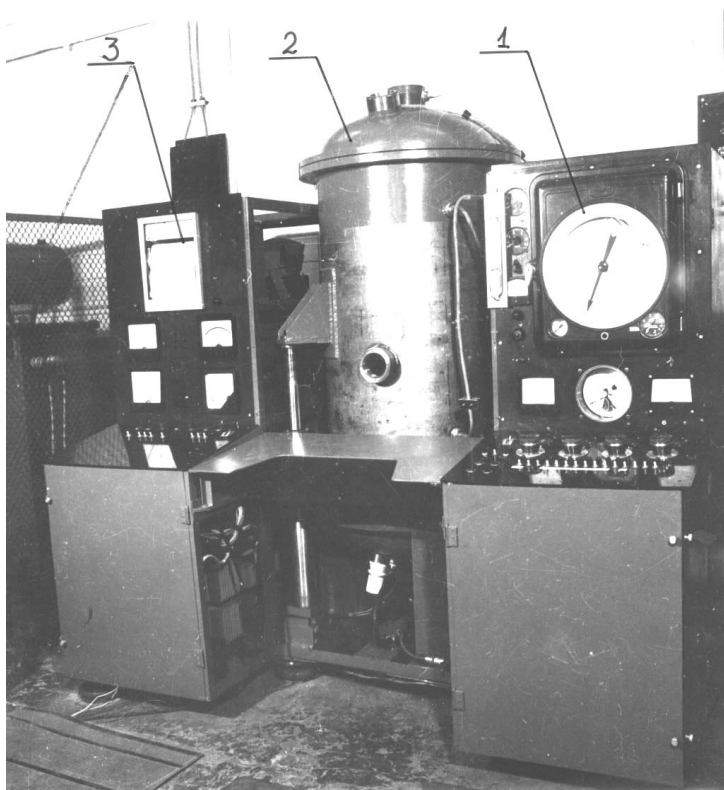


Рис. 2.8. Установка для хіміко-термічної обробки матеріалів у тліючому розряді “УАТР-1”:

1 – блок вакуумування і газоприготування з контрольно-вимірювальними приладами; 2– вакуумна камера; 3 – блок електрозабезпечення з відповідними контрольно-вимірювальними приладами

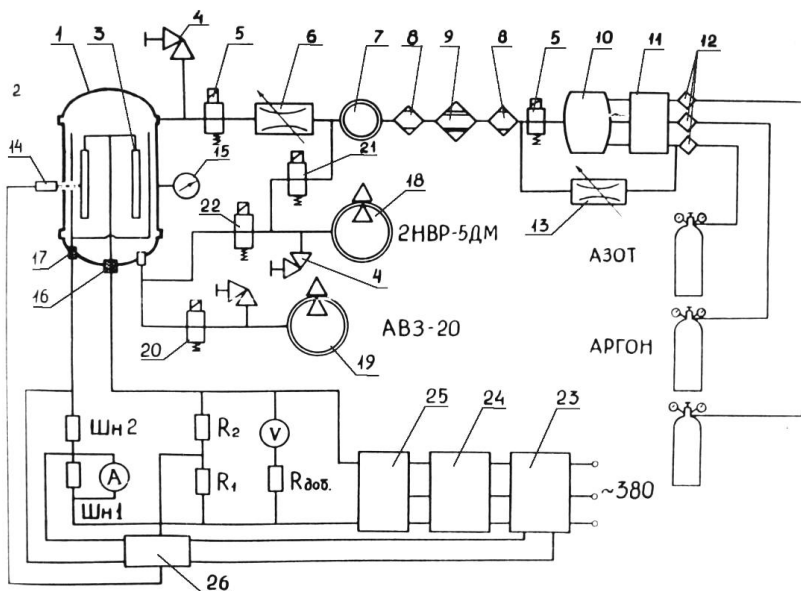


Рис. 2.9. Принципова схема експериментальної установки "УАТР-1":

- 1 – вакуумна камера; 2 – анод; 3 – катод; 4 – натікач; 5, 20, 21, 22 – електромагнітні вакуумні клапани; 6, 13 – дросель; 7 – витратомір; 8 – вологовідділювач; 9 – кисневий уловлювач; 10 – змішувач газів; 11 – дозатор; 12 – фільтри; 14 – датчик температури; 15 – вакуумметр; 16 – струмовід катоду; 17 – струмовід аноду; 18, 19 – вакуумні насоси; 23 – регулятор напруги; 24 – силовий підвищуючий трансформатор; 25 – випрямлювач струму; 26 – блок стабілізації тліючого розряду

Технічна характеристика установки:

- | | |
|---|--------------|
| – потужність | 40 кВт; |
| – напруга змінна трьохфазна, 50 Гц | 380 В; |
| – максимальна напруга у вакуумній камері | 1500 В; |
| – діаметр вакуумної камери | 600 мм; |
| – висота вакуумної камери | 1000 мм; |
| – максимальний вакуум | 1 Па; |
| – інтервал робочих температур на поверхні деталей | 400–1100 °С; |

– маса садки

500 кг.

Установка містить: системи – вакуумування, газопостачання, енергозабезпечення; розрядну камеру та контрольно-вимірювальні прилади. Технологічний процес характеризується чотирма технологічними параметрами: температурою, складом насичувального середовища, тиском у розрядній камері, часом процесу дифузійного насичення. Особливістю цієї установки є використання як насичуючого середовища в процесі азотування безводневих газових сумішей (суміші азоту з аргоном), що виключає водневе окрихнення поверхні металу.

Відсутність водню в насичуючому середовищі, який є добрим відновником металу і нейтралізатором кисню, вимагає застосування особливо чистих насичуючих газів (99,99 %), великої герметичності системи газопостачання та вакуумної камери. Навіть невелика кількість кисню (0,1 %) викликає утворення окислів на поверхні металу і цим знижує дифузію азоту в метал. На відміну від установок, що працюють з водневими насичуючими середовищами, дана установка має в системі газозабезпечення кисневий уловлювач, який нейтралізує залишки кисню в насичуючому середовищі перед його потраплянням у вакуумну камеру.

Застосування тліючого розряду дозволяє значно прискорити процес дифузійного насичення поверхні азотом з утворенням нітридів заліза та легуючих елементів. Азотування в тліючому розряді змінює кінетику процесу та якісні параметри поверхневого азотованого шару, зокрема його фізико-механічні характеристики і фазовий склад. Це дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики зміцнених деталей, зокрема, їх зносостійкість.

2.2. Умови проведення експериментів (матеріали, середовище)

На сьогодні є багато робіт [65–67, 77, 88, 89, 91], присвячених вивченню процесів зміцнення деталей машин методом наплавлення та їх зношування в абразивному середовищі. З огляду на це дана робота присвячується дослідженням зносостійкості конструктивних елементів, поверхні яких зміцнювались методами

термічної і хіміко-термічної обробки конструкційних маловуглецевих, середньовуглецевих та легованих сталей.

Експериментальні дослідження було проведено на зразках зі сталей 20, 45, У8, 38ХМЮА, ШХ15, Х12, які підлягали різним методам зміцнення поверхні (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Фізико-механічні характеристики зразків

Вид хіміко-термічної обробки	Матеріал зразків	Мікротвердість поверхні Н ₁₀₀ , МПа		Товщина покриття, мкм
		До ХТО	Після ХТО	
1. Без обробки	Сталь 20	2430	2430	–
2. Гартування	Сталь 45	2510	4580	–
3. Гартування	У8	2550	6100	–
4. Гартування	ШХ15	3340	6510	–
6. Гартування	Х12	2820	6720	–
7. Іонне азотування	38ХМЮА	2610	10050	251
8. Іонне азотування за різними режимами	Сталь 45	2510	5400–7400	150–322
9. Іонне азотування за різними режимами	ШХ15	3340	7650–10110	133–307
10. Іонне азотування за різними режимами	Х12	2820	7000–9700	70–200
11. Цементация	Сталь 20	2430	6500	600
12. Нітрогартування (азотування з наступним гартуванням)	Х12	2820	8100	250

Матеріали для проведення досліджень було вибрано з метою вивчення впливу на процес зношування широкого спектра їх властивостей, а саме: твердості, структури, впливу легуючих елементів, технологій зміцнення. Для цього було вибрано конструкційні сталі з різним вмістом вуглецю в їх хімічному складі (від 0,2 до 2,2 %). Для вивчення впливу твердості на процес зношування вибрано вуглецеві нелеговані сталі (20, 45, У8). Для вивчення впливу легуючих елементів і, зокрема, впливу хрому на процес зношування вибрані леговані сталі (ШХ15, 38ХМЮА, Х12).

Для вивчення впливу різних технологій зміцнення поверхні тертя при абразивному зношуванні застосовувались технології цементації та азотування в тліючому розряді (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Хімічний склад досліджуваних зразків матеріалів

Матеріал зразка	Хімічний склад, %							
	C	Mn	Cr	Si	Ni	S	P	Cu
1. Сталь 20 без обробки	0,2	0,45	<0,25	0,2	<0,25	<0,04	<0,04	<0,25
2. 45 гартування	0,45	0,6	<0,25	0,2	<0,25	<0,04	<0,035	<0,25
3. У8 гартування	0,8	0,25	<0,2	0,25	<0,25	<0,028	<0,03	<0,25
4. ШХ15 гартування	0,98	0,3	1,5	0,25	<0,3	<0,02	<0,027	<0,25
5. Х12 гартування	2,1	0,35	12	0,2	<0,35	<0,03	<0,03	<0,3
6. 38ХМЮА іонне азотування	0,4	0,5	1,45	0,3	<0,3	<0,025	<0,025	<0,3
7. 45 іонне азотування	0,45	0,6	<0,25	0,2	<0,25	<0,04	<0,035	<0,25
8. ШХ15 іонне азотування	0,98	0,3	1,5	0,25	<0,3	<0,02	<0,027	<0,25
9. Х12 іонне азотування	2,1	0,35	12	0,2	<0,35	<0,03	<0,03	<0,3
10. Сталь 20 цементація	1,25	0,45	<0,25	0,2	<0,25	<0,04	<0,04	<0,25
11. Х12 нітрогартування	2,1	0,35	12	0,2	<0,35	<0,03	<0,03	<0,3

Вплив метастабільної структури матеріалу, зокрема, залишкового аустеніту на процес абразивного зношування ми вивчали з використанням сталі Х12, що гартувалась від різних температур (від 900 до 1150 °С) з нагрівом в барієвій ванні та охолодженням в мастилі.

Під час досліджень ми вимірювали твердість поверхні зразків на мікротвердомірі ПМТ-3, фазовий склад поверхні тертя на ДРОН-3М. Вміст залишкового аустеніту в зразках з сталі Х12 вимірювали з допомогою рентгенівського апарату УРС-50И в кобальтовому випромінюванні за методикою [124]. Кількість карбідної фази було визначено на мікроскопі МИМ-10 підрахунком її площі на шліфах.

З метою виявлення найбільш ефективної технології зміцнення поверхні зразків було проведено попередні порівняльні дослідження. Випробували зносостійкість зразків, що зміцнювались за технологіями гартування, іонного азотування і цементації. Порівняльні дослідження проводилися на установці тертя, яку наведено на рис. 2.1, в середовищі модельного розчину при тиску на поверхні тертя 5 МПа і частоті обертання 920 хв^{-1} (швидкість ковзання 0,84 м/с).

Результати зносостійкості зразків після різних видів хіміко-термічної обробки (іонного азотування і цементації) ми порівнювали з гартованими зразками цих марок сталей.

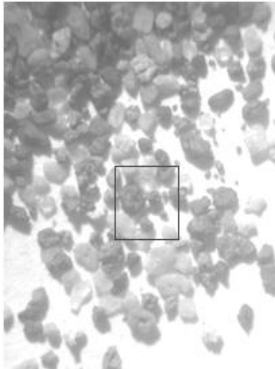
Дослідження зносостійкості зразків зміцнених методом іонного азотування за різними режимами проводилися на установці тертя, яку наведено на рис. 2.4–2.6. Дослідження проводилися в модельному середовищі при тиску 0,5 МПа і швидкості ковзання 1,37 м/с.

Проведено також дослідження складу і властивостей сировини, що надходить в екструдер при виготовленні комбікормів за різними рецептами. У дослідженні встановлено, що вологість сировини коливається в межах від 20 до 35 % в залежно від кількості та видів відходів зернового виробництва. До складу сировини для підвищення кількості корисних мікроелементів в комбікормах додається до 10 % сапоніту. Сапоніт (мильний камінь) – це лужний алюмосилікат, який має високі зв'язуючі, адсорбційні та катіонообмінні властивості. В основі його кристалічної решітки знаходиться магній.

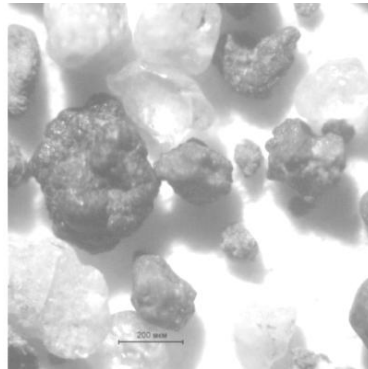
Проведені дослідження [117] фрактографічного складу сапонітової муки показали, що вона містить, крім інших компонентів, частинки кварцового піску розмірами від 200 до 600 мкм в кількості до 1,67 %, з твердістю 13500 МПа і до 0,5 % окису алюмінію з твердістю 20000 МПа (рис. 2.10).

Сапонітова порода Ташківського родовища являє собою метаморфізовані туфи і складається на 80 % з сапонітових мінералів, а також містить незосереджені домішки оксидів заліза, гематиту, кальциту, слюд, кварцу, плагіоклазів та хлоритів.

Сапонітові мінерали [115] відносяться до групи триоктаедричних смектитів і мають різні заряди кристалічної ґратки, причому заряд ґратки одного сапоніту значно відмінний від заряду іншого. Хімічний склад сапоніту представлено в таблиці 2.3.



x20



x100

Рис. 2.10. Абразивні частинки в складі сапоніту

Таблиця 2.3

Склад сапоніту Ташківського родовища Хмельницької області

Компонент	Вміст компонента в породі, % маси	Високодисперсна фракція сапонітової породи, % маси	Дані спектрального аналізу	
			Елемент	Вміст елементу
SiO ₂	40,75–41,36	40,47–43,08	Скандій	$1,5\text{--}3,2 \cdot 10^{-3}$
TiO ₂	1,29–1,50	0,12–0,29	Берилій	$0,1 \cdot 10^{-3}$
Al ₂ O ₃	10,70–11,54	11,56–13,06	Молибден	$0,5 \cdot 10^{-4}$
Fe ₂ O ₃	14,81–15,76	9,80–12,84	Свинець	$3,5\text{--}5,0 \cdot 10^{-5}$
MnO	0,12–0,19	0,12–0,16	Галій	$6,3\text{--}12,0 \cdot 10^{-5}$
MgO	12,25–12,31	12,39–13,28	Ніобій	$0,1 \cdot 10^{-3}$
CaO	1,41–2,40	1,09–1,60	Вісмут	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Na ₂ O	0,07–0,26	0,03–0,12	Барій	$1,5 \cdot 10^{-3}$
K ₂ O	0,43–0,60	0,30–0,33	Лантан	$2,5 \cdot 10^{-3}$
P ₂ O ₅	0,07–0,09	0,04–0,07	Цинк	$4,7 \cdot 10^{-3}$
NO ₂ ⁺	10,40–10,95	11,60–12,60	Цирконій	$1,2\text{--}2,0 \cdot 10^{-2}$
NO ₂ ⁻	4,80–5,66	5,80–6,43	Хром	$0,5\text{--}0,8 \cdot 10^{-2}$
Дані спектрального аналізу			Талій	$2,0 \cdot 10^{-5}$
Елемент	Вміст елементу		Олово	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Кобальт	$0,5\text{--}4,0 \cdot 10^{-3}$		Літій	$2,0\text{--}3,3 \cdot 10^{-4}$
Ванадій	$1,5\text{--}3,2 \cdot 10^{-3}$		Мідь	$4,0\text{--}8,0 \cdot 10^{-3}$
Германій	$0,12\text{--}0,15 \cdot 10^{-3}$		Срібло	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Нікель	$1,5\text{--}3,0 \cdot 10^{-3}$		Золото	$5,0\text{--}10,0 \cdot 10^{-6}$

Для експериментальних досліджень було створено модельний розчин, що моделював умови роботи екструдера при переробці зерна з домішками сапоніту. Модельний розчин складався з муки, сапоніту та води в пропорції 9:1:8 відповідно.

2.3. Планування експериментів

Іонне азотування в тліючому розряді було проведено в середовищі суміші азоту з аргоном у різних співвідношеннях. Технологічний процес добре керується чотирма технологічними параметрами: тиском у вакуумній камері (P , Па), температурою дифузійного насичення (T , °С), складом насичуючого середовища (вмістом Ag об. % в суміші з азотом) та часом дифузійного насичення (τ , год.) і дозволяє змінювати властивості азотованого шару (твердість, товщину, фазовий склад) в широких межах. Таким чином можна оптимізувати властивості для отримання максимальних експлуатаційних характеристик, таких як зносостійкість.

Для забезпечення максимальної зносостійкості пар тертя в абразивному середовищі необхідно, щоб поверхневі шари мали високу твердість і максимальну товщину. Теоретичними і експериментальними дослідженнями процесу іонного азотування металів [76, 111, 118, 119] показано, що для досліджуваних сталей (сталь 45, X12, ШХ15) висока твердість досягається при температурах 560–580 °С, а максимальну товщину азотованого шару можна отримати при протяжності процесу дифузійного насичення 6–8 год.

З огляду на це для скорочення кількості експериментів при дослідженні властивостей азотованого шару та процесу зношування азотованих зразків було використано двохфакторний рототабельний план другого порядку [120–122]. Під час досліджень змінювалися такі фактори: склад насичуючого середовища в межах 29–71 %, тиск у вакуумній камері в межах – 55–225 Па. Тривалість азотування та температуру фіксували, вони становили відповідно 240 хв. та 570 °С відповідно.

Для отримання моделі (параметра оптимізації) було використано алгебраїчний поліном другого порядку [120]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2, \quad (2.1)$$

де $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти регресії, які знаходяться за відповідними формулами [120];

x_1, x_2 – величини, які залежать від змінних факторів.

Для запису умов експерименту і обробки експериментальних даних рівні факторів кодувались.

Прийняті такі змінні фактори: тиск у вакуумній камері – Z_1 ; склад насичуючого середовища (N+Ar) – Z_2 .

При кодуванні значень Z_1, Z_2 верхній рівень позначають +1, нижній –1, а нульовий – 0. Кодування фактора Z_i визначається виразом:

$$x_i = \frac{Z_i - Z_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (2.2)$$

де i – номер фактора; Z_i – натуральне значення i -го фактора; Z_{i0} – натуральне значення нульового рівня i -го фактора; ε_i – інтервал зміни i -го фактора.

Експериментальні дослідження залежності зносостійкості, товщини і твердості азотованого шару проводились на рівнях та з інтервалами, які наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Рівні та інтервали зміни факторів

Позначення	Фактор	Рівень варіювання					Інтервал варіювання, ε
		-1,414	-1	0	+1	+1,414	
Z_1	Тиск, Па	55	80	140	200	225	60
Z_2	Ar, %	29	35	50	65	71	15

Матрицю плану для композиційного рототабельного планування другого порядку наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Матриця рототабельного планування експерименту

Номер досліду	Матриця планування		Робоча матриця			
	x_1	x_2	Ar,%	P , Па	T , °C	τ , хв
1	+	+	65	200	570	240
2	-	+	35	200	570	240
3	+	-	65	80	570	240
4	-	-	35	80	570	240
5	-1,414	0	29	140	570	240
6	+1,414	0	71	140	570	240
7	0	-1,414	50	55	570	240
8	0	+1,414	50	225	570	240
9	0	0	50	140	570	240
10	0	0	50	140	570	240
11	0	0	50	140	570	240
12	0	0	50	140	570	240
13	0	0	50	140	570	240

2.4. Обробка результатів експериментів

Обробку результатів експериментів було проведено із застосуванням методів математичної статистики. Середнє арифметичне значення вимірювань:

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2.3)$$

де N – кількість вимірювань;

x_i – значення вимірюваної величини в i -му досліді.

Абсолютна похибка окремого вимірювання:

$$\Delta X_1 = X_1 - \bar{X}; \quad (2.4)$$

Середнє відхилення змінної:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum \Delta X_1^2}{N-1}}; \quad (2.5)$$

Величина стандартного відхилення середнього значення:

$$\delta_m = \frac{\delta}{N}. \quad (2.6)$$

Границю стандартного відхилення середнього значення ми знаходили таким чином: для верхньої межі $\bar{X} + \Delta X$, для нижньої межі $\bar{X} - \Delta X$, де: $\Delta X = t \cdot \delta_m$, t – значення критерію Стьюдента, що необхідне для заданої надійності (0,95) за кількістю проведених вимірювань N .

Відносна похибка результатів вимірювань величини X $\varepsilon = \pm 100\%$.

Значення різних вимірювальних величин ми знаходили в такій послідовності: спочатку визначали $\Delta_{\max} = X_{\max} - X$, потім перевіряли виконання умови:

$$|\Delta_{\max}| > C > \delta, \quad (2.7)$$

де C знаходили з виразу:

$$\left[\frac{NC^2(f-1)}{f^2 - NC^2} \right] = t, \quad (2.8)$$

де $f = N-1 - C$ число ступенів свободи.

Якщо умова (2.7) виконується, то величину X_{\max} відкидали.

Коефіцієнт варіації знаходили з виразу: $V = \frac{\delta}{Y}$.

За отриманим коефіцієнтом варіації було визначено закон розподілу, оцінено співпадання теоретичної і експериментальної функції розподілу за критерієм Пірсона χ^2 .

Графічні залежності будували за середніми значеннями відповідних серій дослідів.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СТАЛЕЙ

3.1. Порівняльні експериментальні дослідження зносостійкості зразків зміцнених за різними технологіями

У таблицях 3.1 та 3.2 подані результати порівняльних експериментальних досліджень зносостійкості зразків з різних сталей, що зміцнювались за різними технологіями (табл. 2.1). Дослідження проводились на установці тертя [127, 128, 133], яку зображено на рис. 2.1, в середовищі модельного розчину.

Таблиця 3.1

Знос зразків з різних сталей в середовищі модельного розчину при різному шляху тертя

Марка сталі та її обробка	Твердість поверхні, МПа	Знос, мкм			
		Шлях тертя, м			
		3000	6000	9000	12000
1. Сталь 20 без обробки	2310	68	132	195	258
2. 45 гартування	5180	53	103	153	203
3. У8 гартування	6500	48	91	134	177
4. ШХ15 гартування	6510	43	80	116	152
5. Х12 гартування	6700	39	72	105	138
6. 38ХМЮА іонне азотування	10050	25	43	63	88
7. 45 іонне азотування	5450	26	47	70	98
8. ШХ15 іонне азотування	7860	24	43	64	90
9. Х12 іонне азотування	8600	22	39	58	82
10. Сталь 20 цементація	6950	28	52	78	108
11. Х12 Нітрогартування	8100	15	25	38	55

На основі одержаних даних (табл. 3.1 та 3.2) побудовано графіки залежності зносу (рис. 3.1) та інтенсивності зношування (рис. 3.2) досліджуваних зразків залежно від шляху тертя.

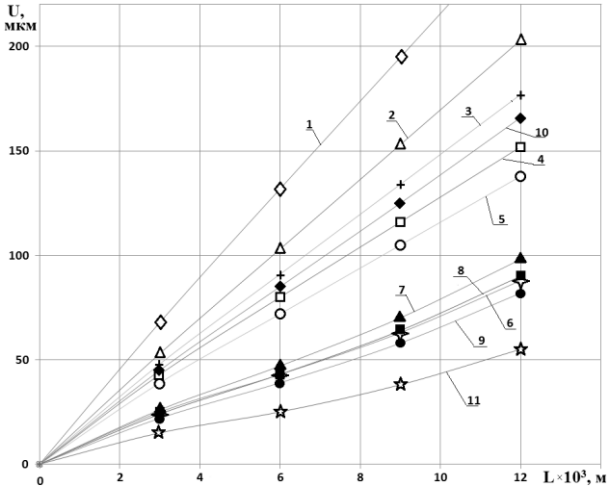


Рис. 3.1. Залежність зносу зразків з різних сталей від шляху тертя:
 1 – сталь 20 без термообробки; 2–5 – гартовані сталі (2–45, 3–У8, 4–ШХ15, 5–Х12); 6–9 – азотовані сталі (6–38ХМЮА, 7–45, 8–ШХ15, 9–Х12); 10 – сталь 20 цементована;
 11 – Х12 нітрогартування

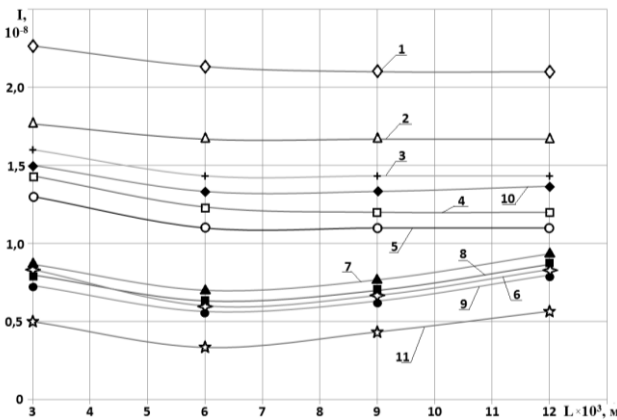


Рис. 3.2. Залежність інтенсивності зношування зразків з різних сталей від шляху тертя:
 1 – сталь 20 без термообробки; 2–5 – гартовані сталі (2–45, 3–У8, 4–ШХ15, 5–Х12); 6–9 – азотовані сталі (6–38ХМЮА, 7–45, 8–ШХ15, 9–Х12); 10 – сталь 20 цементована; 11 – Х12 нітрогартування

Таблиця 3.2

**Інтенсивність зношування зразків з різних сталей у середовищі
модельного розчину при різному шляху тертя**

Марка сталі та її обробка	Твердість поверхні, МПа	Інтенсивність зносу, $I \cdot 10^{-8}$			
		Шлях тертя, м			
		3000	6000	9000	12000
1. Сталь 20 без обробки	2310	2,2	2,1	2,1	2,1
2. 45 гартування	5180	1,7	1,7	1,7	1,6
3. У8 гартування	6500	1,6	1,4	1,4	1,4
4. ШХ15 гартування	6510	1,4	1,2	1,2	1,2
5. Х12 гартування від температури 1050 °С	6700	1,3	1,1	1,1	1,1
6. 38ХМЮА іонне азотування (режим 5 табл. 2.5)	10050	0,8	0,6	0,7	0,8
7. 45 іонне азотування (режим 5 табл. 2.5)	5450	0,8	0,7	0,7	0,9
8. ШХ15 іонне азотування (режим 5 табл. 2.5)	7860	0,8	0,6	0,7	0,8
9. Х12 іонне азотування (режим 5 табл. 2.5)	8600	0,7	0,5	0,6	0,8
10. Сталь 20 цементация	6950	0,9	0,8	0,8	0,9
11. Х12 Нітрогартування (азотування режим 5 табл. 2.5 гартування від температури 1050 °С)	8100	0,5	0,33	0,43	0,57

З рис. 3.1 та 3.2 видно, що в усіх зразках у початковий період зношування відбувається припрацювання поверхонь тертя, при якому інтенсивність зношування поступово зменшуються. Для сталей з однорідними властивостями по глибині (сталь 20 без обробки та гартовані сталі 45, У8, ШХ15, Х12) інтенсивність зношування стабілізується, а величина зносу змінюється прямопропорційно до шляху тертя. Для азотованих сталей (38ХМЮА, 45, ШХ15, Х12) та цементованої сталі 20, які мають змінні властивості по глибині дифузійного покриття, інтенсивність зношування поступово зростає після припрацювання зі збільшенням шляху тертя та наближається до інтенсивності зношування основи. При цьому їх знос змінюється не прямопропорційно до шляху тертя.

На рис. 3.3 наведено інтенсивність зношування різних сталей в модельному середовищі після $12 \cdot 10^3$ м шляху тертя. З рисунка видно, що для не легованих сталей (20, 45, У8), які мають однорідні властивості по глибині, існує лінійна, оберненопропорційна залежність інтенсивності зношування від твердості поверхні тертя, що підтверджується дослідженнями інших авторів [33, 43–45] для умов абразивного зношування. Наявність легуючих елементів в сталях (38ХМЮА, ШХ15, Х12) сприяє зменшенню інтенсивності зношування в умовах абразивного зношування [33, 46, 63, 123]. Особливо великий вплив на інтенсивність зношування сталей має кількісний вміст хрому. Зі збільшенням вмісту хрому в сталі інтенсивність зношування зменшується, що підтверджується інтенсивністю зношування сталей ШХ15 і Х12, в яких вміст хрому відповідно становить 1,3 та 12 % (табл. 2.2).

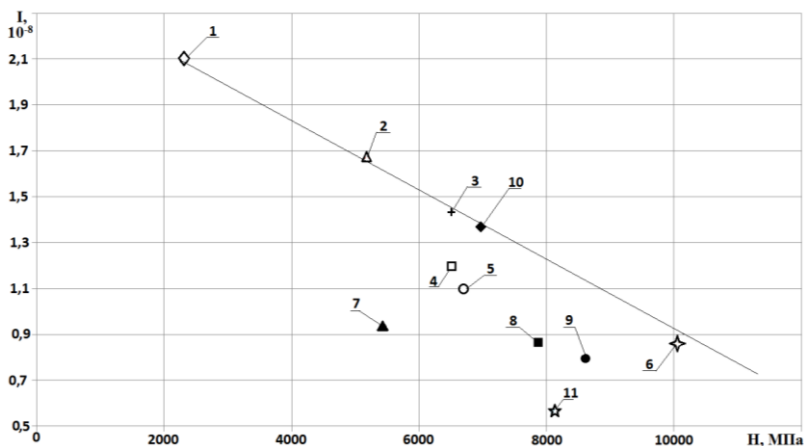


Рис. 3.3. Інтенсивність зношування різних сталей в модельному середовищі після $12 \cdot 10^3$ м шляху тертя:
1 – сталь 20 без термообробки; 2–5 – гартовані сталі (2–45, 3–У8, 4–ШХ15, 5–Х12); 6–9 – азотовані сталі (6–38ХМЮА, 7–45, 8–ШХ15, 9–Х12); 10 – сталь 20 цементована; 11 – Х12 нітрогартування

Серед гартованих сталей найнищу інтенсивність зношування показала сталь Х12 (рис. 3.3, поз. 5). Це можна пояснити не тільки великим вмістом хрому в сталі, але і наявністю

понад 50 % залишкового аустеніту в структурі матеріалу, що утворився при її гартуванні від температури 1050 °С. Залишковий аустеніт при циклічному деформуванні в процесі абразивного зношування перетворюється в мартенсит [123], поглинаючи при цьому частину енергії активації в процесі тертя, що сприяє підвищенню зносостійкості матеріалу [35].

Результати досліджень показують, що зразки, зміцнені за технологією іонного азотування в плазмі тліючого розряду в безводневому середовищі, мали вищу зносостійкість порівняно з іншими технологіями. Це наочно видно з кривих 6–9 рис. 3.1 та 3.2, які показують, що величина зносу і інтенсивність зношування досліджуваних сталей після азотування майже в два рази менше порівняно з їх значеннями після гартування. Слід зазначити, що переважна частина метастабільного залишкового аустеніту, який утворився при гартуванні сталі X12, в процесі азотування розпадається в зв'язку з нижчою температурою мартенситних перетворень (<290 °С [123]) порівняно з температурою азотування.

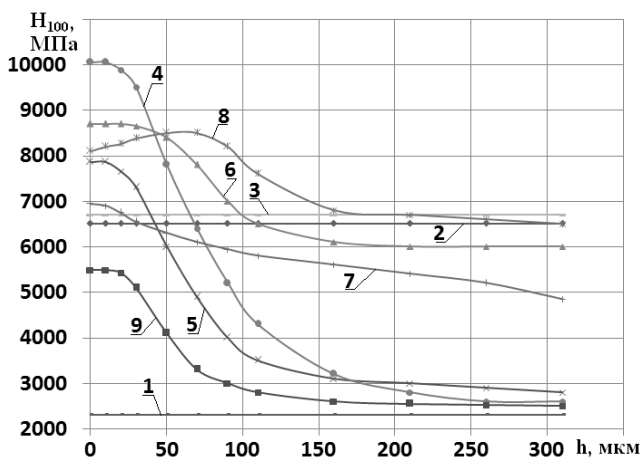


Рис. 3.4. Розподіл твердості по глибині поверхневого шару різних сталей при різних видах термоїчної і хіміко-термоїчної обробки:

- 1 – сталь 20 без термообробки; 2 – сталь ШХ15 гартувана;
- 3 – сталь X12 гартувана від температури 1050 °С; 4 – 38ХМЮА без термообробки азотована; 5– ШХ15 без термообробки, азотована за режимом 5; 6 – X12 гартувана з наступним азотуванням; 7 – сталь 20 цементувана; 8 – сталь X12 нітрогартувана від температури 1050 °С; 9 – сталь 45, азотована без термообробки

Нітрогартування передбачає попереднє азотування з наступним гартуванням. Це забезпечує наявність в структурі матеріалу метастабільного залишкового аустеніту. При цьому за рахунок високої температури гартування частина нітридів на поверхні розпадається і азот дифундує в глибину азотованого шару, збільшуючи його товщину (рис. 3.4).

Це сприяє підвищенню зносостійкості сталі як за рахунок перетворень залишкового аустеніту при циклічному навантаженні, так і за рахунок його легування азотом порівняно з традиційною технологією азотування (гартування з наступним азотуванням). З рис. 3.1–3.3 видно, що зносостійкість зразків з нітрогартованої сталі X12 в 1,5 рази вища порівняно з азотованою і в три рази вища в порівнянні з гартованою.

3.2. Вплив структури поверхневих шарів на зносостійкість сталей у модельному розчині

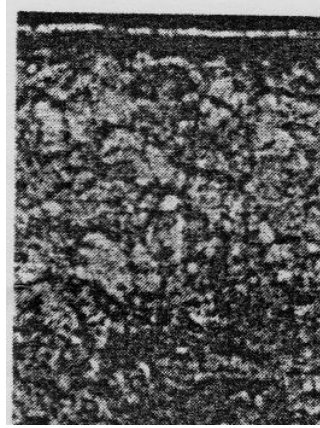
Для дослідження впливу структури поверхневих шарів на їх зносостійкість зразки було виготовлено з різних сталей, що підлягали різній термічній та хіміко-термічній обробці (гартуванню від різних температур, іонному азотуванню, нітрогартуванню і цементації). Це дозволило одержати різні структури основи матеріалів (мартенситу, аустеніту) та їх поверхневих шарів з карбідними та нітридними фазами.

На рис. 3.5 показано мікроструктури різних сталей з різною хіміко-термічною обробкою: іонне азотування (рис. 3.5, *a* і *б*), нітрогартування (рис. 3.5, *в*) і цементація (рис. 3.5, *г*). З рис. 3.5, *a* і *б* видно азотований шар (темна зона) з чітко вираженою нітридною зоною (білий нетравлений шар) різної товщини. На рис. 3.5, *в* видно, що при нітрогартуванні сталі X12 нітридний шар частково розпадається під дією високої температури азотування. При цьому азот частково дифундує в глибину матеріалу, що приводить до збільшення товщини азотованого шару. На рис. 3.5, *г* чітко видно цементований шар з великою кількістю карбідної фази (світлі плями), кількість якої може досягати 11 % [123].

При хіміко-термічній обробці на поверхні матеріалів утворюються градієнтні зміцнюючі покриття з від'ємним градієнтом твердості по глибині (рис. 3.4) в зв'язку зі змінною концентрації дифузанта та його сполук з металом різними фазами. Такі сполуки



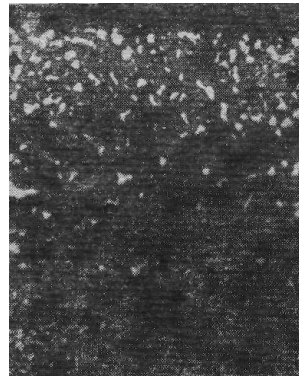
a ×400



б ×400



в ×400



г ×400

**Рис. 3.5. Мікроструктури сталей досліджуваних зразків:
a – сталь ШХ15 після іонного азотування; *б* – сталь 38ХМЮА
після іонного азотування; *в* – сталь Х12 після нітрогартування;
г – сталь 20 після цементації**

приводять до зміни структури матеріалу, зокрема при азотуванні утворюються: твердий розчин азоту в залізі (α -фаза, концентрація азоту до 0,1 %), який має решітку об'ємно центрований куб; твердий розчин на основі сполуки Fe_4N (γ' -фаза, концентрація азоту до 6 %) з решіткою гранецентрований куб; твердий розчин на основі нітридів Fe_{2-3}N (ϵ -фаза, концентрація азоту до 11 %),

кристалева решітка гексогональна. ϵ -фаза має максимальну твердість, високу корозійну стійкість, але вона дуже крихка. γ' -фаза характеризується меншою твердістю, але більшою пластичністю. Найнищу твердість має α -фаза. Наявність легуючих елементів (Cr, Mo, W, Al, V тощо) в структурі матеріалу збільшує твердість поверхні матеріалу в зв'язку з утворенням нітридів легуючих елементів. Це наочно видно з рис. 3.4 для сталі 45 і сталей ШХ15, Х12 та 38ХМЮА. Твердість сталі 38ХМЮА майже в 2 рази вища, ніж сталі 45.

В таблиці 3.3 і на рис. 3.6 наведено результати досліджень характеристик сталі Х12 (твердості, вмісту залишкового аустеніту та інтенсивності зношування) після гартування від різних температур. Дослідження показали, що твердість азотованого шару змінюється із зміною температури гартування. Максимальне значення твердості досягається при температурі 975 °С, коли в її структурі міститься максимальна кількість мартенситу – 44 %, аустеніту 36 % і карбідів 20 %. Зниження твердості після гартування з температур нище, ніж 975 °С можна пояснити появою в структурі м'якої феритної складової, що входить до складу троститу, який характерний для неповного гартування інструментальних сталей.

Таблиця 3.3

Характеристики сталі Х12 після гартування

Температура гартування T , °С	Мікротвердість поверхні H_{100} , МПа	Вміст залишкового аустеніту A , %	Інтенсивність зношування $I \cdot 10^{-8}$ після шляху $3 \cdot 10^3$ м	Мікротвердість поверхні після шляху тертя $3 \cdot 10^3$ м, МПа
900	6900	19	1,65	7000
950	7090	28	1,37	7100
1000	7040	40	1,15	7090
1050	6700	55	1,1	6900
1100	5900	72	1,65	6300
1150	4800	93	2,6	4900

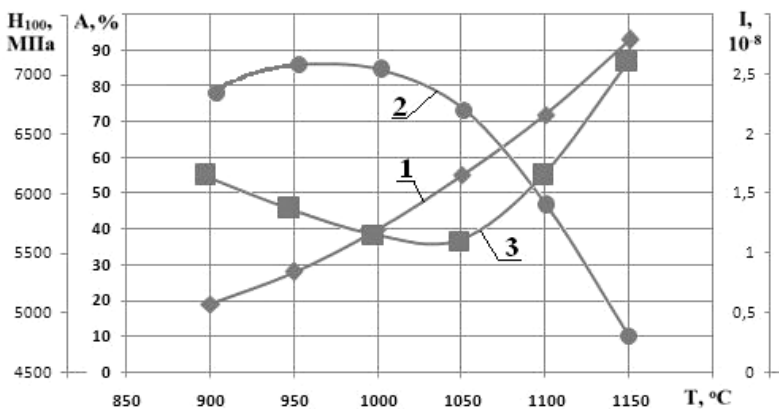


Рис. 3.6. Характеристики сталі X12 залежно від температури гартування:

**1 – вміст аустеніту А, %; 2 – мікротвердість поверхні Н₁₀₀, МПа;
3 – інтенсивність зношування $I \cdot 10^{-8}$**

При температурі гартування, вищій за 975 °С твердість теж знижується, проте це відбувається за рахунок збільшення в структурі вмісту залишкового аустеніту. З підвищенням температури гартування збільшується легуваність твердого розчину хромом і вуглецем внаслідок розчинення карбідів. В результаті в складі сталі збільшується вміст залишкового аустеніту і зменшується кількість мартенситу. При цьому твердість сталі безперервно знижується і після температури гартування від 1150 °С в структурі сталі X12 міститься 93 % залишкового аустеніту, 5 % карбідів та 2 % мартенситу.

Дослідження зносостійкості сталі X12 в модельному розчині показали, що мінімальної інтенсивності зношування ($1,1 \cdot 10^{-8}$) можна досягти при температурі гартування 1050 °С з вмістом аустеніту орієнтовно 55 %, 21 % мартенситу та 14 % карбідів. Інтенсивність зношування при температурі гартування 900 °С становила $1,65 \cdot 10^{-8}$, що в 1,5 рази більше, ніж при температурі гартування 1050 °С. Це можна пояснити наявністю фериту в тростинній структурі та більшою кількістю мартенситу. Таким чином, спостерігається тенденція збільшення зносостійкості

сталі зі збільшенням вмісту в її структурі залишкового аустеніту та зменшення мартенситу.

Тенденція зростання зносостійкості сталі X12 при збільшенні в структурі кількості залишкового аустеніту і зменшення мартенситу при гартуванні за температури, вище ніж 1050 °C вірогідно продовжувалась і далі, якби стабільність аустеніту залишалась постійною. Проте при підвищенні температури гартування одночасно зі збільшенням вмісту в структурі аустеніту знижується його чутливість до фазових $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворень в умовах абразивного зношування в модельному розчині. В результаті величина зміцнення поверхні зменшується і загальний опір руйнування при абразивному зношуванні сталі X12 зменшується порівняно з максимальним значенням при температурі гартування 1050 °C. З рис. 3.6 видно, що інтенсивність зношування при температурі гартування 1150 °C становила $2.6 \cdot 10^{-8}$, що майже в 2,5 рази більше, ніж при температурі гартування 1050 °C.

Здатність великої кількості залишкового аустеніту чинити опір руйнуванню при абразивному зношуванні свідчить про глибокі внутрішні зміни, що відбуваються в самому аустеніті. При пластичній деформації абразивними частинками в процесі зношування відбувається розпад метастабільного залишкового аустеніту на мартенсит. При цьому підвищується твердість поверхні тертя (рис. 3.7). Це підтверджено рентгеноструктурними дослідженнями [123] зношування сталі з значним вмістом залишкового аустеніту, при якому вихідний вміст мартенситу 20 % збільшився до 60 %, а мікротвердість зросла в 1,3 рази.

У процесі пластичної деформації має місце проковзування окремих шарів матеріалу. Проковзування як результат пластичної деформації пов'язане з переміщенням по площинах ковзання великої кількості дислокацій. При цьому все, що перешкоджає їх руху, ускладнює ковзання. Через це рух дислокацій у структурі матеріалу перешкоджає наявності вторинних фаз, атомів легуючих елементів, границі зерен і навіть вакансії в решітці. Закріплення дислокацій, що утворюються в процесі деформування матеріалу, забезпечує збереження зміцненого стану в матеріалі після зняття зовнішніх навантажень. З огляду на це можна стверджувати, що успіх зміцнення сплавів залежить від того наскільки ефективно вдається загальмувати рух дислокацій [125]. У металографічних

дослідженнях [123] встановлено, що при абразивному зношуванні сліди пластичної деформації поширюються на значну віддаль від кромки заглиблення на робочі поверхні, яка досягає 10 мкм на гартованих і 30-40 на негартованих сталях. При цьому кількість дислокацій в сильно деформованих шарах досягає $24,1 \cdot 10^{12}$ на см^2 [126].

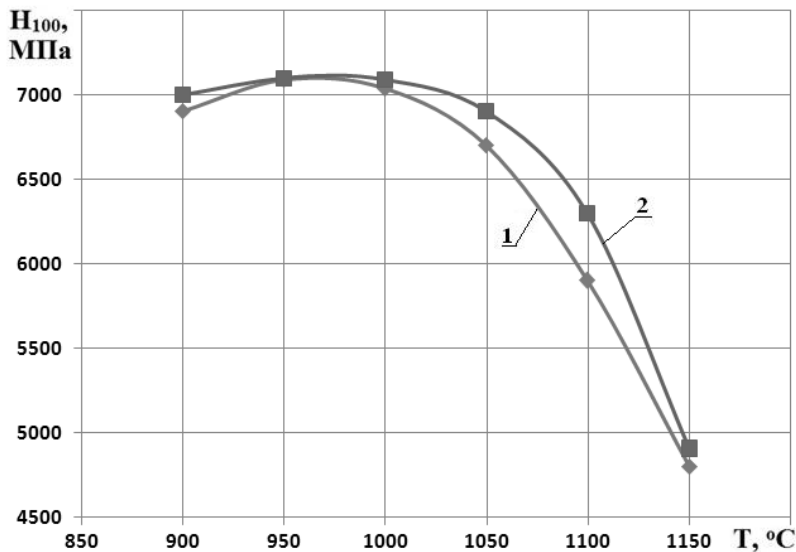


Рис. 3.7. Зміна мікротвердості поверхневого шару сталі X12 від температури гартування: до початку випробувань (1), після випробувань (2) на зношування в модельному розчині (шлях тертя $3 \cdot 10^3$ м)

Таким чином, фазові перетворення, велика кількість дислокацій під впливом пластичної деформації металу на поверхні тертя і пов'язане з цим значне гальмування і закріплення дислокацій є причиною збільшення здатності сталей зі значним вмістом залишкового аустеніту до опору абразивному зношуванню і підвищенню їх зносостійкості.

У таблиці 3.4 і на рис. 3.8 наведено результати експериментальних досліджень властивостей сталі X12 після азотування з попереднім гартуванням та нітрогартування

(азотування з наступним гартуванням). Дослідження показали, що при азотуванні сталі Х12 з попереднім гартуванням мікротвердість поверхні поступово зменшується при збільшенні температури гартування за лінійною залежністю (рис. 3.8 пряма 3). Це обумовлено зростанням вмісту залишкового аустеніту в структурі після гартування. В процесі азотування залишковий аустеніт розпадається в зв'язку з низькою температурою його мартенситних перетворень (менше 290 °С) при температурі азотування, атому його вміст після азотування не перевищує 10% (рис. 3.8 крива 1). При цьому структура матеріалу практично стабілізується в зв'язку з малою кількістю метастабільних фаз. Інтенсивність зношування поверхні зростає з підвищенням температури гартування сталі, що обумовлено зменшенням твердості матеріалу. Закономірність зношування азотованої сталі аналогічна до закономірності зношування матеріалів зі стабільною структурою в абразивному середовищі (рис. 3.3).

Таблиця 3.4

Характеристики сталі Х12 після азотування та нітрогартування

№ з/п	Температура гартування $T, ^\circ\text{C}$	Азотування			Нітрогартування		
		Мікротвердість поверхні $H_{100}, \text{МПа}$	Вміст залишкового аустеніту $A, \%$	Інтенсивність зношування $I \cdot 10^{-8}$ після шляху тертя $3 \cdot 10^3 \text{ м}$	Мікротвердість поверхні $H_{100}, \text{МПа}$	Вміст залишкового аустеніту $A, \%$	Інтенсивність зношування $I \cdot 10^{-8}$ після шляху тертя $3 \cdot 10^3 \text{ м}$
1	900	9200	5	0,43	9050	21	0,42
2	950	9000	5	0,47	8800	30	0,35
3	1000	8800	6	0,50	8600	41	0,30
4	1050	8600	7	0,54	8200	55	0,32
5	1100	8400	8	0,58	7500	73	0,37
6	1150	8200	10	0,63	5600	91	0,49

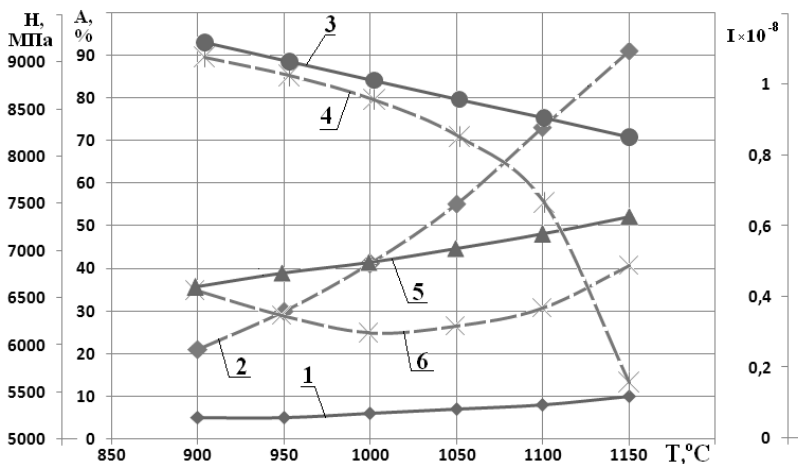


Рис. 3.8. Характеристики сталі X12 після азотування (суцільні лінії) і нітрогартування (пунктирні лінії):
1–2 вміст аустеніту; **3–4** мікротвердість поверхневого шару;
5–6 інтенсивність зношування після шляху тертя $6 \cdot 10^3$ м

При нітрогартуванні, на відміну від азотування, з підвищенням температури гартування вміст залишкового аустеніту значно зростає і при температурі гартування 1150 °C досягає 91 %. Максимальна мікротвердість поверхні становить 9050 МПа при температурі гартування 900 °C, яка на 150 МПа нижче порівняно з азотуванням. Це обумовлено розпадом нітридів при такій температурі нітрогартування. Мікротвердість поверхні знижується в залежності від температури нітрогартування і тим більше, чим більшим є вміст аустеніту в структурі матеріалу. Мінімальна твердість при нітрогартуванні становить 5600 МПа, що в 1,5 раз менше, ніж при азотуванні. Це обумовлено великою кількістю залишкового аустеніту, який має низьку твердість, і мінімальною кількістю мартенситу. Збільшення мінімальної твердості поверхні при нітрогартуванні на 800 МПа порівняно з мінімальною твердістю при гартуванні пояснюється наявністю азоту і нітридних фаз в поверхні. Інтенсивність зносу при нітрогартуванні значно нижча порівняно з азотуванням (рис. 3.8, криві 5, 6). Мінімальна інтенсивність зношування досягається при температурі гартування 1030–1050 °C і вмісту залишкового аустеніту 45–55 % і складає $0,3 \cdot 10^{-8}$, що в 1,5 раз менше порівняно з

азотованою і в 3,7 раз менше порівняно з гартованою сталю Х12. Закономірність впливу залишкового аустеніту на інтенсивність зношування нітрогартованої сталі Х12 подібна до закономірності її зношування при гартуванні, але відрізняється тим, що швидкість зростання інтенсивності зношування після температури гартування 1050 °С менша за рахунок легування залишкового аустеніту азотом, який збільшує його стабільність.

На рис. 3.9 наведено діаграму показника зносостійкості (I^1) різних сталей при абразивному зношуванні в модельному розчині з різною термічною і хіміко-термічною обробкою.

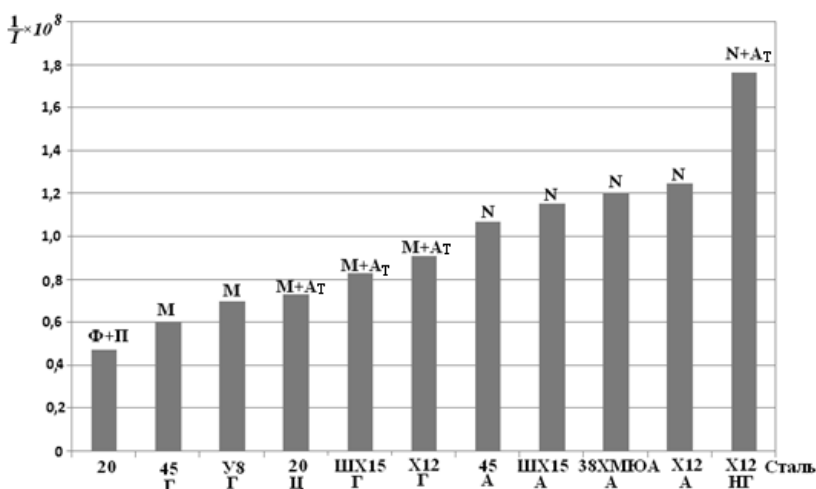


Рис. 3.9. Діаграма зносостійкості різних сталей при абразивному зношуванні в модельному розчині з різною термічною і хіміко-термічною обробкою:

Г – гартування; Ц – цементация; А – азотування;
 НГ – нітрогартування; Ф – ферит; П – перліт; М – мартенсит;
 N – нітриди А_Т – аустеніт

З діаграми видно, що максимальну зносостійкість має сталь Х12 після нітрогартування, яка в 3,7 разів вища порівняно з сталю 20 без обробки, майже в 2–3 рази порівняно з гартованими сталями, в 2,4 рази порівняно з сталю 20 цементованою і в 1,5–1,7 разів порівняно з азотованими сталями.

Таким чином, при зношуванні в абразивному середовищі для сплавів з стабільною структурою поверхні справедлива

прямопропорційна залежність зносостійкості від твердості. Для сплавів з нестабільною структурою, яка може змінюватись під дією абразивів при зношуванні, необхідно враховувати структурний стан поверхні матеріалу і зносостійкість головним чином залежить від повноти структурних перетворень при зношуванні.

3.3. Вплив розміру абразивного зерна на інтенсивність зношування різних сталей

Для вивчення впливу розміру абразивного зерна на інтенсивність зношування різних сталей провели дослідження їх зносостійкості в модельному розчині при середніх розмірах зерна кварцового піску 75, 150, 225, 300 мкм. В таблиці 3.5 і на рис. 3.10 наведено результати цих досліджень. Результати досліджень показали, що зі збільшенням розміру абразивного зерна інтенсивність зношування збільшується. З'ясовано, що закономірності зношування для сталей з різними властивостями поверхні різні. В сталях, що мають стабільні властивості по глибині, при збільшенні розміру зерна інтенсивності зношування змінюються за прямолінійними залежностями (рис. 3.10, криві 1, 2, 4–6). При цьому очевидно, що чим менша твердість сталі, тим більшою є швидкість зростання інтенсивності зношування.

Таблиця 3.5

Інтенсивність зношування сталей при різних розмірах абразивного зерна

Марка сталі та її обробка	Твердість поверхні, МПа	Інтенсивність зношування $I \cdot 10^{-8}$			
		Середній розмір зерна, мкм			
		75	150	225	300
1. Сталь 20 без термообробки	2310	1,89	2,00	2,1	2,27
2. 45 гартована	5180	1,52	1,59	1,67	1,74
3. Х12 гартована	6700	1,04	1,08	1,10	1,11
4. Х12 азотована	8600	0,88	0,91	0,95	1,00
5. ШХ15 гартована	6510	1,09	1,15	1,2	1,26
5. 38ХМЮА азотована	10050	0,78	0,08	0,83	0,91

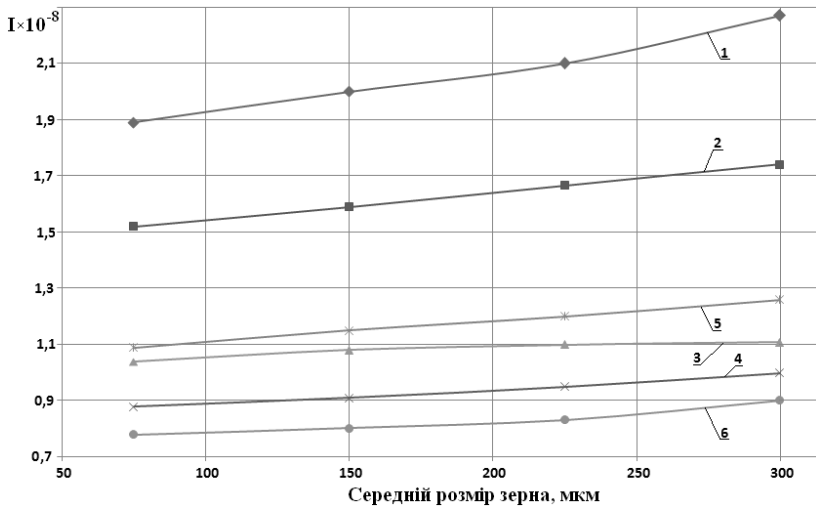


Рис. 3.10. Залежність інтенсивності зношування різних сталей від середнього розміру абразивного зерна:
1 – сталь 20 без термообробки; 2 – 45 гартована; 3 – X12 гартована;
4 – 38ХМЮА азотована; 5 – ШХ15 гартована; 6 – X12 азотована

У сталях, які містять в своїй структурі метастабільні фази, швидкість зростання інтенсивності зношування при збільшенні розмірів абразивного зерна поступово зменшується (рис. 3.10, крива 3). Це можна пояснити зміцненням поверхні тертя за рахунок перетворення метастабільного залишкового аустеніту в мартенсит. При зростанні розміру абразивного зерна збільшується величина пластичної деформації поверхні, що і зумовлює збільшення метастабільних перетворень.

Дослідження показали, що величина збільшення інтенсивності зношування при зростанні середнього розміру абразивного зерна від 75 до 300 мкм для сталі 20 становила до 20 %, для гартованих сталей 45, ШХ15 та азотованих 38ХМЮА, X12, ШХ15, які мали стабільну структуру – 14–16%. Для сталі X12, яку було гартованою від температури 1050 °С і яка містила 55 % залишкового аустеніту, збільшення інтенсивності зношування при зростанні середнього розміру абразивного зерна від 75 до 300 мкм становило 7 %.

3.4. Оптимізація технологічних параметрів іонного азотування сталей за критерієм максимальної зносостійкості

Теоретичні та експериментальні дослідження [76, 111] показали, що технологічні параметри процесу азотування (температура дифузійного насичення, тиск у вакуумній камері, склад насичуючого середовища і час азотування) мають вплив на властивості азотованого шару. З огляду на це ми досліджували вплив кожного із технологічних факторів при азотуванні в тліючому розряді на твердість, товщину, фазовий склад і градієнт зміни властивостей по товщині азотованого шару.

Змінюючи технологічні параметри процесу азотування, ми змінювали властивості азотованого шару в широких межах (твердість, товщину азотованого шару та градієнт зміни твердості по товщині). На поверхні одержували нітридну зону різного фазового складу, різної товщини або азотовані шари без нітридної зони.

Було враховано, що для забезпечення максимальної зносостійкості пар тертя в абразивному середовищі необхідно, щоб поверхневі шари матеріалу мали високу твердість і максимальну товщину. Теоретичними і експериментальними дослідженнями процесу іонного азотування металів [76, 111, 118, 119] показано, що для конструкційних сталей висока твердість досягається при температурах 560–580 °С, а максимальну товщину азотованого шару можна отримати при протяжності процесу дифузійного насичення 6–8 год. В зв'язку з цим ми досліджували фізико-механічні та трибологічні властивості азотованого шару сталей 45, ШХ12, Х12 залежно від тиску в вакуумній камері та складу насичуючого середовища при постійних значеннях температури та часу дифузійного насичення відповідно до плану проведення експериментів, наведеного в розділі 2 (табл. 2.5).

У таблиці 3.6 наведено результати експериментальних досліджень твердості та товщини азотованого шару сталей 45, ШХ12, Х12 залежно від режимів іонного азотування в безводневих середовищах. На основі результатів цих досліджень відповідно до двохфакторного рототабельного плану (розділ 2) отримано емпіричні математичні залежності твердості поверхні (H_{100}) і товщини азотованого шару (h) від вмісту аргону в насичуючому середовищі та тиску в вакуумній камері досліджуваних сталей, що

описуються регресивним рівнянням (2.1). Коефіцієнти рівнянь регресії для сталей 45, ШХ15, Х12 наведено в таблиці 3.7 [134–136].

Таблиця 3.6

Залежність мікротвердості та товщини азотованого шару від режимів іонного азотування різних сталей

Номер режиму	Технологічні параметри азотування		Сталь ШХ15		Сталь 45		Сталь Х12	
	P, Па	Ar, %	Мікротвердість H ₁₀₀ , МПа	Товщина азотованого шару, мкм	Мікротвердість H ₁₀₀ , МПа	Товщина азотованого шару, мкм	Мікротвердість H ₁₀₀ , МПа	Товщина азотованого шару, мкм
1	200	65	7650	225	5400	226	9700	134
2	200	35	9290	307	6790	322	9500	192
3	80	65	8730	133	6220	150	7800	50
4	80	35	10110	190	7400	222	7000	80
5	140	71	7860	168	5480	171	8600	88
6	140	29	9970	265	7280	289	8450	150
7	225	50	8300	285	6020	293	8350	178
8	55	50	9650	137	7040	168	7250	40
9	140	50	9110	223	6640	240	7800	130
10	140	50	9110	222	6600	241	7780	128
11	140	50	9110	223	6690	238	7900	133
12	140	50	9110	220	7100	240	7850	131
13	140	50	9110	223	6620	239	7910	127

Зокрема для сталі Х12 залежності товщини азотованого шару і мікротвердості його поверхні від технологічних параметрів іонного азотування було описано такими рівняннями регресії:

$$h = 130,4 + 49,6X_1 - 22,5X_2 - 7,0X_1X_2 - 10,4(X_1)^2 - 5,6(X_2)^2, \quad (3.1)$$

$$H_{100} = 9050 + 284,8X_1 - 301,2X_2 - 150X_1X_2 - 56,5(X_1)^2 - 20,2(X_2)^2. \quad (3.2)$$

Аналогічні рівняння можна записати для сталей 45 і ШХ15, використовуючи дані таблиці 3.7.

На основі рівнянь регресії було побудовано графіки залежності твердості та товщини азотованого шару (рис. 3.11 і 3.13) від технологічних параметрів процесу азотування в безводневих середовищах сталей ШХ15, 45 і Х12.

Таблиця 3.7

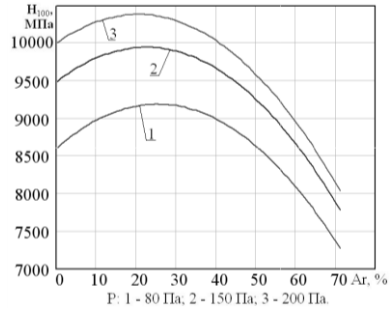
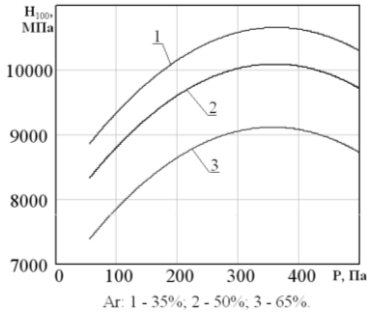
Коефіцієнти рівнянь регресії (2.1), що описують залежності товщини h і мікротвердості поверхні H_{100} азотованого шару від технологічних параметрів іонного азотування для сталей ШХ15, 45 і X12

Коефіцієнт регресії	Сталь ШХ15		Сталь 45		Сталь X12	
	H_{100} , МПа	h , мкм	H_{100} , МПа	h , мкм	H_{100} , МПа	h , мкм
b_0	9171,9	224,5	6670	291,8	9050	130,4
b_1	476,5	52,3	-358,9	44,1	284,8	49,6
b_2	-746,3	-34,3	-638,3	-41,7	-301,2	-22,5
b_{12}	-66,6	-6,4	-51,8	-1,9	-150,0	-7,0
b_{11}	-68,6	-6,0	-300,5	-11,9	-56,5	-10,4
b_{22}	-205,8	-5,8	-198,2	-10,8	-320,2	-5,6

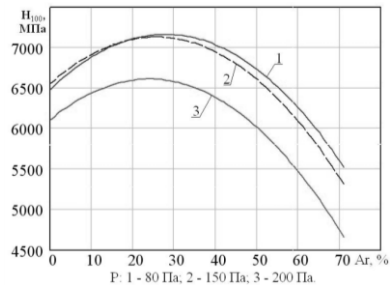
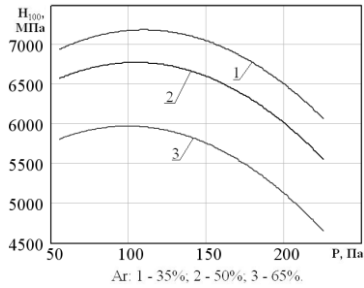
З рис. 3.11 видно, що технологічні параметри іонного азотування мають великий вплив на твердість поверхні азотованого шару. Залежності твердості поверхні від тиску в вакуумній камері і об'ємного вмісту аргону в насичуючому середовищі (суміш азоту з аргонном) мають екстремальний характер з явно вираженими максимумами.

Для різних сталей є оптимальні значення цих параметрів, при яких досягається максимальна мікротвердість. Наприклад, для сталі ШХ15 максимальне значення мікротвердості досягаються при тиску 340–360 Па та вмісту аргону 22–26 %; для сталі 45 – при тиску 110–118 Па та вмісту аргону 25–30 %; для сталі X12 – при тиску 360–370 Па та вмісту аргону 38–42 %.

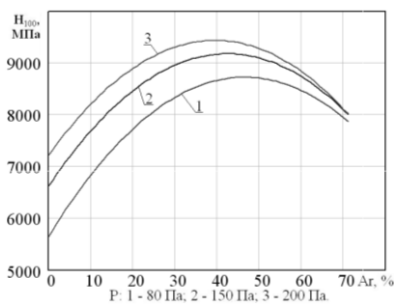
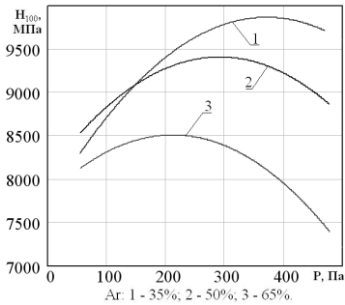
Режими іонного азотування мають великий вплив на характер розподілу мікротвердості по глибині азотованого шару, що наочно видно з рис. 3.12. Режими азотування 1 для сталі X12 і 4 для сталей ШХ15 і 45 забезпечують високу твердість поверхні завдяки утворенню на них нітридного шару (рис. 3.5, а) і великий градієнт зміни мікротвердості по глибині азотованого шару. При азотуванні за режимами 1 для сталі ШХ15 та 45 і 4 для сталі X12 мікротвердість поверхні значно менша через відсутність нітридної зони, при цьому градієнт зміни твердості значно менший.



a



б



в

Рис. 3.11. Залежність твердості поверхні азотованого шару від технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневих середовищах сталей: *a* – 30X15; *б* – 45; *в* – X12

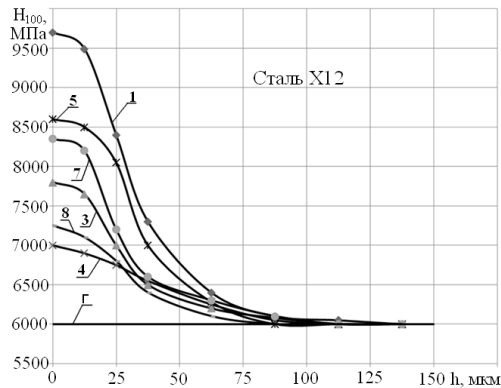
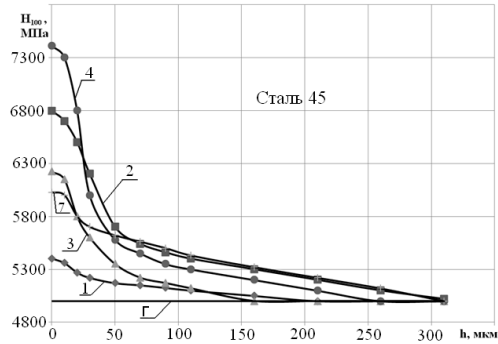
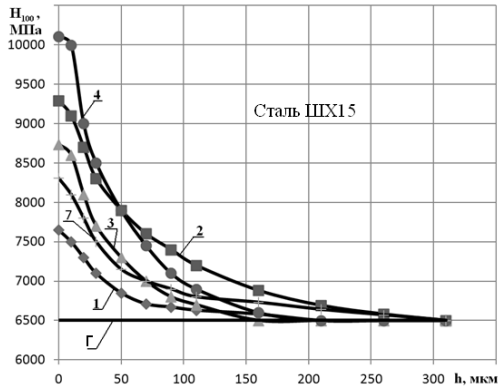


Рис. 3.12. Розподіл твердості по глибині азотованого шару залежно від режимів іонного азотування: 1–8 – режими азотування (табл.2.5); Г – сталь гартована

Таким чином, змінюючи режим азотування, можемо змінювати не тільки твердість поверхні, але і розподіл твердості та її градієнт по товщині азотованого шару.

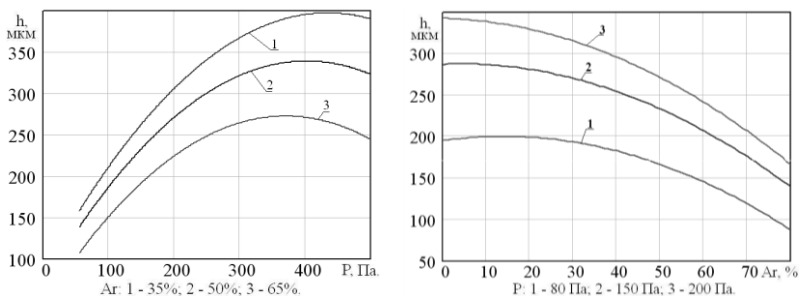
На рис. 3.13 наведено залежності товщини азотованого шару від технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневих середовищах для сталей ШХ15, 45, Х12. З рисунку видно, що технологічні параметри процесу азотування мають великий вплив на товщину азотованого шару. Залежності товщини азотованого шару від тиску в вакуумній камері і об'ємного вмісту аргону в насичуючому середовищі (суміш азоту з аргонем) мають екстремальний характер з вираженими максимумами. Оптимальні режими азотування було досягнуто для сталі ШХ15 при тиску в вакуумній камері 420–425 Па і вмісту аргону в насичуючому середовищі до 5 %, для сталі 45 ці параметри відповідно становлять 240–250 Па та 20–25 % аргону, а для сталі Х12 – при тиску 310–320 Па та 12–17 % аргону. Найбільша товщина азотованого шару при оптимальних становила для сталі ШХ15 390 мкм, для сталі 45 – 350 мкм, для сталі Х12 – 225 мкм.

З метою виявлення впливу технологічних параметрів режимів іонного азотування в безводневих середовищах на зносостійкість сталей ШХ15, 45 і Х12 в модельному розчині ми проводили порівняльні дослідження зносу зразків на машині торцевого тертя (рис. 2.4).

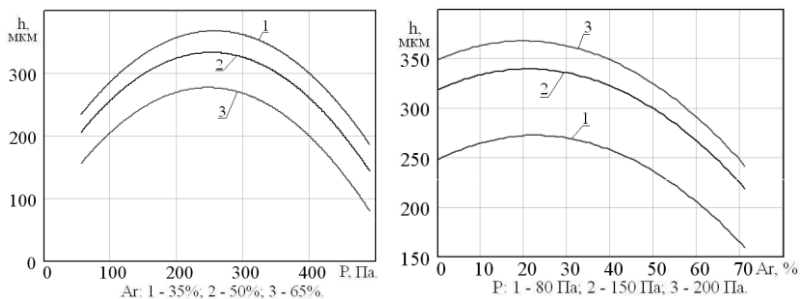
У таблицях 3.8–3.10 та на рис. 3.14–3.16 представлено результати експериментальних досліджень зносостійкості зразків із сталей ШХ15, 45 і Х12, що азотувалися за різними технологічними режимами (табл. 2.5) після попереднього гартування. Результати досліджень показали, що азотовані зразки мають значно вищу зносостійкість порівняно з гартованими зразками. Режими азотування мають великий вплив на знос та інтенсивність зношування зразків. Змінюючи технологічні параметри азотування, ми можемо змінювати трибологічні властивості азотованого шару в значних межах.

На рис. 3.14–3.16 наведено графіки інтенсивності зношування зразків залежно від шляху тертя. З рисунка видно, що є період припрацювання як гартованих, так і азотованих зразків величина і протяжність якого різні. Для азотованих зразків тривалість періоду припрацювання і величина інтенсивності зношування різні для різних режимів азотування,

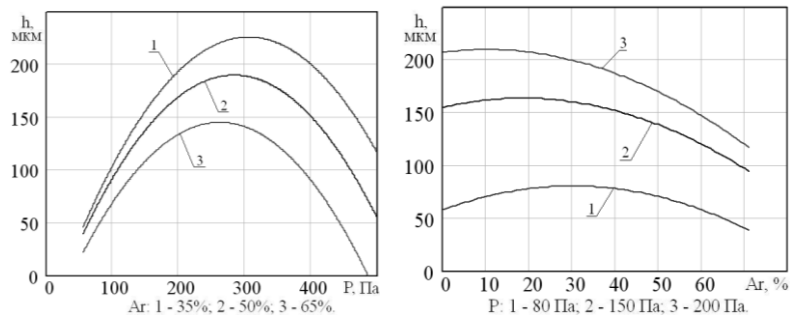
вони залежать від фазового складу поверхні азотованих шарів та менші порівняно з гартованими зразками.



a



б



в

**Рис. 3.13. Залежність товщини азотованого шару від технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневих середовищах сталей:
а – ШХ15; б – 45; в – X12**

Таблиця 3.8

**Результати експериментальних досліджень зносу сталі ШХ15
після азотування за різними режимами**

№ режиму	Шлях тертя $L \cdot 10^3$, м											
	0,27	0,54	0,81	1,1	1,6	2,2	2,7	3,3	3,8	4,3	4,9	5,4
	Знос, мкм											
1	16	26	35	44	62	81	101	121	142	164	187	212
2	9	15	19	24	36	48	61	75	90	106	124	145
3	11	18	24	31	44	58	73	90	110	135	160	185
4	6	11	15	19	27	35	45	55	67	80	95	112
5	14	23	30	38	54	71	88	105	124	145	170	195
6	7,5	13	17	21	30	40	51	63	76	90	106	123
7	12	20	27	34	48	63	78	94	112	131	152	174
8	8,3	14	19	23	33	44	56	68,2	82	97	114	133
9	10	16	21,6	27,3	39	51	65	80	96	112	131	151
10	9,7	16,4	22	27,2	40	52	66	81	97	112	132	152
11	10,1	15,6	21	26	38	50	65	79	95	111	130	150
12	10,2	16	21,1	27	39,2	51	65	79,6	96	113	130	150
13	9,7	16,1	21,8	26,9	38,7	51	64,1	80,3	96	112	131	151
Г	25	45	61	75	100	125	150	175	200	225	250	275
	Інтенсивність зношування, $I \cdot 10^{-8}$											
1	5,9	3,69	3,32	3,32	3,41	3,46	3,63	3,69	3,87	4,05	4,24	4,61
2	3,32	2,21	1,77	1,88	2,05	2,21	2,4	2,58	2,76	2,95	3,32	3,87
3	4,05	2,65	2,36	2,36	2,4	2,58	2,76	3,13	3,69	4,61	4,61	4,61
4	2,21	1,84	1,47	1,47	1,47	1,55	1,77	1,84	2,21	2,39	2,76	3,13
5	5,16	3,32	2,84	2,84	2,87	3,13	3,13	3,26	3,37	3,87	4,61	4,61
6	2,76	2,03	1,47	1,47	1,66	1,84	2,03	2,21	2,4	2,58	2,95	3,13
7	4,42	2,99	2,54	2,58	2,63	2,71	2,82	2,93	3,28	3,5	3,87	4,05
8	3,06	2,1	1,84	1,69	1,86	1,9	2,21	2,25	2,54	2,76	3,13	3,5
9	3,68	2,21	2,06	2,1	2,16	2,21	2,58	2,76	2,95	3,06	3,39	3,69
10	3,61	2,44	2,06	1,92	2,36	2,21	2,58	2,76	2,95	2,76	3,69	3,69
11	3,72	2,03	1,99	2,14	2,08	2,25	2,84	2,45	2,95	2,95	3,5	3,69
12	3,76	2,13	1,88	2,17	2,25	2,28	2,47	2,69	3,02	3,15	3,26	3,65
13	3,58	2,36	2,1	1,87	2,17	2,27	2,41	2,98	2,95	2,93	3,48	3,72
Г	9,2	7,3	5,8	5,1	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61

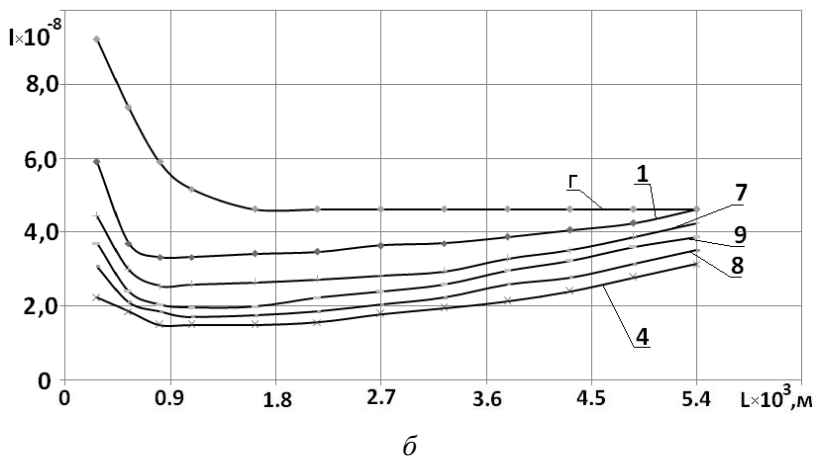
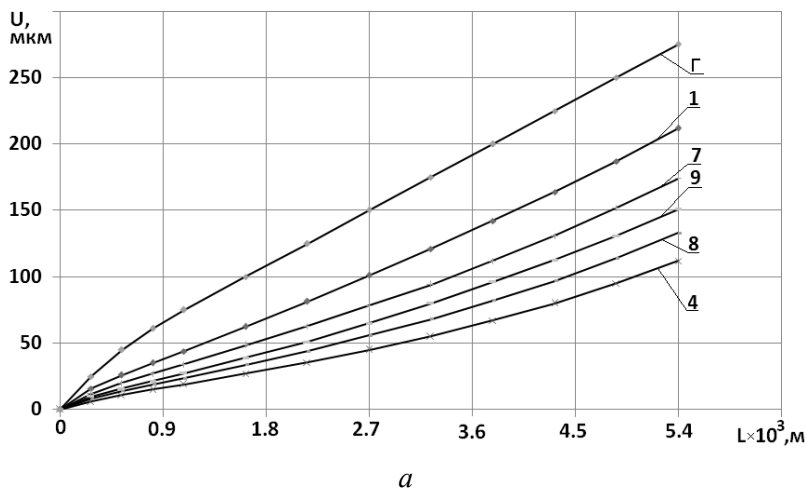
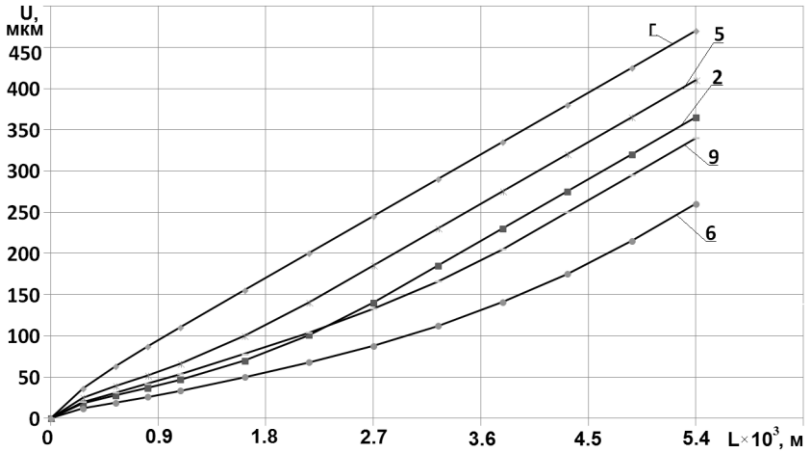


Рис. 3.14. Залежність зносу a та інтенсивності зношування b в модельному розчині сталі X15 після різних режимів іонного азотування: 1, 4, 7–9 – режими азотування; Γ – гартування (табл. 3.8)

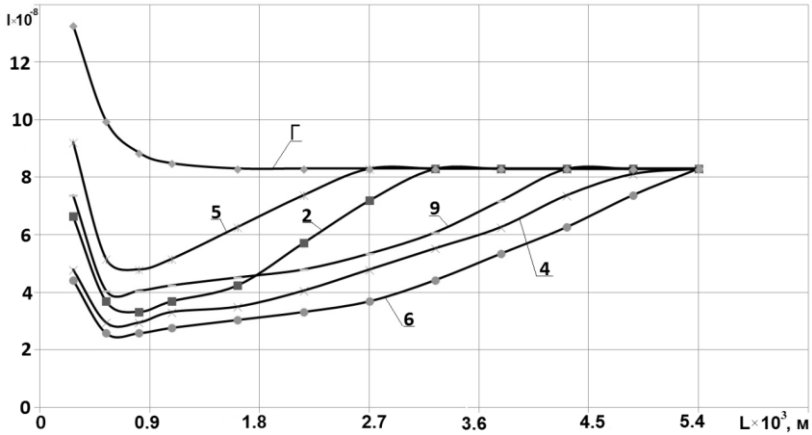
Таблиця 3.9

**Результати експериментальних досліджень зносу сталі 45 після
азотування за різними режимами**

№ режиму	Шлях тертя $L \cdot 10^3$, м											
	0,27	0,54	0,81	1,1	1,6	2,2	2,7	3,3	3,8	4,3	4,9	5,4
	Знос, мкм											
1	26	41	56	72	105	140	177	215	260	305	350	395
2	18	28	37	47	70	101	140	185	230	275	320	365
3	22	34	46	58	86	123	168	213	258	303	348	393
4	13	21	29	38	57	79	105	135	169	209	253	298
5	25	39	52	66	100	140	185	230	275	320	365	410
6	12	19	26	33,5	50	68	88	112	141	175	215	260
7	23	36	48	60	86	113	143	177	215	255	300	345
8	16	25	33	42	63	90	123	160	205	250	295	340
9	20	31	42	53,5	78	104	133	166	205	250	295	340
10	21	32	42	52	79	102	131	167	205	249	294	341
11	19	31	41	54	80	105	134	164	207	252	297	342
12	20	30	43	53	77	106	133	165	203	250	296	339
13	21	33	40	51	78	104	134	166	204	251	295	338
Г	36	63	87	110	155	200	245	290	335	380	425	470
Інтенсивність зношування, $I \cdot 10^{-8}$												
1	9,5	5,5	5,5	5,8	6,1	6,4	6,8	7,0	8,2	8,2	8,2	8,2
2	6,6	3,6	3,3	3,6	4,2	5,7	7,2	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
3	8,1	4,4	4,4	4,4	5,2	6,8	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
4	4,8	2,9	2,9	3,3	3,5	4,0	4,8	5,5	6,3	7,4	8,1	8,3
5	9,2	5,1	4,8	5,2	6,3	7,4	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
6	4,4	2,6	2,6	2,7	3,0	3,3	3,7	4,4	5,3	6,3	7,4	8,3
7	8,5	4,8	4,4	4,4	4,8	4,9	5,	6,3	7,0	7,4	8,3	8,3
8	5,9	3,3	2,9	3,3	3,9	4,9	6,18	6,8	8,3	8,3	8,3	8,3
9	7,4	4,1	4,1	4,2	4,5	4,8	5,3	6,1	7,2	8,3	8,3	8,3
10	7,7	4,1	3,7	3,7	4,9	4,2	5,3	6,6	7	8,1	8,3	8,3
11	7,0	4,4	3,7	4,8	4,8	4,6	5,3	5,5	7,9	8,3	8,3	8,3
12	7,4	3,7	4,8	3,8	4,4	5,3	4,9	5,9	7,0	8,3	8,3	8,3
13	7,7	4,4	2,6	4,1	4,9	5,0	5,5	6,0	7,0	8,0	8,1	8,3
Г	13,3	9,9	8,8	8,5	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3



a



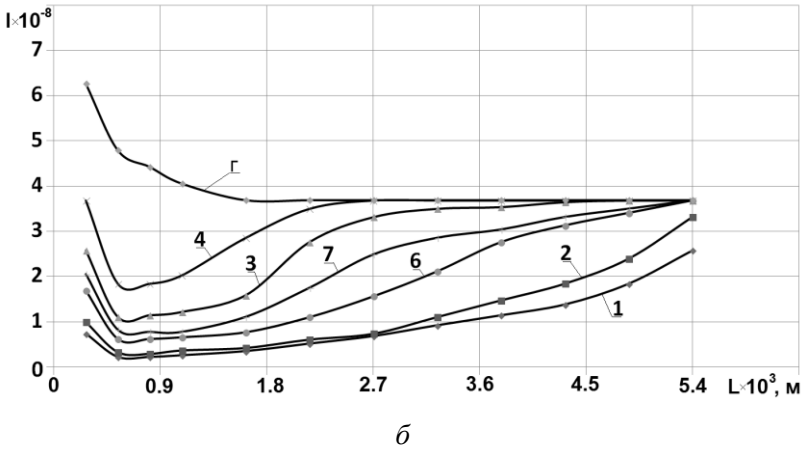
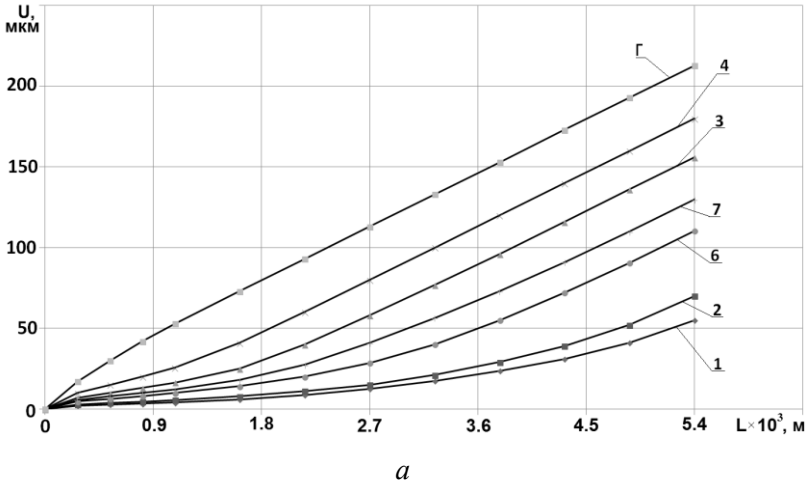
b

Рис. 3.15. Залежність зносу *a* та інтенсивності зношування *b* в модельному розчині сталі 45 після різних режимів іонного азотування: 2, 4–6, 9 – режими азотування; Γ – гартування (табл. 3.9)

Таблиця 3.10

Результати експериментальних досліджень зносу сталі Х12 після азотування за різними режимами

№ режиму	Шлях тертя $L \cdot 10^3$, м												
	0,27	0,54	0,81	1,1	1,6	2,2	2,7	3,3	3,8	4,3	4,9	5,4	
	Знос, мкм												
1	2	2,6	3,2	3,9	5,8	8,6	12,3	17,3	23,5	31	41	55	
2	2,7	3,6	4,4	5,4	7,7	11	15	21	29	39	52	70	
3	7	10	13	16	25	40	58	77	96,2	116	136	156	
4	10	15	20	26	41	60	80	100	120	140	160	180	
5	3,9	5,2	6,5	8	11	15	20	30	46	65	85	105	
6	4,6	6,3	8	9,8	14	20	28,5	40	55	72	90,5	110	
7	5,57	7,8	9,9	12	18	27,5	41	56,5	73	91	110	130	
8	9,2	13,1	17	21	34,5	53	73	93	113	133	153	173	
9	6,88	9,6	12	15,1	22	33	50	68	87	107	127	147	
10	6,56	9	12	15	22,3	32	49	67	87,3	106	126	146	
11	6,2	9,3	12	14	21,8	32,5	50	67,6	88	105	128	148	
12	7	10	12	15	22	33,5	51	68,2	86,2	108	127	149	
13	6,9	9,5	12	16	22,4	33,2	50,6	68	86,7	106	126	145	
Г	17	30	42	53	73	93	113	133	153	173	193	213	
	Інтенсивність зношування, $I \cdot 10^{-8}$												
1	0,7	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,8	2,6	
2	1,0	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	1,1	1,5	1,8	2,4	3,3	
3	2,6	1,1	1,1	1,2	1,6	2,8	3,3	3,5	3,5	3,6	3,7	3,7	
4	3,7	1,8	1,8	2,0	2,9	3,5	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	
5	1,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,7	0,9	1,8	2,9	3,5	3,7	3,7	
6	1,7	0,6	0,6	0,7	0,8	1,1	1,6	2,1	2,8	3,1	3,4	3,7	
7	2,1	0,8	0,8	0,8	1,1	1,8	2,5	2,9	3,0	3,3	3,5	3,7	
8	3,4	1,4	1,4	1,7	2,4	3,4	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	
9	2,5	1,0	0,9	1,1	1,3	2,0	3,1	3,3	3,5	3,7	3,7	3,7	
10	2,4	0,9	1,1	1,1	1,3	1,8	3,1	3,3	3,7	3,4	3,7	3,7	
11	2,3	1,1	1,2	0,5	1,4	2,0	3,2	3,2	3,8	3,1	4,2	3,7	
12	2,6	1,1	0,7	1,3	1,2	2,1	3,2	3,2	3,3	4,0	3,6	3,7	
13	2,5	0,9	1,0	1,4	1,2	2,0	3,2	3,2	3,4	3,6	3,7	3,7	
Г	6,3	4,8	4,4	4,1	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	



**Рис. 3.16. Залежність зносу a та інтенсивності зношування b в модельному розчині сталі X12 після різних режимів іонного азотування:
1–4, 6–7 – режими азотування; Γ – гартування (табл. 3.10)**

У період нормального зношування інтенсивність зносу гартованих зразків є постійною величиною, тоді як для азотованих зразків ця величина змінна в зв'язку зі зміною властивостей по товщині азотованого шару. Це наочно показано на рис. 3.14–3.16, з яких видно, що інтенсивність зносу азотованих шарів зростає зі збільшенням шляху тертя і поступово наближається до інтенсивності зносу основи.

З рис. 3.14 видно, що для сталі ШХ15 (режим 1 та 4) величина зносу після шляху тертя $5,4 \cdot 10^3$ м становила 212 та 112 мкм відповідно, тобто, знос за режимом азотування 4 в 1,9 рази менший порівняно з режимом 1 і в 2.5 рази менший в порівняно з гартованими зразками.

З рис. 3.15 видно, що для сталі 45 (режим 5 та 6) величина зносу після шляху тертя $5,4 \cdot 10^3$ м становила 410 та 260 мкм відповідно, тобто, знос за режимом азотування 6 в 1,6 рази менший порівняно з режимом 5 і в 1.8 рази менший порівняно з гартованими зразками.

З рис. 3.16 видно, що для сталі Х12 (режим 4 та 1) величина зносу після шляху тертя $5,4 \cdot 10^3$ м становила 180 та 55 мкм відповідно, тобто, знос за режимом азотування 1 в 3,3 рази менший порівняно з режимом 4 і в 3,8 рази менший в порівнянні з гартованими зразками.

Аналіз зносостійкості зразків досліджуваних сталей після іонного азотування за різними режимами показує, що зносостійкість відрізняється від 1.9 до 3.3 рази. Це можна пояснити наявністю на поверхні зразків різних нітридних фаз з різною концентрацією по товщині азотованого шару. Зокрема в зразках, що мали вищу зносостійкість, на поверхні виявлено переважаючі ϵ - та γ' -фази, а на зразках, що мали меншу зносостійкість, на поверхні концентрація цих фаз була не значною (до 1 %) і переважав твердий розчин азоту в залізі.

На основі результатів досліджень, що наведені в таблицях 3.8–3.10, відповідно до двох факторного рототабельного плану (розд. 2) отримані емпіричні математичні залежності зносу від технологічних параметрів іонного азотування (вмісту аргону в насичуючому середовищі та тиску в вакуумній камері), що

описуються регресивними рівняннями для сталей ШХ15 (3.3), 45 (3.4) та Х12 (3.5).

$$U = 147,7 - 34X_1 + 51X_2 - 2,25X_1X_2 - 1,3(X_1)^2 + 24,5(X_2)^2, \quad (3.3)$$

$$U = 342,3 - 39,3X_1 + 76,4X_2 - 15,7X_1X_2 - 5,3(X_1)^2 + 25(X_2)^2, \quad (3.4)$$

$$U = 87,7 - 33,5X_1 - 6,6X_2 + 2X_1X_2 - 0,5(X_1)^2 + 22,2(X_2)^2. \quad (3.5)$$

На основі рівнянь (3.3) – (3.5) побудовано графіки залежності зносу від технологічних параметрів процесу іонного азотування досліджуваних сталей (рис. 3.17).

З графіків (рис. 3.17) видно, що мінімальний знос для сталі ШХ15 досягається при тиску в вакуумній камері 80 Па і об'ємному вмісту аргону 33–37 %, для сталі 45 – при тиску 200 Па і 30 – 33 % Ar, для сталі Х12 – тиск 200 Па і 52 – 55 % Ar.

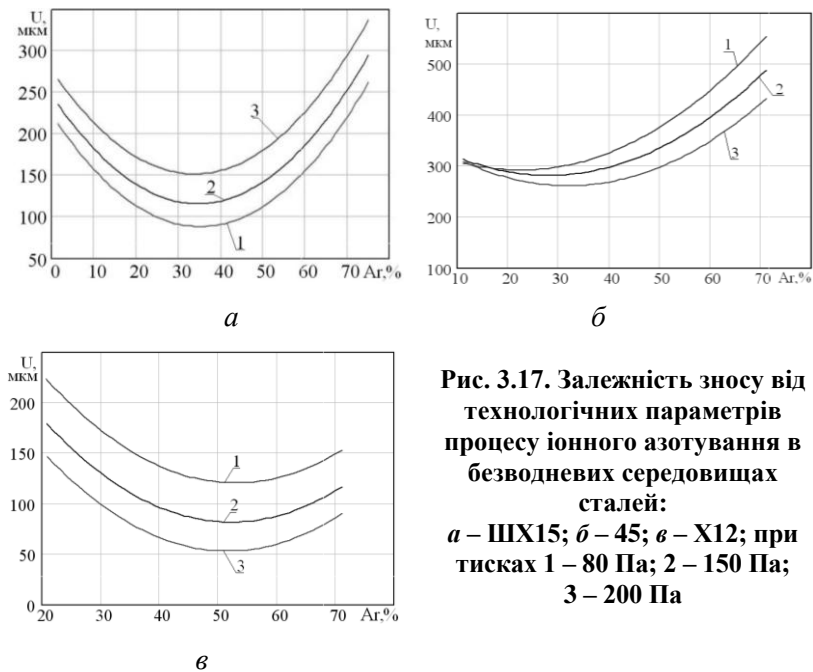


Рис. 3.17. Залежність зносу від технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневих середовищах сталей:

***a* – ШХ15; *б* – 45; *в* – Х12; при тисках 1 – 80 Па; 2 – 150 Па; 3 – 200 Па**

Таким чином, оптимальними режимами іонного азотування в межах проведених експериментів за критерієм максимальної

зносостійкості для досліджуваних сталей будуть наступні режими: ШХ15 – $T = 570\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 240\text{ хв}$, $P = 80\text{ Па}$, $\text{Ar}\% = 35\%$; 45 – $T = 570\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 240\text{ хв}$, $P = 200\text{ Па}$, $\text{Ar}\% = 32\%$; X12 – $T = 570\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 240\text{ хв}$, $P = 200\text{ Па}$, $\text{Ar}\% = 53\%$.

На рис. 3.18 наведено залежності зносу та інтенсивності зношування в модельному розчині сталей ШХ15, 45 та X12 після зміцнення методом іонного азотування за оптимальними режимами та сталі X12 зміцненої методом нітрогартування.

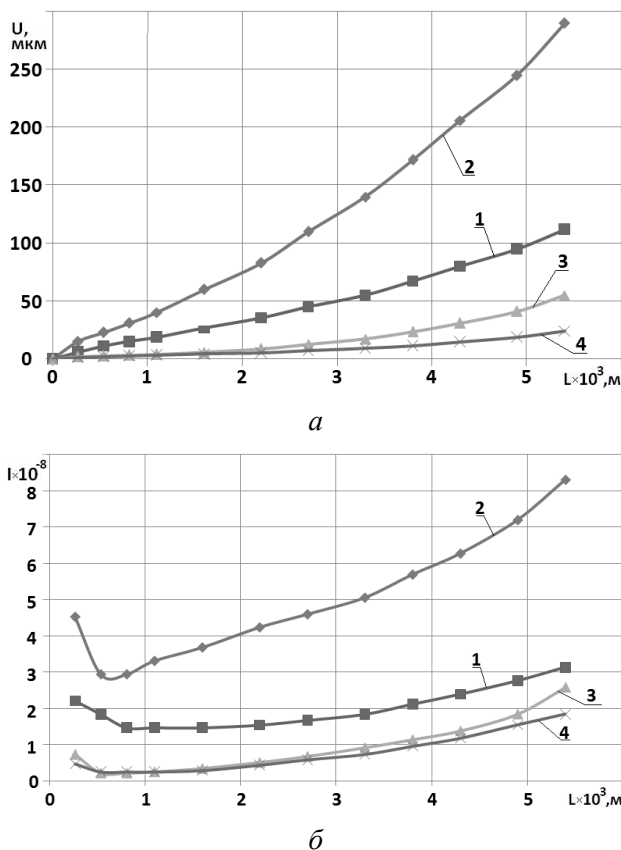


Рис. 3.18. Залежність зносу *a* та інтенсивності зношування *б* в модельному розчині сталей після оптимальних режимів іонного азотування (1–3) та нітрогартування: 1 – сталь ШХ15; 2 – сталь 45; 3 – сталь X12; 4 – X12 нітрогартувана

З рис. 3.18 видно, що максимальну зносостійкість серед сталей, азотованих за оптимальними режимами, має сталь X12. Це обумовлено не тільки наявністю нітридів заліза в поверхневому шарі, але і наявністю в структурі сталі значної кількості (12%) хрому, яка сприяла утворенню нітридів хрому і більшій товщині нітридного шару порівняно із сталями 45 та ШХ15 (рис. 3.4). Найвищу зносостійкість мали зразки із сталі X12 після нітрогартування, величина зносу яких після шляху тертя $5.4 \cdot 10^3$ м в 2 рази менша порівняно з азотованими зразками і становить 24 мкм. Це можна пояснити наявністю на поверхні нітридного шару та оптимальної кількості азотистого залишкового аустеніту в структурі матеріалу.

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНОК ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛІВ В АБРАЗИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

4.1. Розрахунок зносостійкості і довговічності конструктивних елементів з метастабільними фазами в структурі матеріалів

Багато вчених у своїх дослідженнях [43–45, 87, 96, 137] довели, що зносостійкість чистих металів та багатьох сплавів зі стабільною структурою в абразивному середовищі при відсутності в структурі метастабільних фаз прямо пропорційна їх твердості. В літературі [87, 138–142] наведено формули для розрахунку величини зносу та інтенсивності зношування в абразивному середовищі таких матеріалів. Проте, до цього часу не має формули для розрахунку цих трибологічних характеристик для матеріалів, що містять в своїй структурі метастабільні фази.

Відомо [96, 137, 144], що наявність метастабільних фаз, зокрема залишкового аустеніту, в структурі матеріалу приводить до зменшення інтенсивності його зношування в абразивному середовищі за рахунок структурних перетворень метастабільних фаз, в процесі яких поглинається частина енергії активації поверхні тертя і утворюється наклеп. При цьому, як показано в розділі 3, залежність інтенсивності зношування від процентного вмісту залишкового аустеніту в структурі матеріалу має параболічну залежність і його вплив на характеристики зношування є суттєвим, що необхідно враховувати при розрахунку цих характеристик.

Відомі формули для визначення інтенсивності зношування однорідних матеріалів з стабільною структурою в абразивному середовищі, які описані в роботах [87, 132, 138–139].

У роботах Ю.Н. Дроздова [141–143] доведено, що у випадку механічного зношування поверхонь доцільно для визначення інтенсивності зношування використовувати залежності у вигляді добуток комплексів:

$$J_{hm} = k_m \cdot P_a^{x_1} \cdot P_{cm}^{y_1} \cdot P_y^{z_1} \cdot P_{ui}^{\gamma_1}, \quad (4.1)$$

де k_m , x_1 , y_1 , z_1 , γ_1 – величини, що визначаються експериментально.

Комплекс:

$$П_a = \frac{P}{НВ} \text{ або } \frac{f \cdot P}{НВ}, \quad (4.2)$$

де P – тиск; $НВ$ – твердість матеріалу; f – коефіцієнт тертя ковзання.

Комплекс характеризує напружений стан контакту і безрозмірну площу дотику тіл.

Комплекс:

$$П_{cm} = \frac{h}{\chi}, \quad (4.3)$$

де h – товщина мастильного шару; χ – діаметр абразивної частинки, що ріже. Визначає відносну товщину мастильного шару.

Комплекс:

$$П_y = \frac{\xi \cdot P}{\sigma_0}, \quad (4.4)$$

де P – тиск; ξ – коефіцієнт, що залежить від коефіцієнта тертя f і напруженого стану в контактї; σ_0 – границя втоми матеріалу в даних умовах тертя. Характеризує втомну міцність поверхонь тертя.

Комплекс:

$$П_u = \frac{R_{\max}}{r \cdot b_1^{1/v_1}}, \quad (4.5)$$

де R_{\max} – найбільша висота нерівностей профілю; r – приведений радіус нерівностей; b_1 , v_1 – параметри опорної кривої. Комплекс визначає вплив шорсткості на знос.

Побудову багатофакторної узагальнюючої моделі абразивного зношування в умовах роботи екструдера для переробки фуражного зерна з домішками мінералів проводимо відповідно до методу теорії подібності та розмінностей (ТПР) у такій послідовності:

На першому етапі складаємо перелік всіх величин з їх розмінностями. Великоною, яку потрібно визначити, є

інтенсивність зносу: $\frac{dU}{dL} = J_M$, де U знос в мкм, L шлях тертя в мкм.

Визначальними величинами, або основними факторами, що впливають на абразивне зношування, є:

P_{\max} – максимальний тиск у матеріальному циліндрі, МПа;

f – коефіцієнт тертя ковзання;

δ – зазор між шнеком і циліндром, мкм;

χ – діаметр ріжучої абразивної частинки, мкм;

A – процентний вміст залишкового аустеніту в матеріалі, %;

H_a – мікротвердість абразиву, МПа;

H_m – мікротвердість матеріалу, МПа;

T_e – температура екструдювання, °С;

T_f – температура гартування, °С.

На другому етапі ПТР з визначальних величин і тих, які потрібно визначити складаємо безрозмірні комплекси. В нашому випадку для врахування умов роботи екструдера при переробці фуражного зерна з домішками мінералів, які містять абразивні частинки, інтенсивність зношування можна виразити в вигляді добутку наступних комплексів:

$$\frac{dU}{dL} = J_M = k_w \cdot \Pi_M^{x_1} \cdot \Pi_{cm}^{y_1} \cdot \Pi_A^{n_1} \cdot \Pi_H^{m_1} \cdot \Pi_T^{z_1}, \quad (4.6)$$

де $k_w, x_1, y_1, n_1, m_1, z_1$ – коефіцієнти, які визначаються з експерименту з урахуванням умов експлуатації;

Комплекс:

$$\Pi_M = \frac{P_{\max} \cdot f}{H_{100}}, \quad (4.7)$$

який характеризує напружений стан контакту і безрозмірну площу дотику тіл.

Комплекс:

$$\Pi_{cm} = \frac{\delta}{\chi}, \quad (4.8)$$

який враховує вплив величини зазору і розміри абразиву.

Безрозмірний комплекс:

$$P_A = a \cdot A^2 + b \cdot A + c = K_A, \quad (4.9)$$

де a , b , c – коефіцієнти, які потрібно знаходити для кожного матеріалу з експерименту на зношування; K_A – коефіцієнт, що враховує вплив вмісту залишкового аустеніту в структурі матеріалу на знос (параболічна залежність, розділ 3, рис. 3.5, 3.7).

Комплекс:

$$P_H = \frac{H_a}{H_M} = K_H, \quad (4.10)$$

K_H – коефіцієнт, який враховує вплив твердості абразиву і матеріалу на зношування.

Комплекс:

$$P_T = \frac{T_e}{T_\Gamma} = K_T, \quad (4.11)$$

K_T – коефіцієнт, який враховує вплив температури на зношування.

На третьому етапі методу ТПР із експерименту встановлюємо залежності між безрозмірними комплексами, що виконують роль критеріїв подібності:

$$J_M = k_w \cdot \left(\frac{P_{\max} \cdot f}{H_{100}} \right)^{x_1} \cdot \left(\frac{\delta}{\chi} \right)^{y_1} \cdot K_A^{n_1} \cdot \left(\frac{H_a}{H_M} \right)^{m_1} \cdot \left(\frac{T_e}{T_\Gamma} \right)^{z_1}. \quad (4.12)$$

Для умов абразивного зношування $x_1=1$ [87]; для уникнення заїдання між шнеком і циліндром конструктивно приймаємо $\delta = \chi$; згідно з [123] $n_1=1$; $m_1=0,85$ і $z_1=0,2$ для сталі X12 відповідно до даних [144]. Тоді:

$$J_H = k_w \cdot \left(\frac{P_{\max} \cdot f}{H_n} \right) \cdot K_A \cdot K_H^{0,85} \cdot K_T^{0,2}, \quad (4.13)$$

З метою визначення k_w використаємо залежності [87]:

$$V = k_w \cdot \frac{F \cdot L}{H_M}, \quad (4.14)$$

де V – об'єм зношеного матеріалу; F – сила тертя.

$$F = P_{\max} \cdot L \cdot S, \quad (4.15)$$

де S – площа тертя.

З урахуванням формул (4.14) і (4.15)

$$U = \frac{V}{S} = k_w \cdot \frac{F \cdot L}{H_M \cdot S} = k_w \cdot \frac{P_{\max} \cdot f \cdot L}{H_M}. \quad (4.16)$$

Згідно з (4.16) коефіцієнт k_w знаходимо за формулою:

$$k_w = \frac{U_1 \cdot H_M}{P_{\max} \cdot f \cdot L_1}. \quad (4.17)$$

З експерименту, знаючи U_1 , L_1 за формулою (4.17) знаходимо k_w .

Для матеріалів з однаковими властивостями по глибині інтенсивність їх зношування є постійною величиною. Тому довговічність D деталі з таких матеріалів можна виразити: в лінійних одиницях шляху тертя:

$$D_L = \frac{U}{J_M}, \text{ м}, \quad (4.18)$$

або в годинах

$$D_T = \frac{U}{3.6 \cdot 10^3 \cdot V \cdot J_M}, \text{ год}, \quad (4.19)$$

де U – допустимий знос в парі тертя, м;

J_M – інтенсивність зношування поверхні тертя;

V – швидкість ковзання, м/с.

4.2. Розрахунок зносостійкості та довговічності конструктивних елементів з метастабільними фазами в структурі матеріалів і градієнтними дифузійними покриттями

З метою підвищення зносостійкості та довговічності конструктивних елементів при терті та зношуванні широко застосовують методи хіміко-термічної обробки – азотування,

цементацію, борування, карбонітрування тощо. У таких випадках на поверхні утворюються дифузійні градієнтні покриття з підвищеними трибологічними властивостями. Досвід експлуатації конструктивних елементів при терті в абразивному середовищі показує, що найбільш ефективним методом хіміко-термічної обробки є азотування в тліючому розряді [71, 72, 76, 85, 111].

Азотовані шари складаються із нітридної зони зі стабільною структурою та твердістю і перехідної зони (зони внутрішнього азотування) зі змінною твердістю і концентрацією азоту по глибині, яка зменшується від поверхні до основи за експоненціальною залежністю (4.20) і залежить від технологічних параметрів процесу азотування [131] (рис. 4.1).

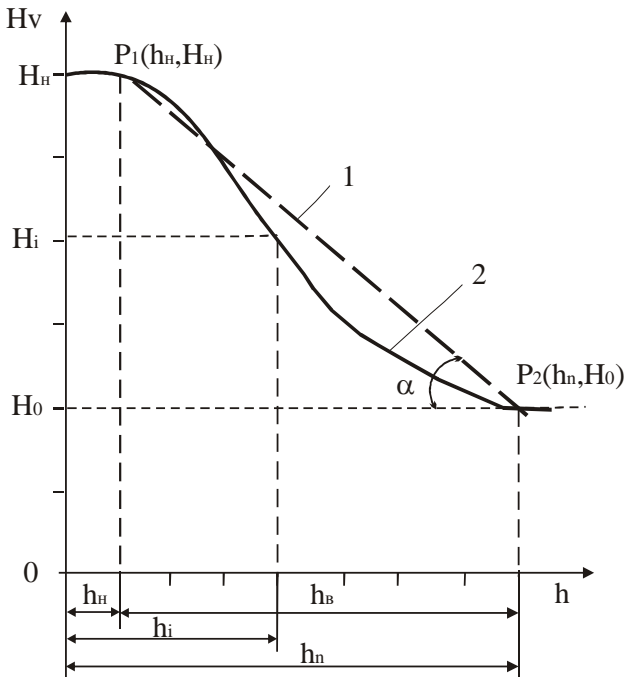


Рис. 4.1. Розподіл твердості по товщині азотованого шару:
1 – по лінійній залежності; 2 – по експоненціальній залежності

$$H_i = H_0 + (H_{\max} \cdot k_4 - H_0) \cdot e^{\frac{h_i}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (h_n - h_i)}}, \quad (4.20)$$

де H_0 – твердість основи;

H_{\max} – твердість поверхні азотованого шару при оптимальному режимі азотування;

H_i – твердість i -го шару на відстані h_i від поверхні;

h_n – товщина азотованого шару, що складається з суми товщини нітридної зони h_n і зони внутрішнього азотування h_g ;

k_1, k_2, k_3, k_4 – коефіцієнти, що залежать від технологічних параметрів азотування (температури, тиску, складу середовища і часу дифузійного насичення).

Середнє значення твердості зони внутрішнього азотування можна знайти за формулою:

$$H_c = \frac{\int_0^{h_g} H_i dh}{h_n - h_n}, \quad (4.21)$$

де h_n і h_g – товщини нітридної зони і зони внутрішнього азотування відповідно;

H_i – твердість азотованого шару на відстані h_i від поверхні (рис.4.1).

У випадку, коли зміну твердості по глибині зони внутрішнього азотування апроксимувати лінійною залежністю твердості від товщини h_g (рис. 4.1) середнє значення твердості зони внутрішнього азотування H_c було визначено за формулою:

$$H_c = \frac{H_n + H_0}{2}. \quad (4.22)$$

Враховуючи особливості азотованих шарів, які мають нітридну зону, зону внутрішнього азотування та містять залишковий аустеніт, що одержуються в результаті нітрогартування, багатофакторну узагальнюючу модель абразивного зношування відповідно з ТПР проводимо в аналогічній послідовності підрозділу 4.1 для кожної із зон азотованого шару.

На першому етапі складаємо перелік всіх визначальних і тих, які потрібно визначити, величин з їх розмінностями. Величинами, які потрібно визначити, будуть: інтенсивність

зношування нітридної зони – $\frac{dU_n}{dL_n} = J_n$ та інтенсивність

зношування зони внутрішнього азотування $\frac{dU_e}{dL_e} = J_e$, де – U_n і L_n

знос і шлях тертя в нітридній зоні (мкм), U_e і L_e знос і шлях тертя в зоні внутрішнього азотування (мкм).

Визначальними величинами, або основними факторами, що впливають на абразивне зношування є:

P_{max} – максимальний тиск у матеріальному циліндрі, МПа;

f – коефіцієнт тертя ковзання;

δ – зазор між шнеком і циліндром, мкм;

χ – діаметр ріжучої абразивної частинки, мкм;

A – процентний вміст залишкового аустеніту в матеріалі, %;

H_a – мікротвердість абразиву, МПа;

T_e – температура екструдуювання, °С;

T_z – температура гартування, °С;

H_n – мікротвердість нітридної зони, МПа;

H_e – мікротвердість зони внутрішнього азотування, МПа;

H_o – мікротвердість основи, МПа;

H_c – середнє значення мікротвердості зони внутрішнього азотування, МПа.

На другому етапі ПТР з визначальних величин і тих, які потрібно визначити, складаємо безрозмірні комплекси. У нашому випадку для врахування умов роботи екструдера при переробці фуражного зерна з домішками мінералів, які містять абразивні частинки, інтенсивність зношування для кожної із зон можна виразити у вигляді добутку наступних комплексів:

$$\frac{dU_n}{dL_n} = J_n = k_{wh} \cdot \Pi_n^{x_1} \cdot \Pi_{cm}^{y_1} \cdot \Pi_A^{m_1} \cdot \Pi_{Hn}^{n_1} \cdot \Pi_T^{z_1}, \quad (4.23)$$

$$\frac{dU_{\epsilon}}{dL_{\epsilon}} = J_{\epsilon} = k_{w\epsilon} \cdot \Pi_{\epsilon}^{x_1} \cdot \Pi_{cm}^{y_1} \cdot \Pi_A^{n_1} \cdot \Pi_{H\epsilon}^{m_1} \cdot \Pi_T^{z_1}, \quad (4.23a)$$

де $k_{w\epsilon}$, k_{wh} , x_1 , y_1 , n_1 , m_1 , z_1 – коефіцієнти, які визначаються з експерименту з урахуванням умов експлуатації.

Комплекси:

$$\Pi_H = \frac{P_{\max} \cdot f}{H_H}; \quad (4.24)$$

$$\Pi_{\epsilon} = \frac{P_{\max} \cdot f}{H_c}, \quad (4.24a)$$

які характеризують напружений стан контакту і безрозмірну площу дотику тіл.

Комплекси Π_{cm} , Π_A , Π_H , Π_T описано формулами: (4.8), (4.9), (4.10), (4.11).

На третьому етапі методу ТПР із експерименту встановлюємо залежності між безрозмірними комплексами, що виконують роль критеріїв подібності:

$$J_H = k_{wh} \cdot \left(\frac{P_{\max} \cdot f}{H_H} \right)^{x_1} \cdot \left(\frac{\delta}{\chi} \right)^{y_1} \cdot K_A^{n_1} \cdot \left(\frac{H_a}{H_H} \right)^{m_1} \cdot \left(\frac{T_e}{T_T} \right)^{z_1}, \quad (4.25)$$

$$J_{\epsilon} = k_{w\epsilon} \cdot \left(\frac{P_{\max} \cdot f}{H_c} \right)^{x_1} \cdot \left(\frac{\delta}{\chi} \right)^{y_1} \cdot K_A^{n_1} \cdot \left(\frac{H_a}{H_c} \right)^{m_1} \cdot \left(\frac{T_e}{T_T} \right)^{z_1}. \quad (4.25a)$$

Для умов абразивного зношування $x_1=1$ [87]; для уникнення заїдання між шнеком і циліндром конструктивно приймаємо $\delta = \chi$; згідно з [123] $n_1=1$; $m_1=0,8$ і $z_1=0,1$ для сталі X12 відповідно до даних [144]. Тоді:

$$J_H = k_{wh} \cdot \left(\frac{P_{\max} \cdot f}{H_H} \right) \cdot K_A \cdot K_{H_H}^{0,85} \cdot K_T^{0,2}, \quad (4.26)$$

$$J_{\epsilon} = k_{w\epsilon} \cdot \left(\frac{P_{\max} \cdot f}{H_c} \right) \cdot K_A \cdot K_{H\epsilon}^{0,85} \cdot K_T^{0,2}. \quad (4.26a)$$

Коефіцієнти k_{wh} , k_{wg} знаходимо за аналогією до формули (4.17):

$$k_{wh} = \frac{U_{1n} \cdot H_n}{P_{\max} \cdot f \cdot L_{1n}}; \quad (4.27)$$

$$k_{wg} = \frac{U_{1g} \cdot H_c}{P_{\max} \cdot f \cdot L_{1g}}, \quad (4.27a)$$

де – U_n (мкм) знос в нітридній зоні на шляху L_n (мкм); U_g (мкм) – знос у зоні внутрішнього азотування на шляху тертя L_g (мкм). З експерименту, знаючи U_{1n} , L_{1n} , U_{1g} , L_{1g} за формулами (4.27) і (4.27a) знаходимо k_{wh} і k_{wg} .

Для матеріалів з градієнтними покриттями інтенсивність їх зношування є змінною величиною. Тому довговічність D покриттів можна виразити: у лінійних одиницях шляху тертя D_L :

$$D_L = \frac{h_n}{J_n} + \frac{h_g}{J_g}, \text{ м}, \quad (4.28)$$

або в годинах D_G :

$$D_G = \frac{1}{3.6 \cdot 10^3 \cdot V} \cdot \left(\frac{h_n}{J_n} + \frac{h_g}{J_g} \right), \text{ год}, \quad (4.28a)$$

де V – швидкість ковзання, м/с;

h_n і h_g – товщини нітридної зони і зони внутрішнього азотування виражені в метрах.

У випадку, коли величина допустимого зносу h більша за товщину азотованого шару, довговічність деталі розраховуємо за наступними залежностями:

$$D_L = \frac{h_n}{J_n} + \frac{h_g}{J_g} + \frac{h - h_n - h_g}{J_o}, \text{ м}, \quad (4.29)$$

або в годинах D_G :

$$D_T = \frac{1}{3.6 \cdot 10^3 \cdot V} \cdot \left(\frac{h_n}{J_n} + \frac{h_e}{J_e} + \frac{h - h_n - h_e}{J_o} \right), \text{ год, (4.29a)}$$

де J_o – інтенсивність зношування основи матеріалу.

4.3. Теоретико-експериментальна методика розрахунку трибологічних характеристик і довговічності конструктивних елементів та приклади її застосування

Для розрахунку трибологічних характеристик і довговічності конструктивних елементів з градієнтними покриттями і метастабільними фазами в структурі матеріалу рекомендується наступна методика.

Відповідно до методу теорії подібності і розмінностей (ТПР) розрахунки проводимо в такій послідовності:

1. Складаємо перелік величин, які потрібно визначити, з їх розмінностями. Для матеріалів без покриттів величиною, яку

потрібно визначити, буде інтенсивність зносу: $\frac{dU}{dL} = J_M$, де U знос

в мкм, L шлях тертя в мкм. Для матеріалів з градієнтними покриттями, одержаних методом азотування, величинами, які потрібно визначити, будуть: інтенсивність зносу нітридної зони –

$\frac{dU_n}{dL_n} = J_n$ та інтенсивність зносу зони внутрішнього азотування

$\frac{dU_e}{dL_e} = J_e$, де – U_n і L_n знос і шлях тертя в нітридній зоні (мкм), U_e ,

і L_e знос і шлях тертя в зоні внутрішнього азотування (мкм).

2. Складаємо перелік визначальних величин, або основних факторів, що впливають на абразивний знос, з їх розмінностями. З умов експерименту визначаємо тиск P_{\max} , коефіцієнт тертя ковзання f , температури гартування T_T і зношування T_e , величину зазору δ і розміри абразивних частинок χ та їх твердість H_a . На основі металографічних досліджень експериментальних зразків знаходимо: процентний вміст залишкового аустеніту в матеріалі,

мікротвердість нітридної зони H_n , середню мікротвердість зони внутрішнього азотування H_c , мікротвердість основи H_0 .

3. З визначальних величин і тих, які потрібно визначити, складаємо безрозмірні комплекси.

4. Із експерименту встановлюємо залежності між безрозмірними комплексами, які виконують роль критеріїв подібності, а саме:

– для випадку відсутності покриттів залежності (4.6);

– для випадку наявності градієнтних покриттів (азотованого шару) залежності (4.23) та (4.23a).

5. Задавшись базовими значеннями визначальних величин, проводимо випробування на знос, на основі яких та даних з інших наукових праць знаходимо коефіцієнти k_{wg} , k_{wn} , k_w , x_1 , y_1 , n_1 , m_1 , z_1 та інтенсивність зношування поверхні тертя:

– для випадку відсутності покриттів залежності (4.12);

– для випадку наявності градієнтних покриттів (азотованого шару) залежності (4.26) та (4.26a).

6. Задавшись величиною допустимого зносу, знаходимо довговічність конструктивних елементів, зміцнених за даними технологіями, відповідно до залежностей: (4.18), (4.19), (4.28), (4.28a), (4.29), (4.29a).

Далі наведено приклади розрахунку інтенсивності зношування і довговічності в модельному середовищі азотованого шару після гартування від температури 1050 °C і нітрогартування (азотування режим 2 табл. 2.5 гартування від температури 1050 °C) сталі X12.

1. Розрахунок зносостійкості та довговічності гартованої сталі X12.

Вихідні дані для розрахунку: $P_{\max} = 5$ МПа; $f = 0,15$; $H_m = H_{100} = 6700$ МПа; $H_a = 13500$ МПа; $T_e = 160$ °C; $T_r = 1050$ °C; $A = 55$ %; $U_1 = 33$ мкм; $L_1 = 3000$ м.

Для гартованої сталі X12 у цих умовах випробувань згідно з (4.9), (4.10), (4.11), (4.17), (4.13):

$$K_A = 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot 55^2 - 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 55 + 1 = 0,6;$$

$$K_H = \frac{13500}{6700} = 2,015;$$

$$K_T = \frac{160}{1050} = 0,152;$$

$$k_w = \frac{33 \cdot 6700}{5 \cdot 0,15 \cdot 3 \cdot 10^9} = 9,8 \cdot 10^{-5};$$

$$J_M = 9,8 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{5 \cdot 0,15}{6700} \right) \cdot 0,6 \cdot 2,015^{0,85} \cdot 0,152^{0,2} = 0,99 \cdot 10^{-8}.$$

Експериментальними дослідженнями встановлено $J_M = 1,1 \cdot 10^{-8}$. Різниця між розрахунковими та експериментальними даними – 12 %.

Довговічність деталі із сталі Х12 після гартування від температури 1050 °С при допустимому зносі деталі $h = 200$ мкм відповідно до залежностей (4.18) і (4.19) становить:

$$D_L = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{0,99 \cdot 10^{-8}} = 2,02 \cdot 10^4 \text{ м, або}$$

$$D_T = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{3,6 \cdot 10^3 \cdot 0,84 \cdot 0,99 \cdot 10^{-8}} = 6,6 \text{ год.}$$

2. Розрахунок зносостійкості та довговічності нітрогатованої сталі Х12.

Вихідні дані для розрахунку: $P_{\max} = 5$ МПа; $f = 0,15$; $H_n = 8100$ МПа; $H_c = 7400$ МПа; $H_a = 13500$ МПа; $T_e = 160$ °С; $T_T = 1050$ °С; $A = 55$ %; $U_n = 10$ мкм; $L_n = 3000$ м; $U_e = 14$ мкм; $L_e = 3000$ м.

Для нітрогатованої сталі Х12 у цих умовах випробувань згідно з (4.9), (4.11), (4.25), (4.25а), (4.27), (4.27а), (4.26), (4.26а):

$$K_A = 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot 55^2 - 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 55 + 1 = 0,6;$$

$$K_{Hn} = \frac{13500}{8100} = 1,67;$$

$$K_{He} = \frac{13500}{7400} = 1,82;$$

$$K_T = \frac{160}{1050} = 0,152 ;$$

$$k_{\text{вн}} = \frac{10 \cdot 8100}{5 \cdot 0,15 \cdot 3 \cdot 10^9} = 3,6 \cdot 10^{-5} ;$$

$$k_{\text{вг}} = \frac{14 \cdot 7400}{5 \cdot 0,15 \cdot 3 \cdot 10^9} = 4,6 \cdot 10^{-5} ;$$

$$J_H = 3,6 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{5 \cdot 0,15}{8100} \right) \cdot 0,6 \cdot 1,67^{0,85} \cdot 0,152^{0,2} = 0,26 \cdot 10^{-8} ;$$

$$J_e = 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{5 \cdot 0,15}{7400} \right) \cdot 0,6 \cdot 1,82^{0,85} \cdot 0,152^{0,2} = 0,39 \cdot 10^{-8} .$$

Експериментальними дослідженнями встановлено $J_H = 0,33 \cdot 10^{-8}$, $J_e = 0,45 \cdot 10^{-8}$. Різниця між розрахунковими та експериментальними даними становить 14–19 %.

Довговічність азотованого шару сталі Х12 після нітрогартування в умовах проведення експериментів становить:

$$D_L = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{0,26 \cdot 10^{-8}} + \frac{182 \cdot 10^{-6}}{0,39 \cdot 10^{-8}} = 5,067 \cdot 10^4 \text{ м, або}$$

$$D_{\Gamma} = \frac{1}{3,6 \cdot 10^3 \cdot 0,85} \cdot \left(\frac{10 \cdot 10^{-6}}{0,26 \cdot 10^{-8}} + \frac{182 \cdot 10^{-6}}{0,39 \cdot 10^{-8}} \right) = 16,6 \text{ год.}$$

Порівнюючи довговічність сталі Х12 після гартування і нітроцементації, бачимо, що довговічність нітрогартованої сталі в 2,5 рази вища.

РОЗДІЛ 5

КОНСТРУКЦІЙНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА РЕМОНТОПРИДАТНОСТІ ВУЗЛА ЕКСТРУДУВАННЯ

5.1. Експериментальна установка для переробки фуражного зерна з домішками мінералів

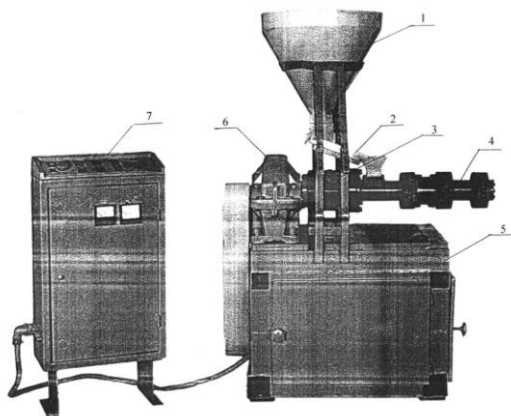
Для перевірки рекомендацій з підвищення зносостійкості та довговічності екструдерів для переробки фуражного зерна з домішками мінералів було розроблено експериментальну установку, технічна характеристика та загальний вид якої наведено в таблиці 5.1 і на рис. 5.1.

Таблиця 5.1

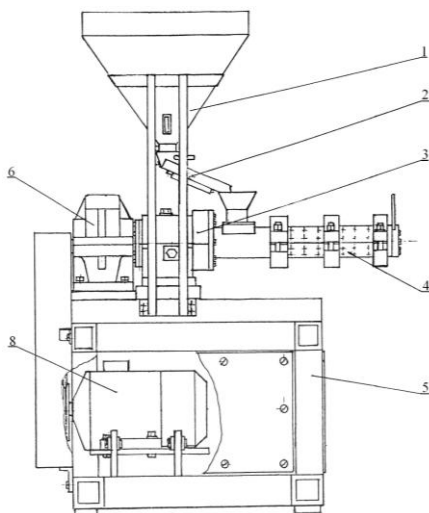
Технічна характеристика експериментальної установки

Найменування параметрів	Дані
Продуктивність параметрів зерна, кг/год	до 100
Загальна встановлена потужність, кВт, не більше	11
Габаритні розміри екструдера (без шафи керування), мм:	
– довжина	1130
– ширина	630
– висота	1600
Маса, кг	320
Характеристика електрообладнання:	
– рід струму мережі живлення	змінний трьохфазовий
– частота струму, Гц	50±2%
– напруга, В	380
– потужність електродвигуна приводу екструдера, кВт, не більше	11

Станина 5 (рис. 5.1) об'єднує всі робочі органи екструдера в одне ціле. Електродвигун 8 – джерело механічної енергії для баротермічної обробки сировини. Одноступінчастий циліндричний редуктор 6 забезпечує робочу кутову швидкість обертання шнека. За допомогою лотка 2 забезпечується подача сировини. Бункер 6 служить для накопичення сировини, яка поступає в циліндр екструдера 4.



a



б

Рис. 5.1. Фотографія *a* і загальний вид *б* експериментальної установки для екструзування фуражного зерна з домішками:
1 – завантажувальний бункер; 2 – лоток з дозатором; 3 – упорний підшипник; 4 – вузол екструзування; 5 – станина; 6 – редуктор;
7 – шафа управління; 8 – двигун

В умовах сільськогосподарського виробництва комбікормів виникла необхідність створення екструдера середньої потужності, простої та ремонтпридатної конструкції, що може переробляти фуражне зерно з домішками відходів зернового виробництва та мінералів.

Хмельницький національний університет спільно з ВАТ “Термопластавтомат” розробив і виготовив серію екструдерів марки К24-127 (рис. 5.2 і табл. 5.2) потужністю 60 кВт і продуктивністю 350 кг/год. для баротермічної переробки фуражного зерна з домішками відходів зернового виробництва і мінералів.

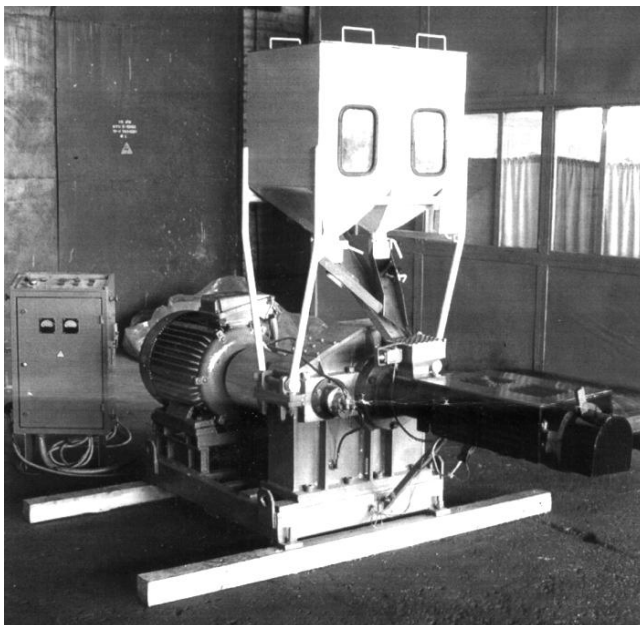


Рис.5.2. Зовнішній вигляд екструдера К24-127

Екструдер виготовляється в кліматичному виконанні за ГОСТ15150-69, для роботи при температурі від 238 °К (10 °С) до 303 °К (30 °С), на висоті не більше 1000 м над рівнем моря, при відносній вологості $65 \pm 15\%$, в невибухонебезпечному середовищі,

не забрудненому пилом, в концентраціях, що не пошкоджують метал і ізоляцію

Кінематична схема і конструкція екструдера K24-127 наведені на рис. 5.3 та 5.4.

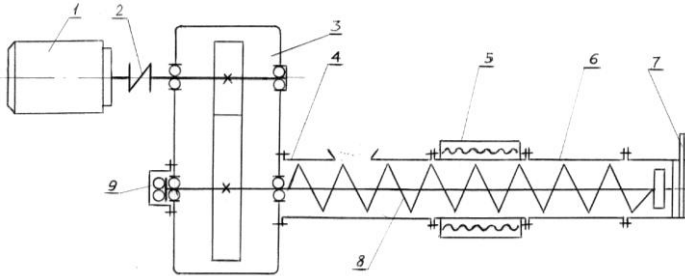


Рис. 5.3. Кінематична схема експериментальної установки:
 1 – електродвигун, 2 – муфта, 3 – редуктор, 4 – завантажувальний циліндр, 5 – нагрівач, 6 – пара напівкорпусів, 7 – пристрій для регулювання, 8 – шнек, 9 – упорний підшипник

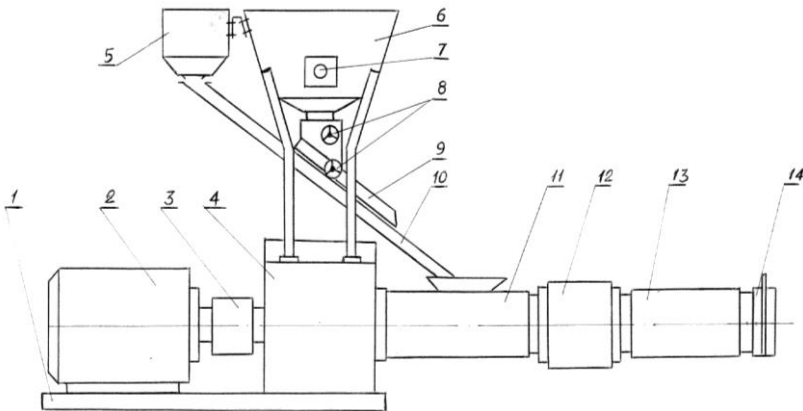


Рис. 5.4. Принципова схема експериментальної установки:
 1 – станина, 2 – електродвигун, 3 – муфта, 4 – одноступінчастий редуктор, 5 – дозатор мінеральних домішків, 6 – двосекційний бункер, 7 – електромагнітний вібратор, 8 – гравітаційний дозатор, 9 – лоток для сировини, 10 – лоток для зерноsumіші, 11 – завантажувальна секція циліндра, 12 – нагрівач, 13 – пара напівкорпусів циліндра, 14 – пристрій для регулювання

Таблиця 5.2

Технічна характеристика K24-127

Продуктивність, кг/год.	350
Загальна встановлена потужність, кВт	60
Потужність приводу, кВт	55
Габаритні розміри, мм:	
– довжина	2500
– ширина	900
– висота	2050
Маса, кг	1460

Станина 1 (рис. 5.4) об'єднує всі робочі органи екструдера в одне ціле. Електродвигун 2 – джерело механічної енергії для баротермічної обробки сировини. Муфта 3 передає обертовий момент від електромотора до редуктора. Одноступінчастий циліндричний редуктор 4 забезпечує робочу кутову швидкість обертання шнека. За допомогою дозатора 5 забезпечується потрібний вміст мінеральних домішків у готовому продукті. Двосекційний бункер 6 служить для накопичення зерноsumіші та зерновідходів. Електромагнітний вібратор 7 (по одному на кожній секції бункера 6) запобігає зависанню зерновідходів. За допомогою гравітаційного дозатора 8 забезпечується співвідношення між компонентами зерноsumіші і зерновідходів, регулювання подачі сировини в робочий циліндр та продуктивність екструдера. Лоток 9 служить для подачі зерноsumіші та зерновідходів в лоток 10, а також є складовою частиною другої ступені дозатора 8 для тонкого регулювання. Лоток 10 служить для подачі всіх компонентів сировини в завантажувальний корпус 11. Лотки 9 і 10 мають постійні магніти для затримання залізних предметів, що випадково потрапили в сировину. Нагрівач 12 служить для початкового нагріву в момент запуску екструдера.

Обертовий момент від електродвигуна передається на шнек циліндра екструдера за допомогою редуктора. Фуражне зерно з добавками з бункера по лотку подається через воронку в загрузочне вікно циліндра і переміщається шнеком вздовж його осі. При цьому в результаті тертя об поверхню циліндра і шнека сировина подрібнюється нагрівається і стискується до 10 МПа. Величина стискування регулюється регулятором шляхом зміни величини вихідних отворів за допомогою поворотного диску.

5.2. Конструкція матеріального циліндра екструдера

Аналіз поширених конструкцій зарубіжних і вітчизняних екструдерів для переробки фуражного зерна свідчить, що більшість з них мають шнеки і циліндри цільної конструкції. Як показано в дослідженнях багатьох авторів [2–6, 20, 129] і в розділі 1 на рис 1.4, для екструдера характерний нерівномірний розподіл тиску по довжині матеріального циліндра, при цьому максимальне значення його виникає в кінці шнека перед виходом екструдата із циліндра. Величина цієї зони максимального тиску становить 1,5–2 діаметри шнека. В цій зоні виникає максимальне зношування як шнека, так і циліндра.

Слід зазначити, що при експлуатації більшості екструдерів зарубіжного і вітчизняного виробництва потрібно забезпечити високі вимоги до сировини щодо її очистки, вмісту вологи, попереднього пропарювання, тощо [2–6, 16].

При досягненні величини зносу критичного значення, це приводить до різкого зменшення продуктивності екструдера і зниження якості продукції, шнек і циліндр потрібно замінювати, або відновлювати методами наплавки. Все це потребує великих матеріальних затрат.

На рис. 5.5 наведено конструкцію матеріального циліндра екструдера. Матеріальний циліндр установки складається: із збірного шнека, який включає зібрані в пакет на штанзі 6 букси 7 і 15, шайби меншого діаметра 13, шайби більшого діаметра 9, наконечника 4, шпонок 11 і 12. Пакет стягується гвинтом 5 з лівою різьбою.

До завантажувального корпусу 14 приєднується спочатку пара напівкорпусів 17, які стягуються гвинтами і гайками, далі встановлюється друга пара напівкорпусів. На цій парі напівкорпусів встановлюється регулятор, який складається з корпусу 3, кришки 1 і диска поворотного 2, що встановлений на штифті. Корпус завантажувальний, дві пари напівкорпусів 17 і регулятор центруються кільцями 10, фіксуються шпонками і стягуються хомутами 16. Вихід готового продукту здійснюється по суміщених трьох отворах в корпусі 3 і диску поворотному 2. Поворот диска 2 змінює прохідний переріз отвору і таким чином здійснюється часткова підналадка якості готового екструдата.

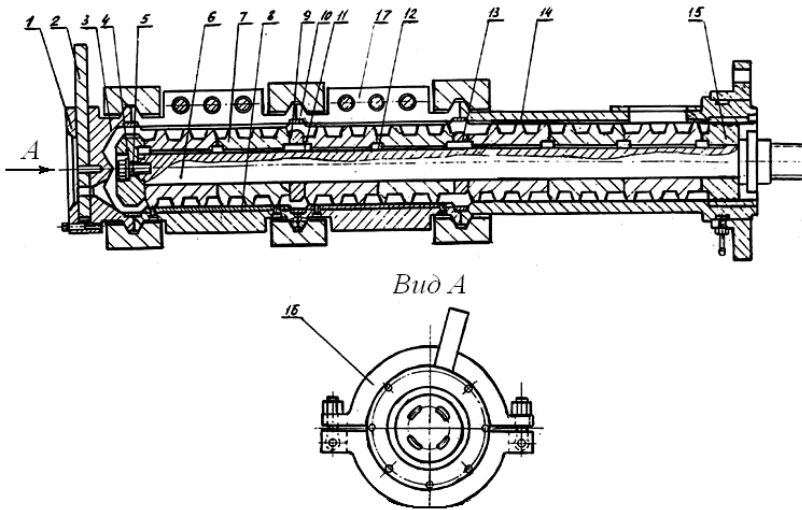


Рис. 5.5. Конструкція матеріального циліндра екструдера:
 1 – кришка, 2 – диск поворотний, 3 – корпус, 4 – наконечник,
 5 – стягуючий гвинт, 6 – штанга, 7 – букса, 8 – планка, 9 – шайба,
 10 – кільце центруюче, 11, 12 – шпонки, 13 – шайба,
 14 – завантажувальний корпус, 15 – букса спеціальна, 16 – хомут,
 17 – напівкорпус

5.2.1. Конструкція шнека матеріального циліндра

Шнек матеріального циліндра складається з семи порожнистих секцій (рис. 5.6, а), що встановлюються на штанзі, фіксуються з допомогою шпонок і скріплюються в осьовому напрямі гвинтом. В екструдера К24-127 діаметр і довжина секцій становить 120 мм, крок нарізаних витків на поверхні 40 мм. Довжина секції відповідна кроку нарізки витків, що робить секції взаємозамінними [130, 145].

При переробці фуражного зерна з домішками мінералу сапоніту, який містить абразивні частинки, секції в зоні високого тиску зношуються значно швидше від секцій, що працюють в зоні завантаження та екструзії. Характер зношування поверхні секції шнека показано на рис. 5.6, б. Після зношування секції в кінці шнека (зона високого тиску) її можна замінювати на секцію з зони

завантаження, яка зношена значно менше. При перевищенні допустимого зносу секції її замінюють, залишивши решту без заміни. Це дає можливість збільшити довговічність шнека на 20–25 %.

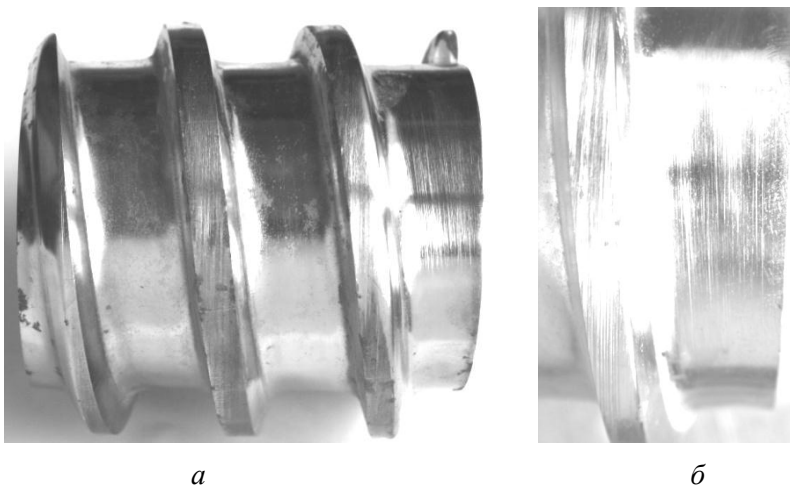


Рис. 5.6. Секція шнека:

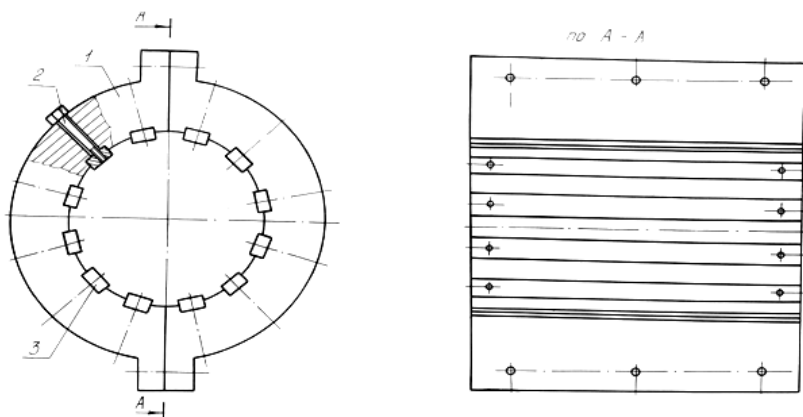
***а* – загальний вигляд секції шнека; *б* – фрагмент зношеної поверхні шнека**

Для підвищення зносостійкості шнека його секції пропонується виготовляти з легованої хромистої сталі Х12 з хіміко-термічною обробкою поверхні методом нітрогартування за оптимальним режимом (розділ 3) [146]. Це забезпечує необхідну довговічність екструдера, яка в 3 рази вища порівняно з його довговічністю при виготовленні з конструкційної сталі 45 з послідуочим гартуванням.

5.2.2. Конструкція секційного циліндра

Для забезпечення процесу екструзування на внутрішній поверхні циліндра необхідний спеціальний профіль з виступами вздовж твірної. В процесі експлуатації виступи зношуються переважно в зоні високого тиску, що викликає необхідність заміни всього циліндра.

В екструдері К24-127 запропоновано циліндр секційної конструкції [19]. Циліндр екструдера виготовляється з трьох секцій, дві з яких є роз'ємними вздовж твірної (рис. 5.7), а завантажувальна секція – суцільна. Півкорпуси роз'ємної секції з'єднуються між собою спеціальними болтами, а в осьовому напрямку – спеціальними хомутами (рис. 5.5). З метою здешевлення і продовження терміну роботи екструдера на внутрішній поверхні півкорпуса циліндра 1 (рис. 5.7) виступи в суцільному металі замінено на призматичні вставки 3, які встановлюються в пази. Вставки в пазах закріплено гвинтами 2, що проходять із зовнішньої поверхні півкорпуса.



**Рис. 5.7. Конструкція роз'ємної секції циліндра:
1 – півкорпус; 2 – гвинт; 3 – призматична вставка**

Завдяки змінним планкам підвищується довговічність не лише напівкорпусу, а й всього вузла екструдувальника. При зношенні шнека по зовнішньому діаметру його шліфують на максимальну глибину зносу, а необхідний конструктивний зазор пари шнек-циліндр забезпечують збільшенням товщини вставок.

Призматичні вставки виготовляють з легованої хромистої сталі Х12 з хіміко-термічною обробкою поверхні методом нітрогартування за оптимальним режимом.

5.3. Принципова схема гравітаційного дозатора сипучих матеріалів

Гравітаційний дозатор (рис. 2.8) призначений для подачі сипких матеріалів, схильних до зависання і склепоутворення, наприклад, фуражного зерна, відходів зернопереробного виробництва, мінеральних добавок.

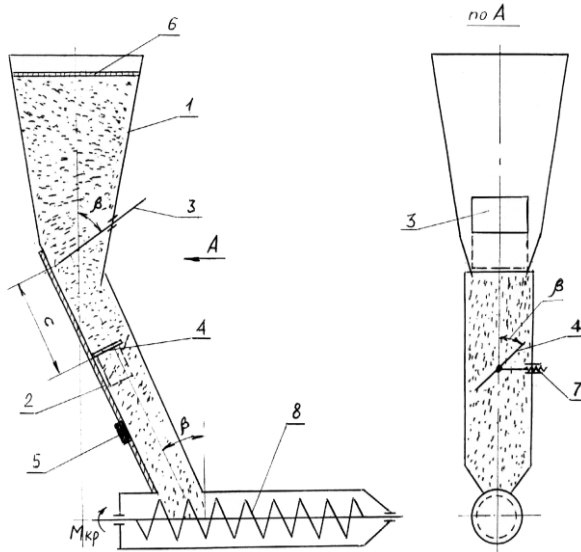


Рис. 5.8. Принципова схема гравітаційного дозатора сипких матеріалів:

1 – накопичувальний бункер, 2 – лоток, 3 – шибер бункера, 4 – шибер лотка, 5 – магнітний уловлювач, 6 – сітка, 7 – гвинтовий пристрій для точного регулювання, β – кут нахилу лотка і шиберів

Сипкий матеріал засипається в накопичувальний бункер 1, металічна сітка 6 з певним розміром комірки затримуватиме великі сторони предмети, які можуть попасти в сипкий матеріал.

При дозуванні сипкого матеріалу відкривається шибер 3, утворюючи щілину, що забезпечує пропускання дози матеріалу, яка перевищує необхідну від 1,5 до 2 разів.

Точне регулювання дози виконується шибером 4 лотка 2 за допомогою гвинтового пристрою (гвинт-гайка) 7.

Кут нахилу β шиберів 3 і 4 менший кута природного відкосу α сипкого матеріалу.

Магнітний уловлювач 5 розташований нижче шибера 4 лотка.

Ширина лотка в метрах вибирається за формулою:

$$a = \frac{G}{3600 j h_1 \beta k \sqrt{2hg}}, \quad (5.1)$$

де G – продуктивність механізму, т/год;

j – об'ємна маса сипкого матеріалу, т/м³;

h_1 – висота потоку сипкого матеріалу в лотку, м;

h – висота між шиберами лотка і накопичувального бункеру, м;

g – 9,8, м/с²;

β – кут нахилу лотка і шиберів;

k – коефіцієнт опору переміщення сипкого матеріалу, 0,2–0,25.

Довжина шибера лотка l приблизно складає $2a$.

Відстань C між шиберами бункера і лотка складає $(3-5)a$;

РОЗДІЛ 6

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КОМБІКОРМІВ З ДОМШКАМИ ВІДХОДІВ ЗЕРНОВОГО ВИРОБНИЦТВА ТА МІНЕРАЛУ САПОНІТУ

6.1. Методи проведення експериментальних досліджень

Відпрацювання технології виготовлення комбікормів проводилося на експериментальній установці (рис. 5.1). В процесі експериментів досліджувалася технологія виготовлення комбікормів з різними складовими вихідної сировини, а саме:

- фуражне зерно пшениці, ячменю, зерно кукурудзи, кукурудзи з качанами, віки, суміші зерна в різних пропорціях;
- відходи зернового виробництва, зокрема висівки пшениці, лушпиння гречки, насіння трав (табл. 6.1); сапоніт Ташківського родовища (табл. 2.3).

Таблиця 6.1

Варіанти комбікормів з різним вмістом складових

Варіанти екструдату	Складові комбікорму в %									
	Ячмінь	Пшениця	Кукурудза		Горох	Зерно віки	Висівки пшениці	Лушпиння гречки	Відходи насіння трав	Сапоніт
			зерно	з качанами						
1	95	–	–	–	–	–	–	–	–	5
2	40	55	–	–	–	–	–	–	–	5
3	55	–	–	–	–	–	–	30	–	5
4	25	–	30	–	–	–	–	40	–	5
5	75	–	–	–	–	–	–	–	20	5
6	–	–	–	80	–	–	–	15	–	5
7	–	70	–	–	–	–	–	25	–	5
8	40	–	–	–	20	–	35	–	–	5
9	–	–	–	–	–	80	–	–	17	3
10	15	–	–	–	–	–	50	30	–	5
11	–	20	15	–	–	–	60	–	–	5
12	40	–	40	–	–	–	15	–	–	5
13	–	–	–	–	5	46	–	46	–	3
14	–	–	–	93	–	–	–	–	–	7
15	–	–	95	–	–	–	–	–	–	5

В процесі експериментів змінювався тиск в кінцевій зоні матеріального циліндра перед зоною виходу в границях від 3 до 8 МПа. Величину тиску змінювали з допомогою поворотного диску 2 (рис. 5.5). Тиск замінювався в кінцевій зоні матеріального циліндра перед виходом екструдату з допомогою спеціального тензометричного датчика (рис. 6.1), розміщеного в корпусі матеріального циліндра. Сигнал від датчика підсилювався з допомогою спеціального підсилювача електричних сигналів і записувався на осцилограму. Для розшифрування осцилограм проводилось тарування системи вимірювання з допомогою зразкових динамометрів та спеціального пристрою для навантаження.

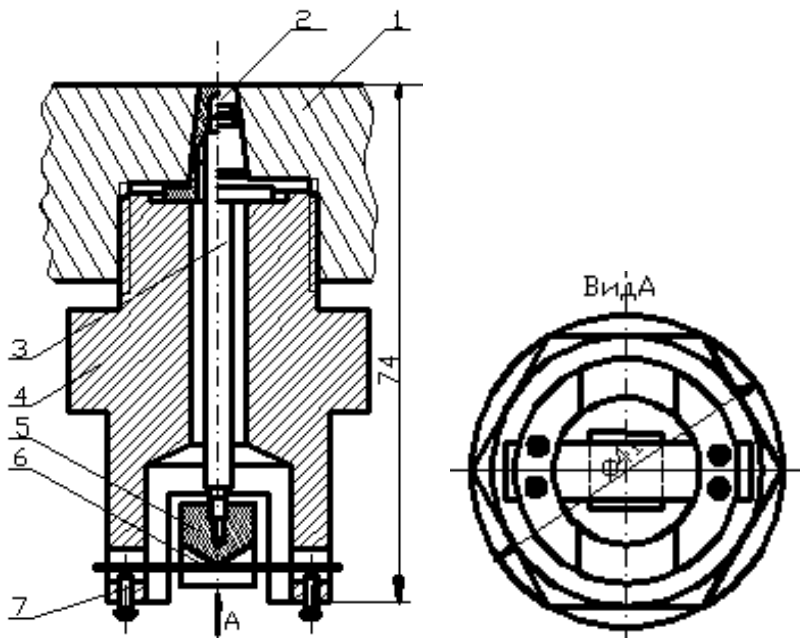


Рис. 6.1. Датчик тиску:

- 1 – корпус матеріального циліндра; 2 – головка датчика;**
- 3 – стержень; 4 – корпус; 5 – призма; 6 – пластина з тензодатчиками, 7 – регулювальні гвинти**

В процесі досліджень вимірювалася температура в зоні максимального тиску (в кінцевій частині матеріального циліндра), яка змінювалася в межах від 140 до 160 °С. Зерно і домішки, які загрузалися в екструдер, мали вологість від 18 до 20 %. В процесі досліджень визначалася об'ємна вага екструдату і її залежність від максимального тиску в матеріальному циліндрі. Зважування зразків проводилося на аналітичних терезах. Вміст протеїну визначався в лабораторії “Хмельницькстандартметрологія” згідно ГОСТ 13496.4-93. Вміст мікроелементів в комбікормах визначався в лабораторіях Інституту кормів УААН (м. Вінниця) та випробувальній лабораторії з сертифікації продукції Хмельницького національного університету.

6.2. Результати експериментальних досліджень технології виготовлення комбікормів

Дослідження технології виготовлення комбікормів з різних складових вихідної сировини і добавок відходів зернового виробництва та сапоніту показали, що в залежності від тиску в матеріальному циліндрі змінюється температура в матеріальному циліндрі, що впливає на якість перемелювання зерна та відходів і на об'ємну вагу екструдату. В таблиці 6.2 наведені параметри технологічного процесу екструдуювання і об'ємна вага екструдату, з якої видно, що зі збільшенням тиску в матеріальному циліндрі збільшується максимальна температура екструдуювання і зменшується об'ємна вага екструдату для одних і тих же складових сировини. Значний вплив на об'ємну вагу має і питома вага сировини. Так добавка висівок пшениці і лущиння гречки зменшує об'ємну вагу екструдату.

Зменшення об'ємної ваги екструдату при виході з матеріального циліндра обумовлене різкою зміною тиску, яка приводить до явища вибуху, в процесі якого змінюється структура вихідних продуктів та об'ємна вага і тим більше, чим більше тиск в матеріальному циліндрі екструдера.

На рис. 6.2–6.4 наведені фотографії загального виду екструдату, одержаного з різних вихідних компонентів і при різних значеннях тиску і температури. З рисунків наглядно видно, що за зовнішнім видом екструдат з різних компонентів і при різних технологічних параметрах суттєво відрізняється.

Таблиця 6.2

Параметри технологічного процесу екструдуння і об'ємна вага екструдату

Склад вихідних компонентів екструдату	Максимальний тиск в матеріальному циліндрі, МПа	Температура в зоні максимального тиску, °С	Об'ємна вага екструдату, г/см ³
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Ячмінь – 95 %; сапоніт – 5 %	4	140	0,74
Ячмінь – 40 %; пшениця – 55 %; сапоніт – 5 %	4	140	0,85
Ячмінь – 55 %; лушпиння гречки – 40 %; сапоніт – 5 %	6	150	0,49
Ячмінь – 25 %; кукурудза – 30 %; лушпиння гречки – 40 %; сапоніт – 5 %	4	145	0,63
Ячмінь – 75 %; насіння трав – 20 %; сапоніт – 5 %	4	140°С	0,71
Кукурудза з качанами – 80 %; лушпиння гречки – 20 %; сапоніт – 5 %	5	145	0,48
Пшениця – 70 %; лушпиння гречки – 25 %; сапоніт – 5 %	3	140	0,68
Ячмінь – 40 %; Горох – 20 %; висівки пшениці – 35 %; сапоніт – 5 %	3	140	0,77

1	2	3	4
Зерно віки – 80 %; насіння трав – 17 %; сапоніт – 3 %	4	140	0,65
Ячмінь – 15 %; висівки пшениці – 50 %; лушпиння гречки – 30 %; сапоніт – 5 %	6	150	0,50
Пшениця – 20 %; кукурудза – 15 %; висівки пшениці – 60 %; сапоніт – 5 %	6	150	0,43
Ячмінь – 40 %; Кукурудза – 40 %; Висівки пшениці – 15 %	4,5	145	0,66
Висівки пшениці – 46 %; лушпиння гречки – 46 %; горох – 5%; сапоніт – 3%	5	145	0,49
Подрібнена кукурудза з качанами – 93 %; сапоніт – 7 %	4	140	0,6
Кукурудза – 95 %; сапоніт – 5 %	8	160	0,32

Наприклад, на рис. 6.2 і 6.4 екструдат одержано при різних температурах і тиску. Він має різну об'ємну вагу, а саме: екструдат ячмінит (95 % ячменю і 5 % сапоніту), що одержаний при тиску 4 МПа і температурі 140 °С (рис. 6.2, б), має об'ємну вагу $\gamma = 0,74 \text{ T / м}^3$; екструдат з кукурудзи (95 % кукурудзи і 5 % сапоніту), що одержаний при тиску 8 МПа і температурі 160 °С, має об'ємну вагу $\gamma = 0,32 \text{ T / м}^3$ (рис. 6.3, а). Наявність в складі екструдату відходів з висівок, лушпиння гречки і насіння трав теж приводить до зниження об'ємної його ваги (рис. 6.2–6.4, табл. 6.2).



25 % – ячмінь + 25 % – пшениця + 30 % – кукурудза + 15 % –
лушпиння гречки + 5 % – сапоніт

a



95% – ячмінь + 5% – сапоніт

б

**Рис. 6.2. Загальний вид екструдату з різних компонентів:
a тиск – 6 МПа, температура 150 °С;
б тиск – 4 МПа, температура 140 °С**



95% – кукурудза + 5% – сапоніт

a



40% – ячмінь + 55% – пшениця + 5% – сапоніт

б

**Рис. 6.3. Загальний вид екструдату з різних компонентів:
a тиск – 4,5 МПа, температура – 145 °С;
б тиск – 3 МПа, температура – 150 °С**



40% – кукурудза + 40% – ячмінь + 15% – висівки пшениці
a



45% – пшениця + 50% – висівки пшениці + 5% – сапоніт
б

Рис. 6.4. Загальний вид екструдату з різних компонентів:
a тиск – 4.5 МПа, температура – 145 °С;
б тиск – 4 МПа, температура – 140 °С

Кормові характеристики комбікормів, одержаних методом екструдуння зерна і відходів зернового виробництва з добавками сапоніту, наведені в таблиці 6.3. З таблиці 6.3 видно, що в залежності від виду зерна і відходів зернового виробництва, їх процентного вмісту можна одержати різний вміст сирого протеїну, величина якого коливається від 80 до 229 г в одному кілограмі комбікорму.

Таблиця 6.3

Кормові характеристики комбікормів, одержаних методом екструдуння зерна і відходів зернового виробництва з добавками сапоніту (в одному кілограмі екструдату)

Склад екструдату	Кормові одиниці	Показники, г										
		Сирий протеїн	Крохмаль	Ca	P	Mg	K	Na	Fe	Zn	Mn	Co
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. Ячмінь – 40 %, висівки пшениці – 55 %, сапоніт – 5 %	1,4	120	332	2,51	5,72	5,11	7,36	1,8	1,5	0,05	0,5	0,91
2. Ячмінь – 55 %, лущпиння гречки – 40 %, сапоніт – 5 %	0,9	104	332	5,3	3,28	5,14	6,96	2,1	3,15	0,04	0,6	2,15
3. Ячмінь – 25 %, кукурудза – 30 %, лущпиння гречки – 40 %, сапоніт – 5 %	0,62	91	279	4,97	2,44	6,51	6,54	1,99	3,05	0,03	0,5	1,89

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>
4. Подрібнена кукурудза з качанами – 80 %, лущиння гречки – 15 %, сапоніт – 5 %	0,97	80,15	435	2,13	2,1	4,33	5,07	1,58	1,72	0,03	0,2	1,53
5. Пшениці – 70 %, лущиння гречки – 25 %, сапоніт – 5 %	0,79	127	341	2,62	5,63	5,05	7,11	1,84	1,35	0,05	0,5	0,94
6. Ячмінь – 40%, висівки – 35%, горох – 20%, сапоніт – 5%	1,08	162	290	2,1	5,8	4,65	6,8	1,78	1,25	0,04	0,5	0,92
7. Ячмінь – 75 %, насіння трав (відходи) – 20 %, сапоніт – 5 %	0,95	118	316	2,31	5,3	4,95	7,22	1,7	1,43	0,04	0,5	0,88
8. Зерно віки – 80 %, лущиння гречки – 17 %, сапоніт – 3 %	1,04	174	271	1,8	4,7	2,9	1,4	2,1	1,2	0,02	0,2	1,3
9. Ячмінь – 95 %, сапоніт – 5 %	1,2	107	485	2,67	3,93	4,45	5,5	1,9	1,9	0,04	0,6	2,26
10. Ячмінь – 15 %, лущиння гречки – 30 %, висівки пшеничні – 50 %, сапоніт – 5 %	0,49	124	-	6,5	5,7	8,3	10,2	1,8	3,1	0,06	0,3	1,4

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>
11. Лушпиння гречки – 46 %, висівки – 46 %, горох – 5 %, сапоніт – 3 %	0,53	128	23	6,3	5,6	8,0	10,2	1,8	3,0	0,06	0,3	1,4
12. Кукурудза – 40 %, ячмінь – 40 %, висівки пшениці – 15 %, сапоніт – 5 %	0,63	142	91	5,7	5,7	7,0	10,0	1,6	2,7	0,06	0,3	1,4
13. Висівки пшениці – 60 %, дерть пшенична – 20 %, дерть кукурудзи – 15 %, сапоніт – 5 %	0,76	107	256	5,9	3,1	7,4	7,0	1,9	3,4	0,04	0,4	1,7
14. Подрібнена кукурудза з качанами – 93 %, сапоніт – 7 %	0,88	79	528	0,8	2,2	3,3	4,4	1,7	1,1	0,03	0,2	1,5
15. Зерно кукурудзи – 95 %, сапоніт – 5 %	1,09	229	338	1,3	6,1	3,2	9,6	2,0	1,3	0,04	0,3	1,6

При цьому, з досліджуваних кормів найбільший вміст протеїну одержано в комбікормі, що містить 95% кукурудзи. Великий вміст протеїну має комбікорм, що містить зерно віки і гороху. Комбікорм ячмінит (95% ячменю і 5% сапоніту) має невисокий вміст протеїну (107г), але великий вміст крохмалю – 484 г.

Екструдат, що містить 46 % висівок, 46 % лушпиння гречки, 5 % гороху і 5 % сапоніту містить 128 г протеїну і всього 23 г крохмалю. Екструдат, що складався з кукурудзи з качанами (93 % і 7 % сапоніту) містить невелику кількість протеїну (79 г),

але велику кількість крохмалю (528 г) і цікавий своїм складом мікроелементів. Слід зазначити, що добавки сапоніту суттєво збагатили комбікорм необхідними для росту тварин мікроелементами, яких налічується понад 20 в його складі. Як показують результати застосування комбікормів, що виготовлялися методом екструдуювання з добавками відходів зернового виробництва і сапоніту, в сільськогосподарських підприємствах ТОВ “Волиця”, ФГ “Трембіта”, КСП “Колос” Хмельницької області при відгодівлі свиней і поросят, їх приріст зріс від 1,7 до 2 разів в порівнянні з контрольною групою при 100% виживаємості молодняка (табл. 6.4 та 6.5).

Таблиця 6.4

Ефективність відгодівлі свиней з використанням технології екструдуювання зерна, відходів зернового виробництва з домішками мінералу сапоніт на сільськогосподарських підприємствах Хмельницької області

Вид екструдату	Кількість голів при відгодівлі	Щоденний приріст, г		Ефективність нової технології
		За традиційною технологією	За новою технологією	
<i>Свині віком 6 місяців</i>				
ТОВ “Волиця”				
Ячмінь – 40 %, висівки – 35 %, горох – 20 %, сапоніт – 5 %	17	460	470	1,5
ФГ “Трембіта”				
Ячмінь – 40 %, висівки пшениці – 55%, сапоніт – 5%	24	350	590	1,7
КСП “Колос”				
Ячмінь – 55 %, лушпиння гречки – 40 %, сапоніт – 5 %	25	410	620	1,5

Таблиця 6.5

Ефективність відгодівлі свиней з використанням технології екструдювання зерна, відходів зернового виробництва з домішками мінералу сапоніт на сільськогосподарських підприємствах Хмельницької області

Вид екструдату	Кількість голів при відгодівлі	Щоденний приріст, г		Ефективність нової технології
		За традиційною технологією	За новою технологією	
<i>Поросята віком 2 місяці</i>				
ТОВ “Волиця”				
Зерно кукурудзи – 95%, сапоніт – 5%	40	250	375	1,5
ФГ “Трембіта”				
Зерно кукурудзи – 95 %, сапоніт – 5 %	30	240	380	1,6
КСП “Колос”				
Ячмінь – 95 %, сапоніт – 5 %	35	275	480	1,7

Висновки до частини I

1. Порівняльними експериментальними дослідженнями зносостійкості в абразивному середовищі різних сталей встановлено, що найбільш перспективними матеріалами для виготовлення шнеків і циліндрів вузла екструдувannya є високовуглецеві леговані сталі з значним вмістом хрому (зокрема сталь X12), які містять в своїй структурі метастабільні фази і зміцнюються методами термічної і хіміко-термічної обробки.

2. Дослідження показали, що сталь X12 з залишковим аустенітом в структурі матеріалу, який може змінюватись під дією абразивів при зношуванні, має підвищену зносостійкість. Максимальної зносостійкості можна досягти при оптимальному вмісті залишкового аустеніту, який для умов проведення досліджень становить 55 %.

3. Дослідження сталей з різною термічною і хіміко-термічною обробками показали, що іонне азотування в безводневих середовищах є перспективним методом зміцнення поверхні тертя конструктивних елементів, який дозволяє змінювати властивості дифузійного шару в широких межах і оптимізувати їх за різними критеріями. Визначено оптимальні режими іонного азотування для сталей 45, ШХ15 і X12 за критерієм максимальної зносостійкості в абразивному середовищі.

4. Експериментальними дослідженнями встановлено, що максимальну зносостійкість в абразивному середовищі показали зразки із сталі X12, яку було зміцнено нітрогартуванням (іонним азотуванням за оптимальним режимом та наступним гартуванням) з вмістом залишкового аустеніту 55 % в структурі матеріалу. Зносостійкість сталі X12 після нітрогартування в 2,4 рази більша в порівнянні з сталлю 20 після цементації і майже в три рази більша в порівнянні з сталлю 45 після гартування.

5. Дослідження показали, що інтенсивність зношування зразків з різною термічною та хіміко-термічною обробками збільшується при зростанні середнього розміру зерна від 75 до 300 мкм на 7–20 % в порівнянні з інтенсивністю зношування для абразивного зерна розміром 75 мкм залежно від марки сталі та її обробки, зокрема: для сталі 20 без термообробки – на 20 %; для сталей після гартування та іонного азотування – на 14–16 %; для сталі X12 після нітрогартування – на 7 %.

6. Розроблено теоретико-експериментальну методику розрахунку зносостійкості і довговічності конструктивних елементів з градієнтними покриттями та метастабільними фазами в структурі матеріалу при абразивному зношуванні та малій кількості експериментів, яку можна використати при розрахунках зносостійкості градієнтних покриттів, одержаних за різними технологіями.

7. Застосовано секційні конструкції шнека і циліндра з призматичними вставками на внутрішній поверхні його окремих секцій, які підвищують довговічність та ремонтпридатність екструдера і значно скорочують витрати на його ремонт в порівнянні з нероз'ємними конструкціями цих елементів.

8. Результати трибологічних досліджень деталей матеріального циліндра впроваджені на ВАТ “Термопластавтомат” та НВП “Віднова” при виготовленні та ремонті екструдерів K24-127, що дозволило підвищити їх зносостійкість і довговічність в 1,6–1,8 раз та скоротити ремонтні витрати на 25–30%.

9. На основі експериментальних досліджень розроблена технологія виготовлення комбікормів з різних компонентів сировини (різних видів фуражного зерна – ячменю, пшениці, кукурудзи, віки та відходів зернового виробництва – висівок пшениці, лушпиння гречки, насіння трав) і домішками мінералу сапоніту. Запропоновано 15 рецептів комбікормів, досліджені їх кормові характеристики та об'ємна вага.

Літэрагура.

1. Большая советская энциклопедия / М. : Советская энциклопедия, 1978. – Т.30.
2. Миллауэр Х. Экструдеры и экструзионные установка // Материалы семинара по технологии производства комбикормов, фірма Buhler-Buhler МІАС, 1989. – С. 270.
3. Черняев И.П. Технология комбикормового производства. – М. : Агропромиздат, 1985 – С. 255.
4. Grebaut I. Cuisson-extrusion des produits cerealiers. – Industries des cereales. Франция, 1984. – № 28. – С. 7–12.
5. Клейменов В. Н. Экструдирование зерновых кормов / В. Н. Клейменов, К. Б. Вартанов // Научно-технический бюллетень по электрификации сельского хозяйства ВНИИ электрификации сельского хозяйства, 1984. – № 3/52; С. 58–61.
6. Жушман А. И. Современные достижения в технологии экструзионных крохмалопродуктов / А. И. Жушман, Е. К. Коптелова, В. Г. Карпов // Обзорная информация. Сер. 19/ВНИИТЭИАгропром, 1989. – Вып. 4.
7. Pallini C. M. Extrudieren – eine moderne Technologie in der Yetreide – verarbeitung. – Die Muhle + Mischfutlertechnik, ФРГ, 1988. – № 10. – Т. 125. – Р. 121–122.
8. Hammer D. Die Kochextrusion. - Die Muhle + Mischfutlertechnik, ФРГ, 1988. – Т.125. – Р. 128–129.
9. Rossen I. L., Food Extrusion. / I. L. Rossen, R.C. Miller // Food technology, США, 1973. – № 27. – Р. 46–53.
10. Naprer I.M. Food extrusion. – CRC reviuos in Food Sci. and Nutritlon. США, 1979. – №11. – Issue 2. – Р. 155–215.
11. Ильин Л. Комбикормовая промышленность Франции // Комбикормовая промышленность, 1989. – № 4. – С. 44–47.
12. Шестернина С. А. Комбикормовая промышленность за рубежом / Экспресс - информация. Сер. Хранение и переработка зерна // ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1987. – Вып. 1.
13. Special Report. Extrusion. – Milling. Италия, 1988. – 181. – № 3. – Р. 38–43.
14. Орлов А. И. Повышение качества комбикормов / Эксперсс-информация. Сер. Комбикормовая промышленность // ЦНИИТЭМ Минзага СССР, 1979. – Вып 11.
15. Орлов А. И. Влияние процесса экструдирования на сохранность витаминов в зерне ячменя и отрубях. / А.И. Орлов,

В.А. Афанасьев // Тр.ВНИИКП//ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1983. – Вып. 23.

16. Орлов А. И. Влияние пропаривания и экструдирования на микроструктуру зерна ячменя. / А. И. Орлов, В. А. Афанасьев // Тр. ВНИИКП/ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1984. – Вып. 25.

17. Пат. 32993А Україна Спосіб одержання комбікормів з фуражного зерна / В. Г. Каплун, В. С. Павлов, М. О. Мазур, П. С. Кльоц, В. П. Янов.// №98073663; заявл. 10.07.1998; опубл. 7.04.1999.

18. Пат. 32896А Україна Спосіб одержання комбікормів для тварин / В. Г. Каплун, В. С. Павлов, М. О. Мазур. // №98095168; заявл. 30.09.1998; опубл. 3.06.1999.

19. Пат. 33099А Україна Вузол екструдювання і спосіб підвищення його довговічності / В. Г. Каплун, В. С. Павлов, М. О. Мазур. // №981116001; заявл. 12.11.1998; опубл. 8.06.1999.

20. Каплун В. Г. Экструдирование фуражного зерна с сапонитом / В. Г. Каплун, В. С. Павлов, Н. А. Мазур // Комбикорма, 2001. – №3. – С. 24.

21. Пат. 11939 Україна Гравітаційний дозатор сипучих матеріалів / В. Г. Каплун, В. С. Павлов, М. О. Мазур. // №2000116449; заявл. 14.11.2000; опубл. 16.07.2001 бюл.№6.

22. Каплун В. Г. Способ получения комбикормов из фуражного зерна / В. Г. Каплун, В.С. Павлов, Н.А. Мазур. // Информационный листок №48-01. Хмельницький ЦНТЭИ, 2001. – 2 с.

23. Комбикорма, кормовые добавки и ЗЦМ для животных (состав и применение) / Под. ред. Ц. А. Крохиной: Справочник. // М. : Агропромиздат, 1990. – 304с.

24. Кулик М.Ф. Традиційні і нетрадиційні мінерали в тваринництві / М.Ф. Кулик, Т. В. Засуха – К. : Сільгоспосвіта, 1995. – 251с.

25. Засуха Т. В. Нові дисперсні матеріали у тваринництві / Вінниця. : “Арбат”, 1997. – 224с.

26. ТУ–10.34.93. Борошно сапонітове для збагачення комбікормів, виробництва мінеральних добрив і м'ясо-кісткового борошна / М. Ф. Кулик, В. О. Грицик, І. М. Величко, Т. В. Засуха та ін. // Вінниця. : – 1993.

27. Кулик М. Ф. Вплив сапонітової мінеральної добавки на продуктивність корів, телиць та біологічну оцінку молока,

яловичини і свинини / М. Ф. Кулик, Т. В. Засуха // Комбікорми і кормо виробництво, 1994. – №38. – С. 55–62.

28. <http://www.ru.all.biz/ekstrudery-dlya-proizvodstva-kombikormov-bgg1004957>

29. Зверлин В. Г. Исследование предельно допустимого износа рабочих органов червячных прессов // Химическое и нефтяное машиностроение, 1982. – №9. – С. 20–22.

30. Селиванова А. А. Износ шнеков при пластификации наполненного полиэтилена / А. А.Селиванова, Г. М. Будкина, П. Т. Теплова, Л. М. Сидоров // Пластические массы, 1975.–№8. – С. 38–39.

31. Мэддок В. Г. Влияние износа шнека на производительность экструдера // Вопросы экструзии термопластов. – М. : Иностранная литература, 1963. – С. 102–106.

32. Klein L. Predicting the effect of screw wear on the performance of plasticating extruders // Polymer Engineering Science, 1975. – V. 15. – №6. – P. 444–450.

33. Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. – М. : “Машиностроение”, 1966. – 331 с.

34. Ребиндер П. А. и Петрова Н. Н. Физико-химические основы явлений износа трущихся поверхностей. Труды I Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. Т. 1. М. : изд-во АН СССР, 1939 – С. 125–137.

35. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев, “Техника”, 1970. – 395 с.

36. Слонимский Г. Л. Механохимические явления в каучуке и резиновых смесях и их роль в формировании свойств резины.–“Химическая наука и промышленность”, – том IV, – 1959. – № 1. – С. 45–52.

37. Sheldon G. L., Finnie J. On the ductile Behavior of nominally brittle Materials during erosive Cutting.–“Transactions of the ASME”, ser. B, 1967. – vol. 88, N 4, pp. 51–57, 58–68.

38. Torrance A. A. A new approach to the mechanics of abrasion // Wear, 1981. – V67. – N2. – P.233-257.

39. Lee G. Y. A physically-based abrasive wear model for composite materials / G.Y.Lee, C.K.H.Dharan, R.O.Ritchie // Wear, 2002. – V.252. – N.3–4. – P. 322-331.

40. Львов П. Н. Износостойкость деталей строительных и дорожных машин. – М. : Машгиз, 1962. – 89 с.

41. Zum Gahr K.-H. Microstructure and wear of materials. – Amsterdam : Elsevier, 1987. – 560 p.
42. Wang Y.-L. An analysis of the influence of plastic indentation on three-body abrasive wear of metals / Y.-L. Wang, Z.-S. Wang // *Wear*, 1988. – V.122. – N2. – P.123–133.
43. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М. : “Машиностроение”, 1976, – 271 с.
44. Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. – М. : Машиностроение, 1966. – 332 с.
45. Хрущов М. М. Исследования изнашивания металлов / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 352 с.
46. Ткачев В. Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. – 2-е изд., доп. – М. : Машиностроение, 1971. – 264 с.
47. Beckmann G., Gotzmann J. Analytische Betrachtung zum Strahleverschleis von Metall // *Schmierungstechnik*. – 1979. – V.10. – N4. – S.104–107.
48. Spurr R.T. The nature of contact during abrasion // *Wear*. – 1981. – V.67. – N3. – P.375–379.
49. Тылкин М. А. Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. – М.: Металлургия, 1971. – 608 с.
50. Torrance A. A. An explanation of the hardness differential needed for abrasion // *Wear*. – 1981. – V.68. – N2. – P.263–266.
51. Rohrig K. Abrasionsbestandige Eisenguswerkstoffe. – VDI-Z. – 1962. – 124. – N5. – P. 11–14, 17–20, 23–24.
52. Kassim S. Al-Rubaie. Equivalent hardness concept and two-body abrasion of iron-base alloys // *Wear*. – 2000. – V.243. – 1-2. – P. 92–100.
53. Scheffler O. The abrasive wear of steels in South African soils / O. Scheffler, C. Allen // *Tribology International*. – V.21. – N3. – P. 127–135.
54. Крагельский И. В. Об усталостной природе износа твердых тел. В кн.: Вопросы механической усталости. Под ред. В. В. Серенсена. М. : “Машиностроение”, 1964. – С. 128–132.
55. Крагельский И. В. Трение и износ. М. : “Машиностроение”, 1968. – 480 с.
56. Zum Gahr K. H. Modelling of two-body abrasive wear // *Wear*. – 1987. – V.124. - N1. – P.87-103.

57. Доронькин Е. Д. Новые инструментальные материалы без вольфрама и кобальта / Е. Д. Доронькин // Цветные металлы. – 1982. – №9. – С. 16–17.

58. Сом А. И. Новые износостойкие сплавы для плазменной наплавки / А. И. Сом, П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков // Наплавка износостойких и жаростойких сталей и сплавов. Наплавочные материалы. – К. : ИЭС им. Е.О. Патона, 1983. – С. 7-11.

59. Сом А. И. Выбор сплавов для наплавки червяков экструдеров / А. И. Сом, П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетников, А. Н. Гладченко // Химическое и нефтяное машиностроение, 1987. – №6. – С. 33–35.

60. Фрумин И. И. Современные типы наплавочного материала и их классификация // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавочный металл. – К. : Наук. Думка, 1977. – С. 3–17.

61. Antony K. C. Wear resistant cobalt-base alloys // J. Metals. – 1983. – V. 35. – №2. – P. 52–60.

62. Тиба Н. Изготовление износостойких цилиндров и червяков для экструдеров и литьевых машин / Н. Тиба, Н. Сэкинэ // заявка 59-25941. Япония. Заявлено 02.08.82, №7 – 134910, опубл. 10.02.84.

63. Гладченко А. Н. Износостойкость оборудования для переработки полимерных материалов / А. Н. Гладченко, В. Г. Зверлин, С. Д. Петренко, И. В. Шевеля. – М. : Машиностроение, 1992. – 256 с.

64. Зверлин В. Г. Проблемы повышения эксплуатационной стойкости червяков и цилиндров экструзионного оборудования: обзорная информация / В. Г. Зверлин, А. Н. Гладченко, Сазонов В. В. // Серия Хм-2.–М. : ЦИНТИХИМ-НЕФТЕМАШ, 1980.– 45с.

65. Гладченко А. Н. Выбор износостойких наплавочных материалов для изготовления рабочих органов экструдеров / А. Н. Гладченко, И. В. Шевеля, Е. В. Кияница, В. В. Деркач // Химическое и нефтяное машиностроение, 1997. – №1. – С.67–69.

66. Зверлин В. Г. Обеспечение износостойкости экструдерного оборудования при переработке высоконаполненных полимеров / В. Г. Зверлин, А. Н. Гладченко, В. В. Сазонов // Обзорная информ. Сер. Хм – 2. – М. : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1987. – 42 с.

67. Гладченко А. Н. Триботехническое обеспечение долговечности экструзионной техники: Автореферат дис. д-ра техн. Наук: 05.02.04 – К. : 1992. – 24 с.

68. Гаркунов Д. Н. Триботехника. – М. : Машиностроение, 1983. – 328 с.

69. Крешенбаум В. Я. Механотермическое формирование поверхности трения. – М. : Машиностроение, 1978. – 213 с.

70. Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. – К. : Наук. думка, 1984. – 272 с.

71. Лахтин Ю. М. Азотирование стали / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган // М. : Машиностроение, 1976. – 256 с.

72. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справ. Под ред. Л. С. Ляховича. – М. : Машиностроение, 1981. – 420 с.

73. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. М. : Наука, 1977. – 184 с.

74. Дубинин Г. Н. Диффузионное хромирование сплавов. – М. : Машиностроение, 1964. – 340 с.

75. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах. – М. : Машиностроение, 1979. – 224 с.

76. Каплун В. Г. Прогрессивные технологии упрочнения конструктивных элементов / В. Г. Каплун, П. В. Каплун// В кн. “Современные технологии в машиностроении”. Харьков НТУ “ХПИ”, 2007. – С. 388-403.

77. Деркач В. В. Повышение износостойкости цилиндра экструдера методом термодиффузионной биметализации / Автореф. дис. канд.техн. наук, К. : – 2000. – 19 с.

78. Кидин И. Н. Физические основы электротермической обработки металлов – М. : Metallurgia, 1969. – 376 с.

79. Линник В. А. Современная техника газотермического напыления покрытий / В. А. Линник, П. Ю. Пекшев. – М. : Машиностроение, 1985. – 127 с.

80. Справочник сварщика / Под. ред. В. В. Степанова – М. : Машиностроение, 1974. – 519 с.

81. Степанов Б. В. Высокопроизводительные методы наплавки. – М. : Машиностроение, 1977. – 74 с.

82. Вельбой В. П. Технології і обладнання для напилення / В. П. Вельбой, П. В. Каплун // Хмельницький, ТУП. – 2007. – 162 с.

83. Упрочнение деталей лучом лазера. Под ред. В. С. Коваленка. – К. : Техника. – 1990. – 192 с.

84. Месяц Г. А. Надежность машин для переработки пластмасс / Г. А. Месяц, В. Г. Нечипоренко, О. А. Коханова. – К. : Техника, 1972. – 140 с.

85. Картинский Ц. Т. Технологические параметры ионного азотирования // Вестник машиностроения, 1979. - №12. – с. 56–58.

86. Бялік О. М. Металознавство / О. М. Бялік, В.С. Черненко, В. М. Писаренко, Ю. Н. Москаленко, - 2-ге вид., перероб. і доп. – К. : ІВЦ “Видавництво “Політехніка”, 2002. – 384 с.

87. Хрущев М. М. Абразивное изнашивание / М. М. Хрущев, М. А. Бабичев. – М. : Наука. – 1970. – 252 с.

88. Шевеля И. В., Деркач В. В. Методы упрочнения цилиндров экструдеров / ОАО “УкрНИИпластмаш”. - Киев, 1995. - 13 с. - Рус. - Деп. в ГНТБ Украины 03.07.95, № 1647 - Ук95 // Анот. в библиограф. указат. “Депонированные научные работы ВИНТИ”, № 10 (286), 1995, б/о 318.

89. Гладченко А. Н., Деркач В. В. Механизм формирования износостойкого слоя при центробежной наплавке цилиндров / ОАО “УкрНИИпластмаш”. - Киев, 1995. - 13 с. - Рус. - Деп. в ГНТБ Украины 03.07.95, № 1648 - Ук95 // Анот. в библиограф. указат. “Депонированные научные работы ВИНТИ”, № Ю(286), 1995, б/о 319.

90. Гладкий П. В. Центробежная плазменная наплавка. Новые процессы наплавки, свойства наплавленного металла и переходной зоны / П. В. Гладкий, А. И. Сом, Е. Ф. Переплетчиков // – К. : ИЭС им. Е.О. Патона, 1984. – С. 31–34.

91. Студент М. М. Розроблення багатofункціональних електродугових покриттів із порошкових дрітів на основі Fe-Cr-V-Al та Fe-Cr-C-Al – Автореферат дис. д-ра техн. Наук: 05.02.01.– Львів.–2011.– 33 с.

92. Сороко-Новицкая А. А. Износостойкость углеродистой стали, имеющей различную структуру // Трение и износ в машинах. – М. : 1959. – С. 5–18.

93. Murray M. J. Abrasive wear mechanisms in steels / M. J. Murray, P. J. Mutton, J. D. Watson // Transactions ASME. – 1982. – V.104. – P. 9–16.

94. Паисов И. В. Исследование износостойкости сложнолегированных высокопрочных сталей / И. В. Паисов, В. Г.

Кречмер // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 1965. – N5. – С. 148–151.

95. Виноградов В. Н. Абразивное изнашивание бурильного инструмента / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, В. А. Доценко. – М. : Недра, 1980. – 205 с.

96. Брыков М. Н. Разработка и применение научно-технических основ проблемы износостойкости стабильных и метастабильных сталей и сплавов при абразивном изнашивании / Дисс. докт. техн. наук: 05. 02. 04. 05. 02. 01. - Запорожье, 1985.–355с.

97. Шулепникова А. Г. Влияние состава, структуры и изменений в поверхностных слоях стали на сопротивление изнашиванию их железной рудой и агломератом // Трение и износ в машинах. – М. : 1964. – С. 17–28.

98. Лившиц Л. С. Основы легирования наплавленного металла. Абразивный износ / Л. С. Лившиц, Н. А. Гринберг, Э. Г. Куркумелли. – М. : Машиностроение, 1969. – 188 с.

99. Misra A. A review of the abrasive wear of metals / A. Misra, I. Finnie // Trans. ASME J. Eng. Mater. and Technol. – 1982. – 104. – N2. – P. 94–101.

100. Jian-Min Tong, Yi-Zhong Zhou, Tian-Yi Shen and Hai-Jin Deng. The influence of retained austenite in high chromium cast iron on impact-abrasive wear // Wear Volume 135, Issue 2, January 1990, – P. 217–226.

101. Гуляев А. П. Металловедение. – М. : Металлургия, 1977. – 647 с.

102. Лахтин Ю. М. Химико-термическая обработка металлов. / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов М. : Металлургия, 1985. – 256 с.

103. Лахтин Ю. М. Материаловедение. –3-е изд., перераб. и доп. Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.

104. Мохорт А. В. Термічна обробка металів / А. В. Мохорт, М. Г. Чумак // – К. : Либідь, 2002. – 512 с.

105. Гарнець В. М. Матеріалознавство. –К. : Кондор, 2009. – 386 с.

106. Термическая обработка в машиностроении: Справочник / Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. – М. : Машиностроение, 1980. – 783 с. : ил.

107. Стамбурский Е. А. Износ оборудования при переработке пластмасс / Е. А. Стамбурский, А. И. Бейль, В. П. Карливан и др. – М.: Химия, 1985. – 208 с.

108. Reinhard H., Hartung P. Verschleiss bei Verarbeitung von Kunststoffen // Kunststoffe – 1986. – Bd. 76. – №4. – P. 369–374.

109. Каплун В.Г. Дослідження працездатності і надійності термопластавтомата ДБ 33-28 при переробці пластмасс / В. Г. Каплун, П. В. Матвійшин, В. А. Гончар // Вісник Хмельницького національного університету, 2008. – №4. – С. 87–94.

110. С. Martini , G. Palombarini, G. Poli and D. Prandstraller. Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings // Wear Volume 256, Issue 6, March 2004, – P. 608–613.

111. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. – Харьков : НЕЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.

112. Мохорт А. В. Термічна обробка металів. / А. В. Мохорт, М. Г. Чумак // К. : Либідь, 2002. – 512 с.

113. Арзамасов Б. Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти – М. : Изд-во МГТУ им Н. З. Баумана, 1999. – 400 с.

114. Каплун В. Г. Енерго і ресурсоберігальна екологічно чиста технологія і обладнання для зміцнення деталей машин / В. Г. Каплун, І. М. Пастух // Машиностроение, 2002. – №2. – С. 49-51.

115. Сапоніт Ташківського родовища. Сертифікат якості. Інститут біоколоїдної хімії НАН України Затверджено 18.09.1995р. – 4 с.

116. Пат. 34233 Україна Пристрій для випробувань на корозійно-абразивний знос / В. Г. Каплун, В. А. Гончар. // №u2007 13431; заявл. 03.12.2007; опубл. 11.08.2008, Бюл.№15.

117. Каплун В. Г. Умови роботи та характер зношування деталей екструдера при виготовленні комбікормів для тваринництва / В. Г. Каплун, В. А. Гончар // Проблеми трибології (Problems of tribology). – Хмельницький, 2008. – №3. – С. 44–47.

118. Каплун П. В. Вплив покриттів на зносостійкість і довговічність підшипників кочення: автореф. дис. канд. тех. наук: 05. 02. 08 / Київ, 2004. – 20 с.

119. Паршенко К. В. Вплив залишкового аустеніту та його насичення азотом на зносостійкість і довговічність сталі X12 в

умовах тертя кочення: автореф. дис. канд. тех. наук: 05. 02. 04 / Хмельницький, 2009. –18 с.

120. Леонтьев Н. Л. Техника статистических вычислений / Лесная промышленность, 1996. – 236 с.

121. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента / Владислав Борисович Тихомиров – М. : Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

122. Асатурян В. И. Теория планирования эксперимента: учеб. пособие для вузов. – М. : Радио и связь, 1983. – 248 с. : ил.

123. Попов В. С. Долговечность оборудования огнеупорного производства / В. С. Попов, Н. Н. Бриков, Н. С. Дмитриченко, П. Г. Приступа // Изд-во “Металлургия”, 1978. – 232 с.

124. Уманский Я. С. Рентгенография металлов. – М. : “Металлургия”, 1967. – 235 с.

125. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Пер. с англ. Изд. 2-е М. : Физматгиз, 1963. – 696 с.

126. Чалмерс Б. Физическое металловедение Пер. с англ. М. : Metallurgizdat, 1963. – 455 с.

127. Гончар В. А. Методика дослідження зносостійкості шнека екструдера для переробки фуражного зерна з добавками мінералу сапоніту // Проблеми трибології (Problems of Tribology), 2008. – №4. – С. 19–21.

128. Каплун В. Г. Дослідження зносостійкості пар тертя в середовищі фуражного зерна з добавками мінералу сапоніт / В. Г. Каплун, В. А. Гончар // Проблеми трибології (Problems of Tribology), 2011. – №2. – С. 17–20.

129. Каплун В. Г. Дослідження зносу і тиску в матеріальному циліндрі термопластавтоматів при переробці пластмас / В. Г. Каплун, П. В. Матвіїшин, В. А. Гончар // Проблеми трибології(Problems of Tribology), 2007.– №3. – С. 25–29.

130. Гончар В. А. Підвищення довговічності матеріального циліндра екструдера для переробки фуражного зерна з добавками сапоніту. / В. А. Гончар, В. Г. Каплун Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, випуск 40, част. I. – Кіровоград : КНТУ, 2010. – С. 169–173.

131. Каплун В. Г. Математичне моделювання закономірностей розподілу твердості по товщині азотованого шару при азотуванні в тліючому розряді / В.Г. Каплун, П. В. Каплун, В.

А. Гончар // Вісник Хмельницького національного університету. Техн. Науки. – Хмельницький, 2012. – №3. – С. 7–10.

132. Матвійшин П. В. Розрахунок зносостійкості і довговічності градієнтних покриттів при абразивному зношуванні / П. В. Матвійшин, В. А. Гончар, П. В. Каплун, В. Г. Каплун // Проблеми трибології (Problems of Tribology), 2012. – №1. – С. 116–119.

133. Гончар В.А. Порівняльні дослідження зносостійкості зразків з різними властивостями в модельному абразивному середовищі / Проблеми трибології (Problems of Tribology), 2012. – №2. – С. 38–41.

134. Гончар В.А. Дослідження властивостей азотованого шару сталі ШХ15 та його зношування в абразивному середовищі / В. А. Гончар, П. В. Каплун // Проблеми трибології (Problems of Tribology), 2013. – №1. – С 36–41.

135. Гончар В. А. Зносостійкість сталі 45 в корозійно-абразивному середовищі після іонного азотування / В. А. Гончар, П. В. Каплун // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.-Хмельницький, 2013.– №2. – С. 57–61.

136. Гончар В. А. Зносостійкість сталі Х12 в водному розчині муки з добавками мінералу сапоніту // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. Випуск 12.(75), 2013. – С. 6–14.

137. Брыков Н. Н. К вопросу о закономерностях сопротивляемости сталей и сплавов абразивному изнашиванию / Н. Н. Брыков, М. Н. Брыков // Проблеми трибології (Problems of Tribology), 1997. – N4. – С. 13–20.

138. Кузьменко А. Г. Методика испытания на абразивный износ по схеме Бринелля–Ховарта (Br-Hv). Часть I. Теоретические основы метода / А. Г. Кузьменко, О. В. Вишневский // Проблеми трибології (Problems of tribology), 2012. – №4. – С. 102–108.

139. Кузьменко А. Г. Контакт, трение и износ самозаных поверхностей / А. Г. Кузьменко, А. В. Дыха // Хмельницький : ХНУ, 2007. – 344 с.

140. Дроздов Ю. Н. Исходные зависимости для расчета на знос деталей машин // Известие ВУЗов. Машиностроение, 1980. – №6. – С. 155–157.

141. Дроздов Ю. Н. Определение интенсивности изнашивания деталей машин // Весник машиностроение, 1980.– №6. – С. 12–15.

142. Брыков Н. Н. Влияние условий изнашивания на степень упрочнения и износостойкость метастабильных аустенитных сплавов / Н. Н. Брыков, Г. А. Пугачев, М. Н. Брыков // Проблеми трибології (Problems of Tribology), 2003. – №4. – С. 157–172.

143. Пат. 64797 Україна Шнек екструдера підвищеної довговічності / В. Г. Каплун, В. А. Гончар. // №u201102333; заявл. 28.02.2011; опубл. 25.11.2011, Бюл.№.22.

144. Пат. 65922 Україна Спосіб підвищення зносостійкості шнека екструдера / В. Г. Каплун, В. А. Гончар. // №u201102299; заявл. 28.02.2011; опубл. 26.12.2011, Бюл.№.24.

145. Гончар В. А. Умови роботи вузла екструдювання екструдерів при переробці фуражного зерна з добавками сапоніту. / В. А. Гончар, В. Г. Каплун // тези доп. “VI міжн. конф. молодих науковців “Інформатика та механіка” м. Кам’янець – Подільський, 2008 – С. 64–65.

146. Гончар В. А. Дослідження працездатності термопласт автоматів і екструдерів при переробці різних матеріалів./ В. А. Гончар, В. Г. Каплун, П. В. Матвійшин // тези доп. МНТК “Ольвійський форум- 2008: Стратегія України в геополітичному просторі” м. Ялта, Крим, 2008. – С. 135–137.

147. Гончар В.А. Умови роботи вузла екструдювання екструдерів при переробці фуражного зерна з добавками сапоніту. / В.А. Гончар, В.Г. Каплун // тези доп. “VI міжн. конф. молодих науковців “Інформатика та механіка” м. Кам’янець – Подільський, 2008 С64-65.

148. Гончар В.А. Дослідження працездатності термопласт автоматів і екструдерів при переробці різних матеріалів./ В.А. Гончар, В.Г. Каплун, Матвійшин // тези доп. МНТК “Ольвійський форум- 2008: Стратегія України в геополітичному просторі” м. Ялта, Крим, 2008 С.

149. Гончар В.А. Технологічні методи підвищення зносостійкості деталей матеріального циліндра при баро-термічній переробці зерна з добавками мінералу сапоніту./ В.А. Гончар, В.Г. Каплун // матеріали МНТК “Ольвійський форум-2012: Стратегія України в геополітичному просторі” м.Севастополь, 2012 С37-38.

ЧАСТИНА II

Матвіїшин П.В., Павліський В.М.

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТІВ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ПЛАСТМАС

ВСТУП

В сучасних умовах розвитку суспільства все більше застосування в народному господарстві і техніці мають пластмаси. Вироби із пластмас в техніці і побуті в багатьох випадках перевищують 50 % від загальної кількості вживаних предметів [1]. Відповідно до прогнозів світове виробництво пластмас, що складало в 2000 р 160 млн. т., щорічно збільшуватиметься на 4 % [2]. Причиною такого поширеного застосування пластмасових виробів є ряд їх переваг перед іншими матеріалами, що пов'язані з економічністю і практичністю. Використання різного роду наповнювачів [3–6] до пластмас ще більше розширює масштаби їх застосування в різних галузях промисловості. В зв'язку з цим великий розвиток отримало обладнання для переробки пластмас, серед якого найбільше застосування мають екструдери і термопластавтомати.

Термопластавтомати на відміну від екструдерів є машинами циклічної дії і мають більш складні конструкцію та умови експлуатації. Для сучасних машин характерними є такі напрямки їх розвитку, як автоматизація, підвищення робочих параметрів – навантажень, швидкостей, температур, боротьба за малі габарити і масу, підвищення вимог до точності і функціонування, до ефективної роботи (продуктивності, потужності, коефіцієнта корисної дії). Ускладнення машин і збільшення вимог до них привели до необхідності підвищення вимог до їх працездатності, надійності і довговічності.

На працездатність і надійність термопластавтоматів великий вплив мають багато факторів, зокрема геометричні параметри шнеків, сили в матеріальному циліндрі, що виникають в процесі експлуатації, технологія виготовлення та фізико-механічні характеристики поверхні, шнека і циліндра, властивості перероблюваного матеріалу, величина зазору між шнеком і циліндром, зносостійкість пари “шнек-циліндр”, тощо.

Одним із основних вузлів термопластавтоматів є вузол пластикації – матеріальний циліндр. В сучасних термопластавтоматах найбільш поширеними є вузли пластикації з обертовим і зворотно-поступальним рухом шнека. Зносостійкість вузла пластикації, особливо пари “шнек–циліндр”, має великий вплив на працездатність і довговічність машини в цілому.

В літературі є багато досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених, присвячених питанням лиття під тиском полімерних матеріалів, зокрема робіт з вивчення процесів шнекової пластикації, конструкції шнеків і їх впливу на процеси пластикації, конструкції механізмів замикання прес-форм та їх впливу на якість продукції, тощо. Проте досліджень зносостійкості пари “шнек–циліндр” в середовищі розплаву пластмас дуже мало.

Шнек термопластавтомату з врахуванням особливостей його конструкції та навантаження працює в надзвичайно важких умовах, особливо при переробці пластмас з наповнювачами. Вплив підвищеної температури та агресивності середовища ще більш ускладнюють умови його роботи. Тому підвищення зносостійкості шнеків при переробці пластмас з наповнювачами, дослідження величини та розподілу тиску в матеріальному циліндрі, вивчення впливу зазору між шнеком і циліндром на продуктивність машини та якість продукції є актуальною проблемою.

РОЗДІЛ 7

СТАН ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ПРАЦЕЗДАТНОСТІ І НАДІЙНОСТІ ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТІВ

7.1. Особливості конструкції і експлуатації термопластавтоматів

Термопластавтомат – це машина для лиття полімерних матеріалів під високим тиском циклічної дії з автоматизованим виготовленням виробів.

В техніці існує багато конструкцій машин для лиття полімерних матеріалів з циклічною дією, опису розрахунку і проектуванню яких присвячена велика кількість робіт [9–32].

Лиття під тиском є самим поширеним способом одержання виробів з полімерних матеріалів і включає в себе пластикацію гранульованого або порошкового матеріалу і його переміщення під високим тиском і на великій швидкості в формувальну ємкість ливформи, де він твердіє за рахунок охолодження. В залежності від конструкції ливарної машини відбувається переробка різних матеріалів: термопластів, реактопластів і еластомірів. Термопласти досягають пластичності за рахунок нагріву і можуть перероблятися кілька разів. Вони можуть мати натуральний вид, краситися, армуватися або мати перетворювачі. За структурою термопласти бувають аморфними або частково кристалічними. Реактопласти і еластоміри також “зшиваються” за допомогою тепла, проте на відміну від термопластів повторному розплавленню не підлягають [9, 11, 32].

Термопластавтомат складається з трьох основних вузлів [9, 10, 32]: вузол змикання, вузол пластикації і станина з системою приводу і системою управління (рис. 7.1) [9].

Вузол пластикації є одним з найважливіших вузлів термопластавтомата. Функціонально він є аналогічним одношнековому екструдеру за винятком того, що шнек термопластавтомата рухається в матеріальному циліндрі вздовж осі, проштовхуючи розплав полімеру в прес-форму. Його основним завданням є приймання і переміщення твердих гранул і добавок, їх розплавлення, переміщення розплаву, змішування маси, можлива дегазація розплаву і створення тиску. На відміну від типового

екструдера, в якому шнек обертається безперервно і не змінює свого положення, шнек термопластавтомата обертається періодично і робить зворотно-поступальний рух вздовж осі матеріального циліндра.

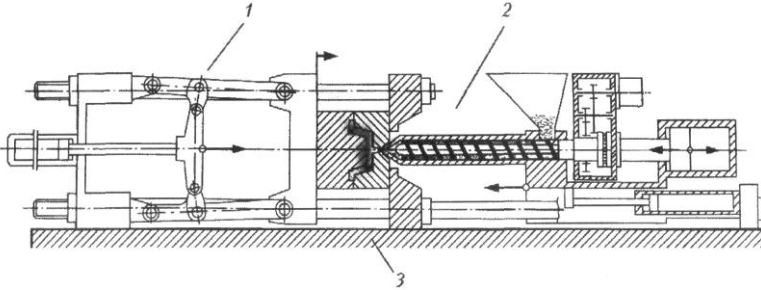


Рис. 7.1. Схематична структура машини для лиття:
1 – вузол змикання; 2 – вузол пластикації; 3 – станина

Вузол пластикації є одним з найважливіших складових термопластавтоматів, від яких в значній мірі залежить працездатність, надійність і довговічність машини та якість виробів. Конструкція вузла пластикації наведена на рис. 7.2 [10] і включає такі основні складові: шнек, наконечник, матеріальний циліндр, нагрівач, сопло, загрузочний бункер, гідроциліндр, привід обертання шнека.

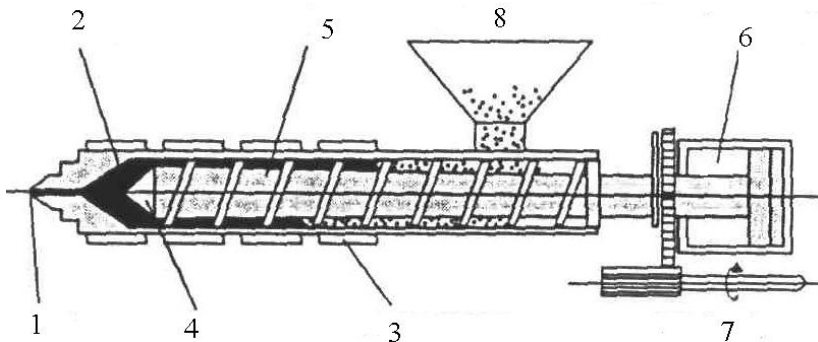


Рис. 7.2. Схема вузла пластикації з зворотно-поступовим рухом шнеку:
1 – сопло, 2 – матеріальний циліндр, 3 – нагрівачі, 4 – наконечник, 5 – шнек, 6 – гідроциліндр, 7 – привід шнека, 8 – бункер

Однією з найважливіших частин вузла пластикації є шнек [10, 26, 35] (рис. 7.3). Він являє собою довгий циліндр з однією і більше гвинтовими нарізками і зворотнім клапаном на кінці. При обертанні шнека матеріал переміщується, нагрівається і змішується, в окремих випадках відбувається дегазація розплаву полімеру, що вимагає спеціальної геометрії шнека (для двохзонного шнека). Основною вимогою до шнека є подача гомогенного високоякісного розплаву до кінця шнека на протязі циклу і від циклу до циклу. Поняття “гомогенний” відноситься як до однорідності температури, так і до консистенції. Ці властивості розплаву досягаються геометрією і конструкцією шнека і описані в роботах [9, 10, 16, 22, 25, 30].



Рис. 7.3. Типовий шнек пластифікатора для лиття під тиском

Найбільш поширеною конструкцією шнека для переробки основних видів термопластів є універсальний шнек, що має три зони нарізки: завантаження, стиску і дозування. Як правило, довжина шнека приводиться як кратне до діаметру D . Довжина сучасних універсальних шнеків складає $20D$. Така довжина шнека обумовлена підвищеними вимогами до продуктивності пластифікатора, однорідності розплаву і зносостійкості.

Універсальний шнек має одну гвинтову нарізку з кроком D постійним по всій довжині шнеку. Довжина зони завантаження складає біля 50 % від загальної довжини, тоді як довжина зон стиску і дозування складає по 25 %. Ширина гребня складає біля 10 % D . Глибина каналу H в зоні завантаження більша, ніж в зоні дозування. Співвідношення цих зон називають ступенем стику,

який складає від 2,5 до 3 [9, 10, 12–18, 37]. Тиск, що створюється шнеком, повинен бути достатнім для виштовхування шнека при його русі назад після вприскування. Величина цього тиску складає біля шести бар і може регулюватися [10, 38].

Такі шнеки можуть використовуватися для переробки всіх видів термопластів. Універсальні шнеки великої довжини створюють небезпеку деструкції полімерного матеріалу, що обумовлена великим часом витримки та інтенсивною механічною і температурною дією. При необхідності інтенсивної гомогенізації (наприклад докрашування полімерного матеріалу в машині) використовують шнеки зі змішувальними компонентами. Гігроскопічні матеріали можуть перероблятися без попередньої сушки з допомогою дегазуючих шнеків [9, 10, 23].

На якість виробів великий вплив має гомогенність розплаву, яка досягається і за рахунок зони змішування, що знаходиться в кінці шнека [22, 39, 40]. До зони змішування ставиться ряд вимог [10, 39, 41]: рівномірність потоку розплаву, мінімальний перепад тиску; повна очистка циліндра; легкість управління; простота переробки. Для одержання доброї якості змішування на матеріал повинні діяти високі і рівномірні зсувні напруження. Це досягається проходженням матеріалу через невеликий зазор [10, 42]. Для покращення змішування рекомендується [10, 25, 42, 44]: приймати кут гвинтової нарізки 20 градусів, збільшити радіус заокруглення гребня до значення його висоти; нанести на поверхню шнека покриття з низьким коефіцієнтом тертя.

Важливу роль в процесі лиття під тиском має пластикація. При малій довжині шнека можливе нерівномірне і неповне розплавлення матеріалу. Крім того, осьове переміщення шнека знижує ефективність плавлення [9, 13, 15, 33]. Можливе забивання шнека і утворення твердої “пробки”, що викликає нестабільність в роботі. При утворенні пробки виникають бокові сили, що приводять до деформації шнека та швидкого його зносу [19, 20, 25, 34]. Автори [33, 34] вважають, що шнеки з бар’єрною нарізкою сприяють кращій пластикації матеріалу в зв’язку з тим, що за бар’єр не проникають частинки твердого матеріалу і в розплаві полімеру при проходженні над гребенем бар’єра відбувається диспергуєче змішування. Проте, такий процес пластикації ще недостатньо вивчений. Високій ефективності плавлення сприяють

наступні особливості шнека [10, 43]: багато гребенів в зоні плавлення; невеликий зазор між гребенем і стінками матеріального циліндрів; велика зона стиску (не менше 5 діаметрів шнека); збільшення кута гвинтової нарізки.

В термопластавтоматах шнек при обертанні подає масу розплаву в передню частину матеріального циліндра, відходячи при цьому назад. При заповненні камери до повного об'єму шнек переміщається штоком гідроциліндра вперед, вприскуючи порцію розплаву в прес-форму. Для зменшення перетоку в зворотному напрямку при вприскуванні на шнеку встановлюється зворотній клапан. Існують різні конструкції зворотного клапану: кулькові і кільцеві [10, 35, 46]. При переробці термопластичних матеріалів більш широке застосування мають клапани кільцевого типу [10]. Для з'єднання передньої частини матеріального циліндра з формою застосовують мундштуки, всередині якого є проточний канал для розплаву. Мундштуки бувають з вільним витокком і з клапанами [10, 13, 32]. Їх конструкція впливає на якість роботи машини.

Матеріальний циліндр вузла пластикації являє собою прямий товстостінний циліндр, що щільно охоплює шнек. Радіальний зазор між шнеком і циліндром зазвичай складає 0,20 мм. В пластикаторів діаметром 40 мм зазор складає 0,15 мм [37]. В зв'язку з тим, що в термопластавтоматах шнек має обертовий і зворотно-поступальний рух, зазор між гребенем шнека і циліндра більший ніж в екструдерів (рис. 1.3) [2, 10]. Величина зазору впливає на процес пластикації і продуктивність машини [9, 22, 24, 45]. Матеріальний циліндр часто відливають відцентровим литвом з двох металів. При переробці реактопластів матеріальний циліндр виготовляють з подвійною стінкою. В зоні завантаження механічним методом робиться отвір, який з'єднується з бункером. Для дегазації розплаву в матеріальному циліндрі роблять дегазуючий отвір після зони розплаву полімерного матеріалу.

Завантажувальний бункер слід конструювати так, щоб забезпечувати безперебійну подачу полімеру і краще його робити циліндричним з конічним переходом для зниження вірогідності стопоріння матеріалу [10, 16, 32]. Особливо це важливо при роботі з важкосипучими матеріалами з великим розбігом розміру часток різної форми. Для таких матеріалів застосовують спеціальні вібраційні прокладки, покриття з низьким коефіцієнтом тертя, рухомі скребки в бункері, тощо [10, 22].

Після попадання частинок полімерного матеріалу в канал шнека механізм переміщення матеріалу стає вимушеним. Сили тяжіння тут відіграють незначну роль, а переважають сили проштовхування. При цьому діють дві конкуруючі сили на матеріал [10]. Одна – сила тертя між полімером і циліндром. Друга – сила тертя між матеріалом і шнеком. Важливим є те, щоб відрізнити яка з цих двох сил тертя є рухомою, а яка є силою опору.

Рухомою силою є сила тертя між полімером і матеріальним циліндром. Сила тертя між шнеком і матеріалом є силою опору, яка діє проти переміщення. При відсутності сили тертя між полімером і циліндром відбувається лише обертання матеріалу разом з шнеком без поздовжнього переміщення. Таким чином, для стабільного переміщення полімеру необхідно мати велику силу тертя між матеріалом і циліндром та мінімальну силу тертя між матеріалом і шнеком [10, 24 25]. Для цього в матеріальному циліндрі роблять поверхню з більшою шорсткістю, підбирають матеріал з високим коефіцієнтом тертя, роблять поздовжні пази тощо, а поверхню шнека шліфують і полірують та покривають матеріалом з низьким коефіцієнтом тертя. Аналізу переміщень твердих речовин в екструдері присвячено багато зарубіжних [9, 10, 30, 47 ,48] і вітчизняних [11–32] робіт.

При пластикації полімерного матеріалу існує два джерела нагріву. Перше – нагрів від електронагрівачів, що розміщуються вздовж матеріального циліндра, друге – за рахунок утворення тепла при терті і в'язкій течії полімерного матеріалу. Нагрів за рахунок тертя відбувається при ковзанні частинок пластмаси по металевій поверхні та між собою. Нагрів за рахунок в'язкої течії в розплаві полімеру виникає в основному при зсувних навантаженнях від обертання шнека. Швидкість зсуву в каналі шнека є мірою зсувної дії на розплав і приблизно дорівнює відношенню тангенціальної швидкості обертання шнека до глибини каналу ($v = v_T/h$). Швидкість зсуву в вузлі пластикації збільшується зі збільшенням частоти обертання шнека.

В зв'язку з високою в'язкістю розплаву полімерного матеріалу найбільший вклад в теплоутворення вносять сили тертя і в'язкості. Зі збільшенням частоти обертання шнека вклад нагрівання за рахунок в'язкості зростає, а вклад нагрівачів матеріального циліндра зменшується.

Процес плавлення матеріалу починається при досягненні температури плавлення полімеру на поверхні матеріального циліндра на віддалі приблизно 5 діаметрів шнека від отвору завантаження. В літературі описані різні моделі плавлення полімеру в екструдерах і термопластавтоматах [10, 18, 20, 25, 28, 49–52], на основі яких визначаються всі параметри процесу (температуру і її розподіл, швидкість плавлення, товщину плівки розплаву, тощо), від параметрів шнека, матеріального циліндра та характеристик привода. Автори [2] рекомендують способи підвищення ефективності плавлення:

- попередній нагрів полімерного матеріалу перед його входом в вузол пластикації;
- підвищення температури матеріального циліндра, при роботі на низьких частотах обертання шнека;
- зниження температури матеріального циліндра при роботі на високих частотах обертання;
- забезпечення малого зазору між гребенем шнека і матеріальним циліндром.

Якість продукції в значній мірі залежить від гомогенності розплаву, яка забезпечується надійним і ефективним змішуванням його компонентів. Трьохзонний універсальний шнек (рис. 7.3) став де-факто стандартом змішування, який в основному відповідає вимогам змішування. Проте можливості даної конструкції дещо обмежені, оскільки вже є можливості оперативного змішування полімерних матеріалів з добавками та з різними властивостями. Для вирішення цієї проблеми розробляються оптимальні конструкції шнека [53–59] з зоною змішування для різних матеріалів за різними схемами: з розподілом частинок при зсувній течії [20]; течії з розтягом [54]; з поперечним розподілом фаз [54, 55]; диспергуючим змішуванням [56–59]. Вивчення фізичних явищ, що відбуваються при цих схемах змішування [60, 61], дозволило розробити ряд оригінальних конструкцій шнеків і пристроїв в зоні змішування [62–69], що забезпечують високоефективне змішування і гомогенність розплаву полімерів з добавками.

Привід вузла пластикації термопластавтоматів може бути гідравлічним і електричним [9, 10, 13–17, 32] гідравлічний привід можна використовувати для обертання шнека і його переміщення вперед. В останній час застосовується електричний привід для мало і середньотонажних термопластавтоматів для обертання шнека і

гідравлічний привід для переміщення вперед. Існують конструкції термопластавтоматів, в яких застосовується тільки електричний привід вузла пластикації [10, 21].

Вузол змикання прес-форм термопластавтомата є одним з найважливіших вузлів, від надійності роботи якого залежить якість продукції. Він забезпечує щільне прилягання обох половинок прес-форми однієї до другої в період вприскування розплаву пластмаси, витримки його під тиском і охолодження готового виробу. В процесі роботи пристрій замикання виконує наступні операції: контакт прес-форми з мундштуком; змикання і розмикання форми; створення зусилля змикання половинок форми; виштовхування виробу з прес-форми. В літературі існує багато конструкцій вузла змикання [13–17, 32], які класифікуються як гідравлічні (пневматичні), гідромеханічні і механічні.

Гідравлічні пристрої замикання бувають прямої дії та двохступеневі [32] і відносяться до механізмів силового замикання, в яких зусилля замикання і утримання форми в закритому положенні є по відношенню до механізму зовнішнім. Такі пристрої мають велику масу.

Гідромеханічні і механічні пристрої замикання є механізмами з кінематичним замиканням. В цих механізмах щільне замикання пів-форм створюється незначними зусиллями приводного механізму і після припинення його дії утримання прес-форми в замкнутому положенні відбувається за рахунок внутрішніх сил від пружної деформації ланок. Маса таких механізмів замикання значно менша в порівнянні з гідравлічними.

Гідромеханічні пристрої замикання одержали саме широке застосування в термопластавтоматах різної потужності в зв'язку з рядом переваг: більша швидкість запирання в порівнянні з іншими конструкціями; мала вага; безударне змикання пів-форм; плавність руху; безступеневе регулювання швидкості; зручність управління [32]. Такий пристрій включає прес-форму, направляючі колони, кривошипно-шатунний механізм і гідроциліндр [13, 32].

Універсальність термопластавтомата визначається перш за все параметрами вузла замикання, які мають великий вплив на техніко-економічні показники машини. Серед ряду параметрів, необхідних для конструювання механізму змикання [10, 13, 28, 32], основним параметром, що впливає на якість продукції, є зусилля замикання форми. Навіть незначне перевищення зусилля, що

розкриває форму в період вприскування розплаву, над зусиллям замикання викликає розкриття форми, викид частини розплаву і утворення облою навколо виробу. При вприскуванні розплаву полімеру в форму виникають перехідні динамічні процеси, що викликають коливання пружної системи механізму замикання. Величину зусилля замикання слід вибирати з достатньою точністю, оскільки від його величини залежить маса машини. Існують різні методики розрахунку зусилля замикання прес-форм [10, 28, 32]. Проте багато з них не враховують вплив динамічних коливань в прес-формі в період вприскування розплаву, які можуть викликати розкриття форми на недопустимі величини. Ці явища необхідно враховувати при розрахунках жорсткості ланок механізму замикання для кожної його конструкції. Приклад такого розрахунку наведений в роботі [10].

Переробка полімерних матеріалів являє собою ряд процесів, з допомогою яких вихідний матеріал перетворюється в виріб з заданими властивостями. Основні методи переробки пластмас висвітлені в роботах [9, 10, 20, 71], найпоширенішим з яких є метод екструзії.

Основними технологічними параметрами процесу екструзії є частота обертання шнека, температурний режим, тиск на виході в зоні дозування і в прес-формі. В процесі переробки пластмас в матеріальному циліндрі термопластавтоматів відбуваються складні процеси, що пов'язані з переміщенням в осьовому напрямі в гвинтовому каналі шнека, ущільненням, розплавленням, дегазацією, гомогенізацією і вприскуванням в форму. Математичний опис процесів наведено в роботах [18, 20, 71, 72, 73].

Частота обертання шнека складає $n = 10\text{--}100 \text{ хв}^{-1}$ при лінійній швидкості $\vartheta = 0,5\text{--}1,0 \text{ м/с}$. Температура в матеріальному циліндрі змінюється від кімнатної до температури плавлення полімеру з перегрівом $20\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$. Тиск в різних зонах різний, збільшується від зони завантаження до зони дозування і може досягати $60\text{--}80 \text{ МПа}$ і має великий вплив на величину зносу шнека і циліндра та на величину зазору між ними. Режими переробки основних видів полімерів наведені в роботах [11, 18, 74, 75]. При роботі термопластавтоматів відбувається поступове збільшення зазору між шнеком і циліндром, що приводить до погіршення технологічних характеристик і техніко-економічних показників

роботи обладнання, знижується продуктивність і якість продукції, зростають витрати електроенергії.

В зв'язку з високою інтенсивністю зношування шнеків і циліндрів при переробці полімерів з абразивними наповнювачами, збереження зазору в необхідних границях є одним з першочергових завдань, що визначають працездатність термопластавтомата [76].

Забезпеченню граничного стану робочих органів за критерієм радіального зазору присвячено ряд робіт [19, 45, 77, 78, 79]. Числові розрахунки [79] показують, що при збільшенні радіального зазору на 1 % діаметра черв'яка для повної компенсації падіння тиску при переробці поліпропілену і поліетилену низької щільності необхідно збільшити частоту обертання черв'яка в 1,5 рази. За даними [45] збільшення зазору від 0,055 до 0,27 мм в екструдері 4П 63-25 при переробці поліетилену високого тиску приводить до трьох кратного збільшення витрат виробництва, зменшенню продуктивності на 20 % і збільшення витрат електроенергії на 50 %.

На зношування шнека і циліндра великий вплив мають перероблювані матеріали в залежності від їх матриці, типу і конструкції наповнювача, хімічної агресивності технологічних добавок (каталізаторів, емульгаторів, пігментів), вологості, продуктів деструкції, тощо [76, 80, 81]. Основним фактором, що визначає інтенсивність зношування при переробці полімерних матеріалів, є абразивність наповнювача [3, 82]. Наповнювачі діляться на дисперсні і волокнисті. Головне призначення перших полягає в збільшенні об'єму, а других – в підвищенні міцності. За твердістю наповнювачі бувають від 1 до 7 балів за мінералогічною шкалою. Наповнювачі порошковидні (карбіди, бориди, нітриди, оксиди) мають ще більшу твердість [3, 70, 82]. Розміри частинок наповнювачів знаходяться в таких межах: зернисті – від 0,005 до 30,0 мкм; волокнисті – від 0,75 до 700 мкм.

Серед волокнистих наповнювачів для армування полімерів 95 % загального об'єму займає скловолокно [83], яке, зазвичай, вводять в полімери в розмірі 20–40% всієї маси. Вплив твердості, концентрації, форми і розмірів наповнювача на зношування металу розглянуто в роботах [19, 76, 83, 84].

Переробка пластмас супроводжується термічною, термомеханічною і механічною деструкцією молекул. В результаті утворюються активні частинки (вільні радикали), міняється

структура, фізичні і хімічні властивості полімеру. Продукти деструкції характеризуються великою активністю і реакційною здатністю по відношенню до металів, які в свою чергу впливають на деструкцію полімерів [85]. Основну роль в процесі хімічної взаємодії полімеру і металу грають речовини, що виділяються при розпаді полімеру, а також залишки мономеру і інших продуктів, наприклад, гідроксильні, перексильні, карбонільні групи, вуглекислий газ, вода, формальдегід, кислоти [19]. Дослідження [86] показали, що навіть при переробці нейтрального поліаміду 6.6 при наповненні його скловолокном він диструдує за рахунок підвищеної температури переробки з виділенням карбонових кислот і газів. При цьому відбувається інтенсивна корозія металу.

Температура і тиск по-різному впливають на інтенсивність зношування. При абразивному зношуванні вплив температури на зношування менший, ніж вплив тиску [19]. В роботі [87] досліджувався вплив тиску P і швидкості зсуву v на зношування сталі 9520K при переробці склонаповненого поліаміду 6.6 і встановлено три види характеру зношування:

- коли P і v малі – абразивне зношування;
- коли P великий, а v мала – комбінація абразивного і корозійно-механічного зношування;
- коли P підвищений в v велика – гідроабразивне зношування.

При переробці склонаповненого поліаміду 6.6 інтенсивність зношування сталі зменшилась при підвищенні температури в зв'язку зі зменшенням в'язкості поліаміду і значно збільшилась зі збільшенням швидкості ковзання та тиску [88].

При викривленні шнека або циліндра, що можливо при дії зусиль згину в матеріальному циліндрі, чи деформації осі в процесі виготовлення, відбувається безпосередній контакт матеріалу шнека і циліндра. Це викликає катастрофічне зношування і навіть заїдання шнека в циліндрі [86, 89]. Подібні результати одержані авторами [91].

Автори [91] проводили дослідження розподілу зносу по дожині вузла пластикації в залежності від конструкції екструдера, типу перероблюваного матеріалу, зміцнювальної обробки поверхні. На основі проведених досліджень було встановлено види пошкоджень деталей вузла пластикації. Зокрема, черв'яки мали

такі види пошкоджень: об'ємне руйнування, тріщини, знос, задирки, корозія. Циліндри мали пошкодження: знос, задирки, корозія. Дослідження [91] показали, що в зоні завантаження знос черв'яків мінімальний і при переробці полімерів без наповнювачів не перевищував 0,5 мм. В зоні стиску (0,4–0,5 довжини черв'яка) знос максимальний. Після розплавлення полімеру знос зменшується і досягає мінімуму на довжині 0,75L від початку зони завантаження, а потім знову знос збільшується в зоні дозування.

Застосування вторинної сировини в кількості 10 % і 30 % збільшує знос азотованих черв'яків в порівнянні з сировиною без наповнювачів від 0,6 до 1,7 і 2,5 мм відповідно, що пояснюється забрудненням сировини абразивними домішками. Знос черв'яків при переробці поліетилену з наповнювачем каоліном в зоні стиску збільшився в 20 разів і складав 12,5 мм після 10 тис. годин роботи. Застосування наплавлення сплавом 10P6M5 значно зменшило знос. Якщо знос в зоні стиску прийняти за одиницю, то знос черв'яка в зоні загрузки складає 0,1–0,5, а в зоні дозування 0,8–1,2 для первинних матеріалів і 0,2–0,7 для полімерів з добавками вторинної сировини і наповнювачів [91]. Абразивний фактор цілком нівелює корозійний вплив полімерів.

По мірі руху полімеру вздовж вузла пластикації тиск і температура підвищуються, в результаті чого збільшується контактний тиск гранул і площа фактичного контакту з матеріалом робочих органів. З іншої сторони, при збільшенні температури, починаючи з її певних значень, зменшується модуль пружності полімеру, що в свою чергу приводить до зниження контактного тиску і навантаження на зерна наповнювачів. Суперпозиція цих конкуруючих факторів і визначає кінцеву епюру зносу в зонах руху полімеру в твердому стані. По мірі розплавлення полімеру зовнішнє тертя полімеру переходить у внутрішнє тертя розплаву, що приводить до зниження зносу за рахунок мастильної дії розплаву. Збільшення зносу в зоні дозування пояснюється підвищенням тиску розплаву та тертям вільного кінця черв'яка по циліндру [91].

Знос циліндрів екструдерів з азотованими робочими органами в зоні дозування в 0,5–4,0 рази менший зносу черв'яків в цій же зоні, що пов'язано з різницею контурних площ тертя витків черв'яка і циліндра [92]. Таким чином, при застосуванні

зносостійких черв'яків рекомендується так зміцнювати циліндр, щоб він міг витримати 3–4 заміни черв'яків.

Певний вплив на величину зносу та розподіл його по довжині має характер диспергування волокнистих наповнювачів в різних зонах по довжині екструдера [20, 93]. В зоні завантаження довжина волокна майже не змінюється із-за низьких напружень зсуву і тиску. В зоні стиску довжина волокон зменшується в п'ять і більше разів, а в зоні розплаву диспергування волокон незначне. Тому зношування пов'язане з двома конкуруючими факторами: з одного боку дробленням скловолокна приводить до збільшення числа активних кінців волокон, що викликає збільшення зносу; з другого боку короткі волокна мають більшу рухомість і можуть легко переорієнтуватися в розплаві, що сприяє зменшенню інтенсивності зношування [83, 91]. В даному випадку знос перевищує допустимі норми в десятки разів [45].

7.2. Сучасні наукові підходи до питань зносостійкості матеріалів

Згідно з сучасними уявленнями тертя твердих тіл має подвійну молекулярно-механічну природу. Відмінність в наукових підходах до проблем тертя та зношування полягає в різних поглядах на співвідношення між адгезійною і деформаційною складовими сили тертя, механізмами зношування, фізико-механічними процесами в зоні фрикційного контакту [94–97]. Надзвичайно важливим є врахування при терті і зношуванні в'язко-пружної природи матеріалів. Адже відомо, що незалежно від механізму зношування руйнування поверхневого шару, як правило, починається в місцях концентрації напружень. З цього випливає висновок, що для підвищення зносостійкості необхідна деконцентрація напружень, яка зв'язана з реологічними (релаксаційними) властивостями трибо систем. Релаксація напружень, внутрішнє тертя і повзучість мають загальну фізичну природу і контролюються в умовах навантаження різними структурними мікромеханізмами [98]. Тому зносостійкість більш тісно зв'язана з пружно-в'язкими властивостями матеріалів, ніж з макрохарактеристиками міцності.

Згідно структурно-енергетичній теорії Б.І. Костецького [96] тертя розглядається як дисипативний процес перетворення

підведеної механічної енергії в внутрішню енергію і теплоту. За даними [94] тепла енергія складає 90 % і більше роботи тертя. В залежності від рівня прикладених напружень (деформацій) дисипація енергії може відбуватися за різними механізмами внутрішнього тертя, які фактично є механізмами релаксації напружень. В тонких поверхневих шарах, які сприймають найбільш високі контактні напруження, ведучими механізмами релаксації напружень є гістерезисне і мікропластичне внутрішнє тертя, в більш нижчих шарах – лише механізм внутрішнього тертя [91].

Якщо матеріал має стабільну структуру, яка не може перебудовуватися і ефективно розсіювати підведену енергію, то ведучим стає пошкоджувальний релаксаційний процес. Такий матеріал крихкий і має погану зносостійкість. Якщо під дією зовнішніх навантажень відбувається перебудова структури матеріалу, то підведена енергія розсіюється і матеріал має високу зносостійкість. Саме такі властивості мають матеріали з метастабільними структурами [99]. Слід відзначити, що зв'язок між зносостійкістю і внутрішнім тертям (релаксаційними властивостями) матеріалу має загальний характер і проявляється при різних видах тертя (ковзання і кочення) [99–102]. При переробці полімерних матеріалів в якості основного фактора, що визначає довговічність машин для лиття під тиском, є зносостійкість металевих робочих органів, зокрема деталей вузла пластикації і в першу чергу шнека і матеріального циліндра. Зношувальна здатність полімерного матеріалу визначається його фізико-механічними, хімічними і реологічними властивостями.

Як відмічалось раніше, в процесі переробки полімерних матеріалів відбувається деструкція полімеру з виділенням вільних радикалів і продуктів деструкції, які є дуже активними по відношенню до металу і викликають його корозію [19, 85, 86]. Проте, основним фактором, що викликає інтенсивне зношування металу при переробці пластмас, є фактор наповнювача, який характеризує абразивність перероблюваної композиції [19, 76, 83, 84].

В роботі [88], в якій узагальнено практичний досвід робіт 300 фірм Німеччини з переробки пластмас, показано, що при переробці ненаповнених полімерів, включаючи корозійно-активні полімери, при застосуванні корозійностійких сталей проблем з зносостійкості обладнання не було на протязі багатьох років.

Навпаки, переробка наповнених полімерів приводить до різкої інтенсифікації зношування обладнання, тому в ряді випадків при наявності наповнювачів високої твердості і значної їх концентрації в композиції фіксувалися строки служби металевих деталей від кількох неділь до кількох днів [103].

Відома ідеалізована модель абразивного зношування [104, 105] в вигляді циліндра, в якій виділені два типи подряпин:

- вирізання подряпин за рахунок мікрорізання;
- видавлювання подряпин за рахунок пластичного деформування матеріалу без відокремлення часинок.

Об'ємний знос при даній моделі абразивного зношування визначається за формулою:

$$V = k \frac{PL_{mp}}{3H}, \quad (7.1)$$

де k – коефіцієнт зносу;

P – навантаження;

L_{mp} – шлях тертя;

H – твердість матеріалу.

Дана модель є спрощеною, оскільки не враховує ряд факторів, що впливають на процес абразивного зношування. Розрахункові величини об'ємного зношування за формулою (7.1) в 10 разів відрізняються від експериментальних даних.

Пізніше рядом вчених [105–112, 113–120] зроблені спроби опису абразивного зношування з ускладненням моделей, в яких враховувався вплив твердості [105–109], форми [118], розмірів наповнювача [113–115], шорсткості поверхні матеріалу, деформації і наклепу на матеріалі [117], характеру закріплення частинок та їх форми [119], структури та легування матеріалу [120].

Залежність впливу твердості наповнювача на зносостійкість оцінюють за показником $K_h = H_a/H_m$, де H_a і H_m – значення твердості абразиву і матеріалу, що зношується. Залежність зносу від величини K_h має трьохстадійний характер [105, 121]. При $K_h < (1,1-1,3)$ знос мінімальний, при $(1,1-1,3) < K_h < (1,7-5,5)$ інтенсивність зносу різко зростає, при $K_h > (1,7-5,5)$ величина зносу максимальна і стабільна. При зміні діаметру зерна від 0,001 до 0,1 мм (на два порядки) величина зносу теж збільшується на два порядки. Коефіцієнт, що враховує вплив

діаметра зерна на величину зносу при незакріпленому абразиві знаходиться за формулою [115]:

$$R_d = d/0,16, \quad (7.2)$$

де d – діаметр зерна абразиву.

В залежності від концентрації абразиву знос збільшується зі збільшенням концентрації від 0 до 100 %. Коефіцієнт, що враховує збільшення зносу від концентрації незакріпленого абразиву R_d збільшується від нуля до одиниці [115]. Ряд дослідників [95, 122, 123] вважають, що головною причиною абразивного зношування є багаторазове пластичне деформування мікрооб’ємів матеріалу, яке викликало їх втомне руйнування.

Досить об’єктивну оцінку зношувальної здатності полімерних матеріалів з абразивними наповнювачами дає формула [124]:

$$V = K_0 K_n K_d K_\alpha K_{nm} K_l L_{mp} P \Phi_m / \pi t g \beta, \quad (7.3)$$

де V – величина об’ємного зносу;

K_n – коефіцієнт відносної твердості;

K_d – коефіцієнт розміру наповнювача;

K_α – коефіцієнт концентрації наповнювача;

K_{nm} – коефіцієнт контактного модуля механічних втрат полімерної матриці;

K_n – коефіцієнт системи легування матеріалу;

K_0 – коефіцієнт неврахованих факторів;

L_{mp} – шлях тертя;

P – навантаження;

Φ_m – фактор пружно-пластичних властивостей матеріалу;

β – половинне значення кута при вершині модельованого конусного індентора.

На жаль, дана формула має велику кількість емпіричних коефіцієнтів, що ускладнює її використання в інженерних розрахунках.

Існує думка [125, 126, 127], що розвиток моделей абразивного зношування являє собою цикл: “...розширення границь – експеримент в нових границях – побудова моделей процесу в нових границях – розширення границь...”. При такій схемі розвитку моделювання постійно ускладнюється при

відсутності практичної користі. Тому на практиці знос кількісно непередбачуваний при переході до нових умов досліджень абразивного зношування. В зв'язку з цим найбільш перспективним напрямом є експериментальне вивчення зносостійкості сплавів при зношуванні полімерних матеріалів з наповнювачами, оскільки знос одних і тих же матеріалів в різних умовах абразивного зношування може відрізнятись на порядок і більше [128]. Цікавою є методика розрахунку зносу циліндра екструдера з врахуванням динаміки процесу переробки пластмас, в якій автор [150] відповідно до енергетичної теорії тертя та зношування вважає, що існує взаємозв'язок між об'ємом зношеного матеріалу V і енергією тертя W :

$$V = k \cdot W, \quad (7.4)$$

де k – константа для кожного виду матеріалу та умов експлуатації при русі полімеру по довжині циліндра і знаходиться експериментально при фіксованому визначенні величини W .

При визначенні величини k і функції $W(t)$ можна побудувати епюру зносу по довжині циліндра.

Проведення випробувань на зношування пов'язано з рядом методологічних проблем викликаних тим, що зносостійкість матеріалів залежить не тільки від їх властивостей, але й від умов тертя. Для випробувань металевих матеріалів на абразивне зношування використовують дві основні схеми – закріпленій і незакріпленій абразив. Для експлуатації екструдерів і термопластавтоматів з наповнювачами підходить схема випробувань з незакріпленим абразивом. В даний час існує велика кількість оригінальних методик випробувань на абразивне зношування [45, 129–134], але універсального метода випробувань до цих пір не існує. Основні вимоги до випробувань на абразивне зношування наступні:

- надійність (відтворюваність);
- можливість порівнювати зносостійкість матеріалів між собою;
- достовірність.

Створення методів, які б задовольняли ці вимоги, вимагає всебічного дослідження різних факторів, що впливають на результати випробувань. Найбільш значимим є три групи факторів: властивості абразиву, навантаження і швидкість ковзання [125].

7.3. Прогресивні методи підвищення зносостійкості

Процесами тертя і зношування можна керувати з допомогою конструктивних, технологічних і експлуатаційних засобів. До конструкційних засобів підвищення зносостійкості деталей машини відносяться: правильний вибір матеріалів пари тертя; раціональна конструкція рухомих з'єднань; забезпечення оптимальної шорсткості поверхні; конструктивні методи зниження температури в парі тертя тощо. До технологічних засобів підвищення зносостійкості пар тертя відносяться різні методи зміцнення поверхні, які сприяють розширенню діапазону нормального зношування і зниженню його інтенсивності за рахунок фізико-механічних властивостей структури, хімічного і фазового складу поверхневого шару, створенню сприятливих залишкових напружень, підвищенню антифрикційних і антикорозійних властивостей, тощо.

До експлуатаційних засобів відносяться величини питомих навантажень, швидкостей переміщень, температурні умови, динаміка навантажень, мастильні рідини тощо, котрі зв'язані з процесами, для яких створено дане обладнання.

Як показали дослідження [84] найбільш перспективними для обладнання, що переробляє пластмаси, є технологічні засоби підвищення зносостійкості пар тертя (табл. 7.1). Це пов'язано з більшою ефективністю і економічністю даних засобів. Матеріали для виготовлення робочих органів екструдерів і термопластавтоматів повинні мати великий опір абразивному зношуванню, високу корозійну стійкість, опір заїданню і антифрикційні властивості. В даний час проводиться велика робота по створенню таких матеріалів [135–139] на основі сталей, чавунів, кобальтових, нікелевих, мідних і інших сплавів з різними легуючими добавками хрому, марганцю, титану, ванадію, ніобію, молибдену та рідкоземельних металів [140]. Слід відзначити, що такі сплави дорогі і виготовлення деталей з таких сплавів не вигідно. Більш перспективним є застосування технологій, що зміцнюють поверхню нанесенням покриттів, хіміко-термічними методами, наплавленням, методами пластичного деформування поверхні, лазерним зміцненням поверхні тощо.

Таблиця 7.1

Технологічні методи зміцнення поверхні

Назва методу	Технології	Товщина, мм	Твердість поверхні
Пластичне деформування	Обкатка роликками і кульками	до 0,3	до HRC 45
	Зміцнення спец різцем		
	Дернування		
Гартування	Пічне, струмами високої частоти	0,3 і більше	HRC 45–60
	Плазмове	0,1 – 5	HRC 45–60
	Лазерним променем	0,05–0,2	HRC 50–64
Хіміко-термічна обробка	Цементация (пічна, іонна)	0,1–2,0	HRC 51–62
	Азотування (пічне, іонне)	до 0,5	HV 510–1200
	Борування	0,1–0,3	HV 1100–2000
	Дифузійна металізація	0,1–0,2	HRC 45–55
Електролітичні і хімічні покриття	Хромування	0,02–0,3	HV 900–1000
	Нікелювання електрохімічне	0,02–0,3	HV 700–800
	Нікелювання хімічне	0,02–0,1	HV 700–800
	Оксидування	0,02–0,05	HV 600–700
Наплавлення	Аргонно-дугове	0,5–5	HRC 32–64
	Плазмове		HRC 32–64
	Індукційне		HRC 32–64
Напилення	Фізичне осадження (PVD, CVD)	0,01–0,015	HV 1100–2000
	Газоплазмове	0,1–2,0	HRC 58–62
	Плазмове	0,1–1,0	HRA 80–90
	Детонаційне	0,1–2,0	HRC 58–62
	Електродугове	0,1–2,0	HRC 58–62

До технологій, які застосовуються для зміцнення поверхні деталей робочих органів екструдерів і термопластавтоматів, ставляться певні вимоги по товщині зміцнюваної поверхні та ресурсу роботи обладнання, а саме [91]: зміцнена поверхня повинна мати товщину не меншу запасу на знос (для черв'яків 0,5

мм і більше, для циліндрів 1,0–2,0 мм) для забезпечення заданого ресурсу роботи обладнання 10–15 тис. год з врахуванням режиму експлуатації (температура 20–300 °С, тиск до 100 МПа, швидкість ковзання 0,3–1,0 м/с, мікротвердість наповнювача до 20 ГПа). Значні труднощі при вирішенні проблеми зносостійкості робочих органів термопластавтоматів і екструдерів являють геометричні особливості: відношення довжини до діаметру, складність геометрії, точність спряжень, допуски на розмірі тощо. Ці особливості роботи і конструкції обладнання для переробки полімерних матеріалів слід враховувати при виборі технології зміцнення поверхні пар тертя.

В даний час розроблено ряд методів зміцнення поверхні, що дозволяють змінювати фізико-механічні властивості, структуру, хімічні і фазовий склади, напружений стан поверхневих шарів деталей [84, 124, 141–158]. Розглянемо ефективність і перспективність цих методів стосовно деталей обладнання переробки пластмас і зокрема деталей матеріального циліндра термопластавтоматів.

Поверхнєве пластичне деформування (ППД) застосовується в якості фінішної обробки циліндрів, гільз, дорнів для досягнення високого класу шорсткості і формування на поверхні залишкових напружень стиску, які підвищують експлуатаційні властивості виробів [124, 149]. ППД дозволяє підвищити зносостійкість обладнання лише при переробці ненаповнених пластмас. Опір абразивному зношуванню при збільшенні твердості методом ППД знижується [104], тому його не можна рекомендувати для зміцнення деталей при переробці наповнених абразивними матеріалами пластмас. Крім того, товщина зміцненого шару при ППД невелика.

Термічна обробка деталей екструдерів і термопластавтоматів застосовується в основному для зміцнення ріжучого і формуючого інструменту і деталей допоміжних пристроїв та механізмів, що не працюють в середовищі розплаву пластмас. Гартування довгомірних деталей вузла пластикації (шнеків, циліндрів) не рекомендується з таких причин:

– технологія не гарантує високої і рівномірної твердості по всій довжині деталей;

– при гартуванні відбуваються значні деформації довгомірних деталей з викривленням поздовжньої осі, що недопустимо при жорстких допусках на зазор між шнеком і циліндром;

– відбувається збіднення поверхні вуглецем при нагріві, що веде до зниження її твердості і вимагає великих затрат для усунення цього явища.

Таким чином, при гартуванні не забезпечується висока експлуатаційна якість довгомірних деталей і строк служби пари “шнек-циліндр” екструдерів і термопластавтоматів малий (до 10 місяців) [156].

Гартування з допомогою лазерного променя дозволяє зменшити деформації довгомірних деталей і підвищити твердість поверхні за рахунок утворення мілкодисперсних структур, при швидкому охолодженні. Але цей метод малопродуктивний, дорогий і забезпечує малу товщину (до 0,1 мм) зміцненого шару [155].

Хіміко-термічна обробка є ефективним способом підвищення зносостійкості деталей машин в різних умовах експлуатації за рахунок зміни хімічного і фазового складу поверхні, підвищення її твердості, створення залишкових напружень стиску [144, 145, 147–149]. При хіміко-термічній обробці поверхня металу насичується методом дифузії хімічними елементами вуглецем, азотом, бором, киснем тощо з утворенням твердих хімічних з’єднань цих елементів з металом (карбідів, нітридів, боридів, оксидів) та зоною твердих розчинів цих елементів в кристалічній решітці металу. В результаті одержуємо на поверхні градієнтне покриття високої твердості і значної товщини.

Цементация – процес насичення маловуглецевих сталей вуглецем при температурі 900–1000 °С з подальшим гартуванням [145]. Цементация забезпечує твердість поверхні HV до 8 000 МПа і глибину зміцненого шару до 2 мкм. Вона застосовується для підвищення зносостійкості деталей допоміжних пристроїв екструдерів. Для зміцнення шнеків і циліндрів екструдерів цементация не застосовується в зв’язку з невисокою і порівняно з іншими видами ХТО твердістю поверхні і значними деформаціями довгомірних деталей при гартуванні.

Найбільш широке застосування для зміцнення деталей, що контактують з полімерами при їх переробці має азотування. Насичення поверхні азотом при температурах 500–600 °С викликає утворення нітридів різних фаз (Fe_2N , Fe_3N , Fe_4N) з різною твердістю, будовою кристалічної решітки і корозійною стійкістю [144–145]. Твердість нітридів досягає HV 12 000 МПа, глибина

азотованого шару до 0,5 мм. Нітридні сполуки металів мають антифрикційні властивості [149].

Традиційне пічне азотування проводиться в середовищі аміаку має велику тривалість (до 72 год.) і не завжди забезпечує високу якість поверхневого зміцнення довгомірних деталей, викликаючи деформації їх осі. Крім того, при азотуванні в середовищі аміаку відбувається насичення металу воднем, що викликає окрихчення поверхні і зменшення об'ємної міцності металу. Для азотування за даною технологією застосовуються спеціальні сталі – нітролої.

Альтернативою традиційному пічному азотуванню є азотування в тліючому розряді (іонне азотування) в безводневих насичуючих середовищах (суміші азоту з аргоном в різних співвідношеннях цих елементів) [149, 158]. Дана технологія дозволяє прискорити процес в 5–10 разів при скороченні витрат електроенергії в 10 разів і газів на два порядки. Технологічний процес добре керується з допомогою чотирьох технологічних факторів (температури дифузійного насичення, тиску в вакуумній камері, складу насичуючого середовища і часу дифузійного насичення), що дозволяє керувати твердістю, фазовим складом, товщиною азотованого шару і залишковими напруженнями в поверхневому шарі стиску в широких межах [149]. Це дозволяє оптимізувати властивості зміцненого шару для одержання максимальної зносостійкості з врахуванням умов експлуатації. Технологія дозволяє зміцнювати всі марки сталей, чавунів, титану і його сплавів, виключає водневе окрихчування металів і є екологічно чистою [149, 158].

Дослідження [76, 91] показали, що сталі 40ХН2МА, 38ХГСА, 40Х, 40Х13, 25ХГТ після іонного азотування мали в 1,5–2 рази вищу зносостійкість в середовищі розплаву полімеру з наповнювачами в порівнянні з азотованими традиційним пічним азотуванням. При цьому деформації довгомірних деталей (типу черв'як екструдера) мінімальні і знаходяться в полі допуску технічних вимог креслень. Це підтверджується дослідженнями [157, 158].

Високу твердість поверхні до 20 000 МПа забезпечує процес насичення поверхні бором при температурі 900–1100 °С [145]. Процес боровання застосовувався для зміцнення черв'яків екструдерів [19] при переробці пластмас з абразивним наповнювачем. Зносостійкість борованої сталі в умовах сухого тертя ковзання 4–6 разів вища від зносостійкості цементованої

сталі і в 1,3–3 рази – нітроцементованої. Проте, борування, як спосіб зміцнення робочих органів екструдерів, не знайшов широкого застосування, оскільки борований шар має підвищену крихкість, що в ряді випадків приводить до його сколювання і розтріскування в процесі експлуатації. Крім того, при боруванні довгих деталей типу шнек термопластавтоматів і екструдерів відбуваються значні деформації осі деталі, що є недопустимим для даного обладнання в зв'язку з можливим катастрофічним зносом заїданням шнека і циліндра [89, 90].

Дифузійне хромування є однією з ефективних технологій підвищення зносостійкості деталей машин [147], яка забезпечує високу твердість (до 1500 HV) і товщину дифузійного шару до 0,2 мм. В основному технологія дифузійного хромування в машинах для лиття пластмас під тиском застосовується для зміцнення формуючого обладнання і ріжучого інструменту. Для зміцнення шнеків і циліндрів термопластавтоматів застосовується дана технологія рідко в зв'язку з невеликою товщиною покриття та можливим деформування осі довгомірних деталей (шнеків, циліндрів).

Електролітичні покриття [151] із хрому і нікелю в машинах для лиття полімерних матеріалів застосовуються для зміцнення поверхні допоміжних пристроїв і формуючого інструменту [91]. Застосування покриттів такого типу для шнеків і циліндрів не рекомендується в зв'язку з невеликою їх товщиною і малою адгезійною міцністю. Не рекомендується для зміцнення деталей екструдерів при переробці наповнених пластмас і технологія оксидування, як менш ефективна в порівнянні з іншими технологіями зміцнення [143].

Значну частину задач з підвищення зносостійкості деталей машин для переробки пластмас можна вирішити з допомогою методів газотермічного напилення [152, 155]. Перевагою покриттів одержаних такими методами є можливість любых матеріалів значної товщини (2–3 мм) і рівномірність механічних властивостей по товщині. Це дозволяє зробити допустимі конструктивні запаси на знос з мінімальною інтенсивністю зношування. Властивості напилених покриттів за різними способами газотермічного напилення наведені в роботах [152, 155, 160, 161]. Перспективним способом зміцнення черв'яків-екструдерів, який дозволяє одержати шари з високими експлуатаційними властивостями, є газовий з подальшим оплавленням [161] та детонаційного напилення [161]. Разом з тим, газотермічні покриття мають недоліки, що пов'язані з

нерівномірною товщиною покриття по всій поверхні, значною жорсткістю поверхні та малою адгезійною міцністю.

Покриття, що одержують методом фізичного осадження (PVD, CVD) [155], характеризуються високою твердістю, щільністю і більшою адгезійною міцністю в порівнянні з газотермічним покриттям, але мають малу товщину (до 0,01 мм). Тому вони застосовуються для зміцнення інструменти і деталей, що працюють в середовищі без абразивних частинок.

Велику перспективу для підвищення зносостійкості циліндрів екструдерів і термопластавтоматів має застосування біметалічних термодифузійних сплавів та процесу цементації [150]. Дана технологія дозволяє оптимізувати зносо- і корозійну стійкість і забезпечити об'ємну міцність. Застосування біметалічних деталей має велике економічне значення, оскільки крім забезпечення високої довговічності дозволяє зменшити витрати дорогих матеріалів на виготовлення габаритних деталей.

Широке застосування для підвищення зносостійкості деталей машин для лиття полімерних матеріалів має наплавка. Для зміцнення поверхні черв'яків екструдерів застосовують наплавку з використанням газополуменевого, дугового, плазмового і індукційного нагріву та тугоплавких і керамічних матеріалів [19, 137, 143, 153, 154, 155]. Зносостійкість наплавлених черв'яків з використанням спеціальних зносостійких порошків (ПГ-СР3, ПГ-СР4, ВЗК, ПГ-АН1, ПН-АН2) в 3-5 разів вища ніж цементованих [124]. Велику зносостійкість мають черв'яки екструдерів, наплавлені плазмовим методом хромом і молібденом при швидкостях ковзання від 1 до 6 м/с.

В даний час в машинобудуванні в якості конструкційного матеріалу застосовують окисну кераміку, що включає оксиди алюмінію, цирконію, нітрид кремнію і карбід кремнію. Ці матеріали характеризуються високою міцністю, доброю зносо- і корозійною стійкістю, низьким коефіцієнтом тертя. Приклади застосування цих матеріалів для зміцнення поверхні черв'яків наведені в роботі [164]. Модуль пружності і коефіцієнт лінійного розширення таких керамік близький до сталі, тому можна наносити на них покриття великої товщини.

РОЗДІЛ 8

РОЗРАХУНОК ЗНОСОСТІЙКОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ ГРАДІЄНТНИХ ПОКРИТТІВ

8.1. Розрахунок зносостійкості і довговічності азотованих шарів при абразивному зношуванні

Відомо [104, 120, 121, 125], що зносостійкість чистих металів та багатьох сплавів з стабільною структурою в абразивному середовищі при відсутності в структурі метастабільних фаз прямопропорційна їх твердості. При цьому величина зносу прямопропорційна роботі сил тертя і обернено пропорційна твердості [104].

Для підвищення твердості і зносостійкості поверхонь тертя широко застосовуються методи хіміко-термічної обробки – азотування, цементація, борування, карбонітрування та інші. Досвід експлуатації конструктивних елементів при терті в абразивному середовищі показує, що найбільш ефективним методом хіміко-термічної обробки є азотування в тліючому розряді [144, 145, 149, 158].

Азотовані шари складаються із нітридної зони з стабільною структурою та твердістю і перехідної зони (зони внутрішнього азотування) зі змінною твердістю і концентрацією азоту по глибині, яка зменшуються від поверхні до основи за експоненціальною залежністю і залежить від технологічних параметрів процесу азотування [169].

Структура азотованих шарів для великої кількості конструкційних сталей, в тому числі і досліджуваних сталей (38ХМЮА, 45 і сталі 20) є стабільною і не включає метастабільних фаз. Тому їх зносостійкість підпорядковується прямопропорційній залежності від твердості.

Зношений об'єм азотованого шару при терті в абразивному середовищі можна виразити наступною формулою:

$$V = V_H + V_{\epsilon} = k \frac{FL_H}{H_H} + k \frac{FL_{\epsilon,c}}{H_{\epsilon,c}}, \quad (8.1)$$

де V_H і V_g – зношені об'єми нітридної зони і зони внутрішнього азотування;

k – коефіцієнт, що враховує умови роботи пари тертя (знаходиться експериментально);

F – сила тертя;

L_H, L_g – шлях тертя до зносу нітридної зони і зони внутрішнього азотування;

$H_{g.c}$ – середнє значення твердості зони внутрішнього азотування, яке можна знайти як відношення площі фігури до основи за формулою:

$$H_{g.c.} = \frac{\int_{h_n}^{h_g} H_i dh}{h_n - h_n} \quad (8.2)$$

де h_n і h_g – товщини нітридної зони і зони внутрішнього азотування відповідно;

H_i – твердість азотованого шару на відстані h_i від поверхні.

Лінійний знос U азотованого шару з врахуванням (8.1).

$$U = \frac{V}{S} = \frac{kFL_n}{H_n S} + \frac{kFL_g}{H_{g.c.} S}, \quad (8.3)$$

де S – площа поверхні тертя.

Інтенсивність зношування нітридної зони буде дорівнювати [104]:

$$I_n = \frac{kF}{H_n \cdot S}. \quad (8.4)$$

Інтенсивність зношування зони внутрішнього азотування знаходиться аналогічно (8.4)

$$I_g = \frac{kF}{H_{g.c.} \cdot S}. \quad (8.5)$$

Для пари тертя “вал-втулка” силу тертя можна виразити через крутильний момент $M_{кр}$ на валу, або потужністю привода. Тоді:

$$F = \frac{2M_{кр}}{d} \text{ або } F = \frac{325N \cdot \eta}{d \cdot n}, \quad (8.6)$$

де d – діаметр вала;

$$M_{кр} = \frac{9750 \cdot N \cdot \eta}{n \cdot 60} \quad [162];$$

N – потужність привода в кВт;

n – частота обертання вала за секунду;

η – коефіцієнт корисної дії передаточного механізму.

Тоді інтенсивність зношування за формулами (8.4) і (8.5) будуть мати вид:

$$I_n = \frac{2kM_{кр}}{H_n \cdot d \cdot S}, \quad I_n = \frac{325k \cdot N \cdot \eta}{H_n \cdot d \cdot n \cdot S}; \quad (8.4')$$

$$I_g = \frac{2kM_{кр}}{H_{г.с.} \cdot d \cdot S}, \quad I_g = \frac{325k \cdot N \cdot \eta}{H_{г.с.} \cdot d \cdot n \cdot S}. \quad (8.5')$$

Силу тертя можна виразити формулою

$$F = P_c \cdot S \cdot f, \quad (8.7)$$

де P_c – середній тиск на поверхні тертя;

f – коефіцієнт тертя.

Тоді (8.3) буде мати вид:

$$U = \frac{k \cdot P_c \cdot f \cdot L_n}{H_n} + \frac{k \cdot P_c \cdot f \cdot L_g}{H_{г.с.}}. \quad (8.8)$$

Інтенсивність зношування нітридної зони і зони внутрішнього азотування запишемо у вигляді:

$$I_n = \frac{kP_c f}{H_n}, \quad I_g = \frac{kP_c f}{H_{г.с.}}. \quad (8.9)$$

У випадку, коли зміну твердості по глибині зони внутрішнього азотування апроксимувати рівнянням прямої, тоді середнє значення її твердості $H_{в.с.}$ буде дорівнювати:

$$H_{в.с.} = \frac{H_n + H_0}{2}, \quad (8.10)$$

де H_n і H_0 – твердість нітридної зони і основи відповідно.

Градієнт твердості по глибині зони внутрішнього азотування в цьому випадку буде мати постійне значення

$$Grad = \frac{H_n - H_0}{h_n - h_n} = tg\alpha. \quad (8.11)$$

Розрахунок зносу азотованого шару за формулами (8.3) і (8.8), та інтенсивності зношування зони внутрішнього азотування за формулами (8.4) і (8.5) та (8.4') і (8.5') спрощується. Розрахунки показують, що різниця значень цих величин при експоненціальній і прямолінійній (8.10) залежностях твердості від глибини зони внутрішнього азотування не перевищує 12 %.

На рис. 8.1 і 8.2 наведені загальні графіки залежності зносу і інтенсивності зношування азотованого шару від шляху тертя в абразивному середовищі при прямолінійній і експоненціальній змінах твердості по товщині зони внутрішнього азотування.

Знаючи товщину нітридної зони h_n і зони внутрішнього азотування $h_е$ із результатів металографічного аналізу азотованого шару, можна знайти його довговічність при зношуванні в абразивному середовищі виражену в протяжності шляху тертя.

$$L = L_n + L_е = \frac{h_n}{I_n} + \frac{h_е}{I_е}. \quad (8.12)$$

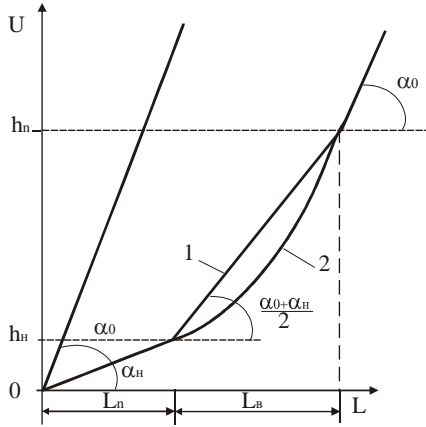


Рис. 8.1. Залежність зносу азотованого шару від шляху тертя:
1 – при прямолінійній зміні твердості та постійному її градієнті по товщині зони внутрішнього азотування; 2 – при зміні твердості та її градієнті в зоні внутрішнього азотування за експоненціальною залежністю (2.1)

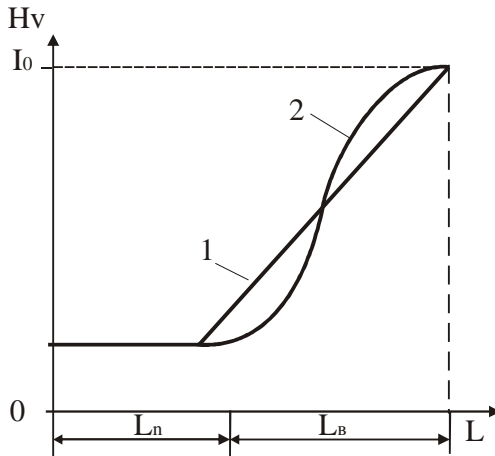


Рис. 8.2. Залежність інтенсивності зношування азотованого шару від шляху тертя:
1 – при прямолінійній зміні твердості та постійному її градієнті по товщині зони внутрішнього азотування; 2 – при зміні твердості та її градієнті в зоні внутрішнього азотування за експоненціальною залежністю (2.1)

З врахуванням (8.4), (8.5), (8.4') і (8.5') формули для визначення довговічності азотованого шару, вираженого через шлях тертя, будуть мати вид:

$$L = \frac{(h_n \cdot H_n + h_6 \cdot H_{6.c.}) \cdot S}{k \cdot F}, \quad (8.13)$$

$$L = \frac{(h_n \cdot H_n + h_6 \cdot H_{6.c.}) \cdot d \cdot S}{2 \cdot k \cdot M_{кр}}, \quad (8.14)$$

$$L = \frac{(h_n \cdot H_n + h_6 \cdot H_{6.c.}) \cdot d \cdot n \cdot S}{325 \cdot k \cdot N \cdot \eta}. \quad (8.15)$$

8.2. Методика і приклад розрахунку зносостійкості і довговічності азотованого шару

Для розрахунку зносостійкості і довговічності азотованих шарів в абразивному середовищі для випадку відсутності метастабільних фаз в структурі азотованого шару необхідно користуватися наведеною нижче методикою:

1. На основі металографічних досліджень одержати вихідні дані: значення твердостей H_n і основи H_0 та товщин нітридної зони h_n і зони внутрішнього азотування h_6 ;

2. Задатися законом розподілу твердості по товщині азотованого шару і знайти середнє значення твердості зони внутрішнього азотування $H_{в.с.}$ за формулами (8.2) і (8.10);

3. Знайти з експерименту значення коефіцієнту k , що враховує умови випробувань;

4. Розрахувати величину інтенсивності зношування нітридної зони і зони внутрішнього азотування за формулами (8.4) і (8.5) або (8.4') та (8.5');

5. Розрахувати довговічність азотованого шару, виражену через шлях тертя, за формулами (8.13–8.15).

Нижче наводиться приклад розрахунку інтенсивності зношування і довговічності в абразивному середовищі ПС68-30 азотованого шару після азотування в тліючому розряді сталі 38ХМЮА за режимом №4 (табл.11.5).

1. Вихідні дані: твердість нітридної зони $H_n = 9520$ МПа; твердість основи після гартування $H_0 = 5800$ МПа; товщина нітридної зони $h_n = 7$ мкм; товщина зони внутрішнього азотування $h_0 = 300$ мкм; діаметр шнека $d = 40$ мм; робоча довжина шнека $L_{III} = 550$ мм; площа поверхні тертя $S = \pi \cdot d \cdot L_{III} = 3,14 \cdot 0,04 \cdot 0,55 = 0,69$ м².

2. Задаємося прямолінійним розподілом мікротвердості по товщині азотованого шару. Тоді

$$H_{e.c.} = \frac{H_n + H_0}{2} = \frac{9520 + 5800}{2} = 7660 \text{ МПа}$$

3. Знаходимо коефіцієнт k умов випробувань на основі даних експерименту (табл. 10.2 і 11.5) і формули (8.9).

$$k = 0,14 \cdot 10^{-4}$$

4. Знаходимо інтенсивність зношування нітридної зони і зони внутрішнього азотування за формулами (8.4') і (8.5').

$$I_n = \frac{2 \cdot k \cdot M_{кр}}{H_n \cdot d \cdot S} = \frac{2 \cdot 0,14 \cdot 10^{-4} \cdot 220}{9520 \cdot 10^6 \cdot 0,04 \cdot 0,069} = 0,24 \cdot 10^{-9},$$

$$I_0 = \frac{2 \cdot k \cdot M_{кр}}{H_{e.c.} \cdot d \cdot S} = \frac{2 \cdot 0,14 \cdot 10^{-4} \cdot 220}{7760 \cdot 10^6 \cdot 0,04 \cdot 0,069} = 0,29 \cdot 10^{-9}.$$

5. Розраховуємо довговічність азотованого шару за формулою 8.14.

$$L = \frac{(h_n H_n + h_0 H_{e.c.}) \cdot d S}{2 \cdot k \cdot M_{кр}} =$$

$$= \frac{(7 \cdot 10^{-6} \cdot 9520 \cdot 10^6 + 300 \cdot 10^{-6} \cdot 7660 \cdot 10^6) \cdot 0,04 \cdot 0,069}{2 \cdot 0,14 \cdot 10^{-4} \cdot 220} = 18,16 \cdot 10^5 \text{ м.}$$

Порівнюючи дані розрахунку з даними експерименту (табл. 11.5), бачимо, що розрахункові дані інтенсивності зношування нітридної зони відрізняються від експериментальних даних після шляху тертя $1,16 \cdot 10^5$ м на 8 %, а зони внутрішнього азотування на 15 %.

Розрахункові значення довговічності азотованого шару відрізняються від експериментальних значень (рис. 11.5) на 22%.

РОЗДІЛ 9

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

9.1. Дослідження геометричних параметрів, твердості поверхні та зносу шнеків, виготовлених за існуючою технологією

Досліджувались шнеки термопластавтоматів марки ДБ 3328 (рис. 9.1, а), що виготовлялися за існуючою технологією на Хмельницькому заводі термопластавтоматів.

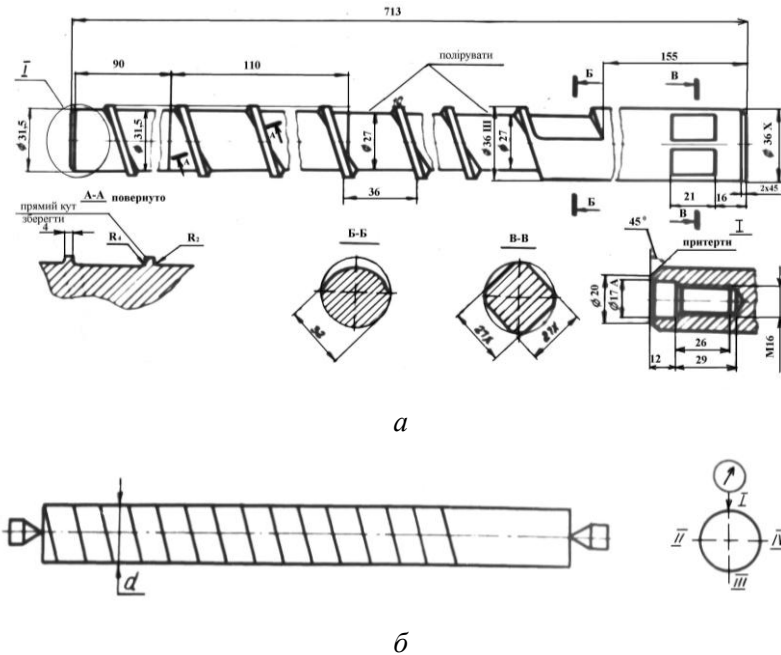


Рис. 9.1. Конструкція шнека термопластавтомата ДБ 3328 (а);
схема вимірювання відхилення форми шнека (б)

Дана технологія включала операції механічної обробки, традиційне пічне азотування і шліфування з послідовним поліруванням поверхні. Шнек виготовлявся із сталі 38ХМЮА (250 НV азотувався в печі в середовищі аміаку на протязі 72 годин при

температурі 520 °С (980 HV). Досліджувалось відхилення осі шнека від прямолінійності і твердість поверхні на різних стадіях його виготовлення, величина зносу і характер поверхні зношування при переробці полістиролу ПСМ і склонаповненого поліаміду ПС-68-30 на діючому термопластавтоматі марки ДБ 3328.

Дослідження відхилення радіуса поверхні шнека від його осі проводилося в центрах на кожному витку в чотирьох точках в двох взаємно-перпендикулярних площинах з застосуванням мікронного індикатора точністю вимірювання до 1 мкм. Схема вимірювання зміни форми поверхні до і після зношування шнека наведена на рис. 9.1, б. Твердість поверхні вимірювалась на мікротвердомірі Вікерса.

9.2. Методика дослідження тиску, крутильного моменту і осьового зусилля в матеріальному циліндрі при переробці різних пластмас

Дослідження проводились на експериментальній установці (рис. 9.2), яка спроектована на базі термопластавтомата ДБ3328 і дозволяла проводити вимірювання тиску всередині матеріального циліндра в п'яти точках по його довжині, крутильного моменту і основного зусилля на шнеку, числа обертів шнека в період завантаження. Процес пластикації і переробки пластмас на даній експериментальній установці проводився аналогічно іншим моделям шнекових термопластавтоматів, тому результати цих досліджень можуть бути поширені і на інші марки даних машин.

Тиск в матеріальному циліндрі вимірювався за допомогою спеціально розроблених датчиків (рис. 9.3), які вставлялися в отвори матеріального циліндра і кріпляться різьбовим з'єднанням. Хвостовик 2 датчика вставлявся в конічний отвір матеріального циліндра 1 і щільно притискався різьбовим з'єднанням корпуса датчика 4 до циліндра. Хвостовик 2 датчика (тонкостінний, з внутрішньою бочкоподібною і зовнішньою конічною поверхнями) під дією розплаву пластмас деформується і через стержень 3 і призму 5 деформація передається на пластинчасту балку 6. На пластинчастій балці 6 з двох сторін наклеєні тензодатчики, які з'єднанні за півмостовою схемою. Сигнали від тензодатчиків передавались через підсилювач 8АНЧ-7М на осцилограф Н-700 (рис. 9.2). За допомогою гвинтів 7 регулювався контакт балки 6 з

призмою 5. Для уникнення впливу зовнішнього середовища на датчик, його закривали спеціальним кожухом.

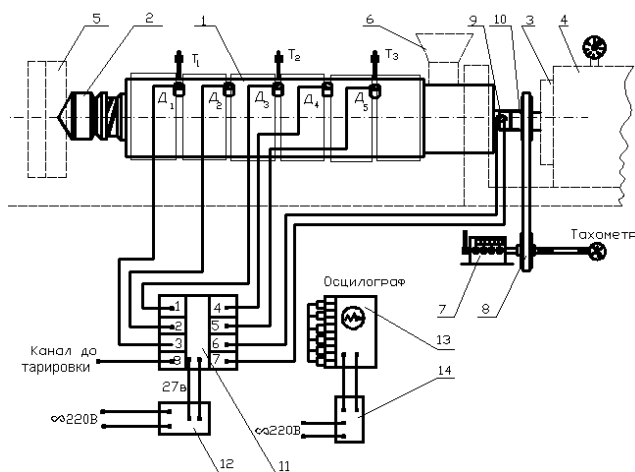


Рис. 9.2. Схема експериментальної установки для визначення експлуатаційних характеристик термопластавтомату:
1 – матеріальний циліндр; 2 – мундштук; 3 – редуктор;
4 – гідроциліндр механізму впрыску; 5 – пресформа; 6 – бункер завантаження; 7 – лічильник обертів шнека; 8 – пасова передача;
9 – тензодатчики для вимірювання крутного моменту; 10 – шнек;
11 – підсилювач струму; 12 – блок живлення підсилювача;
13 – осцилограф; 14 – випрямлювач струму;
 D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 – датчики тиску; T_1, T_2, T_3 – термомари

Для запобігання проникнення пластмаси між стінками циліндра і хвостовика датчика тиску на зовнішній поверхні останнього зроблені запірні канавки, а сам наконечник притирався до стінок матеріального циліндра алмазною пастою перед його встановленням для проведення експериментальних досліджень. Така система забезпечила герметичність з'єднання датчиків тиску з циліндром при проведенні експериментальних досліджень. Сигнали від датчиків тиску записувались осцилографом на паперову стрічку.

Датчики тиску розміщувалися через кожні 80 мм, починаючи від торця матеріального циліндра (на рис. 9.4 показано

лише три датчики тиску). Вибір точок розміщення датчиків тиску проводився так, щоб охопити по можливості більшу довжину матеріального циліндра з врахуванням всіх зон пластикації. Перший датчик тиску Д1 розміщався в кінці матеріального циліндра в зоні максимального тиску, а п'ятий датчик Д5 знаходився ближче до зони завантаження на відстані 400 мм від вихідного кінця шнека. Датчики Д2, Д3 і Д4 розміщувалися в проміжку між датчиками Д1 і Д5 з інтервалом 80 мм.

Для вимірювання крутильного моменту і осьового зусилля в спеціально виготовлених заглибленнях шнеку наклеювались тензодатчики 9 (рис. 9.2), які з'єднувались в напівмостову схему, і електричні сигнали від яких через шестикільцевий знімач струму струнного типу подавались до каналів підсилювача 11 і потім на осцилограф 13.

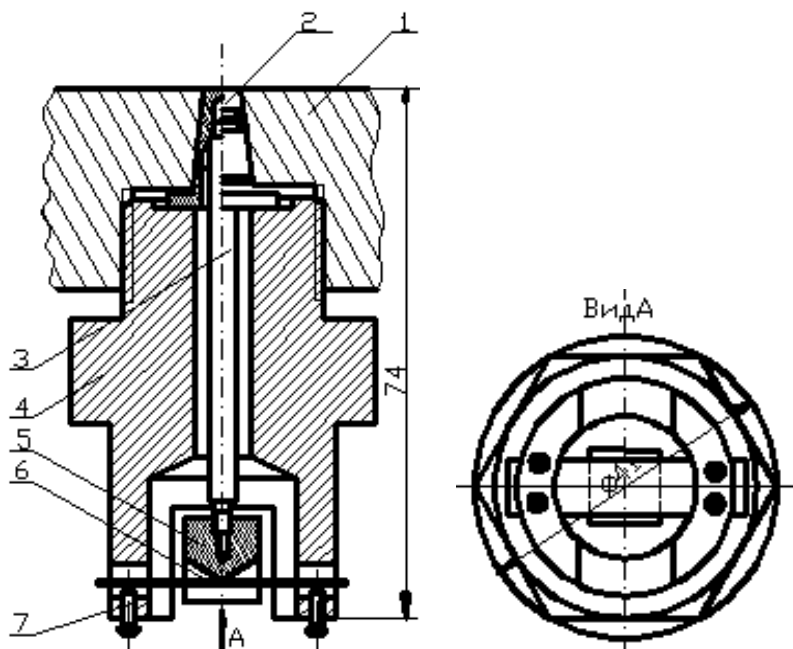


Рис. 9.3. Датчик тиску:

1 – матеріальний циліндр; 2 – хвостовик; 3 – стержень; 4 – корпус датчика; 5 – призма; 6 – балка; 7 – регулювальний гвинт

Схема розміщення датчиків тиску по довжині матеріального циліндра показана на рис. 9.4.

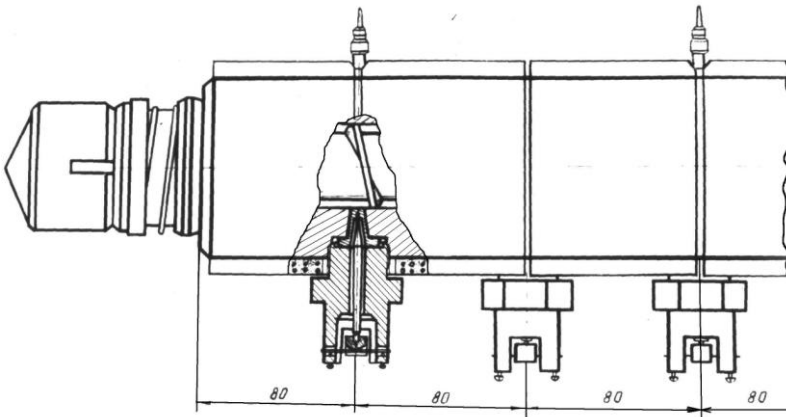


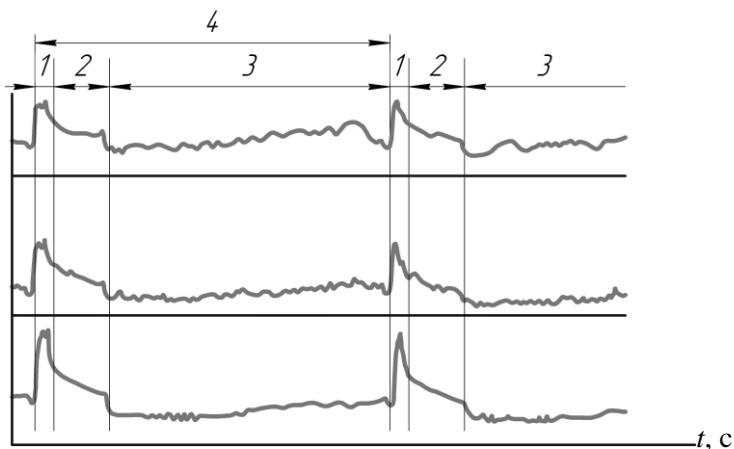
Рис. 9.4. Схема розміщення датчиків тиску по довжині матеріального циліндру

Тиск в гідроциліндрі механізму вприскування пластмас вимірювався манометром. Для запису швидкозмінного тиску в гідроциліндрі на трубку манометра наклеювались тензодатчики і також під'єднувались через підсилювач до осцилографа 13 (рис. 9.2).

Кількість обертів шнека в період завантаження чергової порції пластмаси в матеріальний циліндр фіксувалась лічильником 7. Час завантаження порції пластмаси в матеріальний циліндр визначався за секундоміром, а швидкість обертання шнека вимірювалась тахометром.

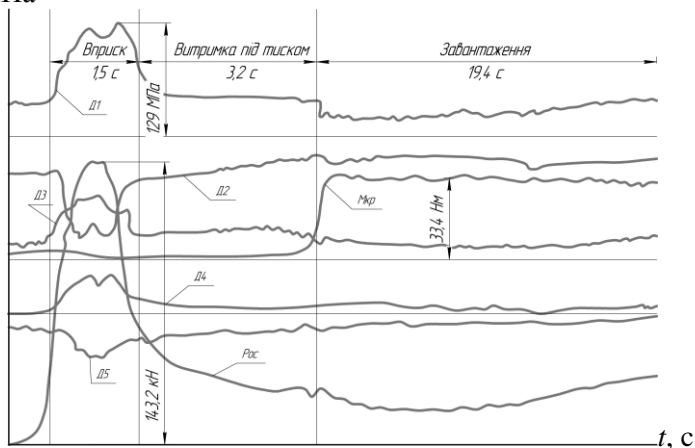
На осцилограми записувались наступні параметри: величина тисків від п'яти датчиків тиску; крутильний момент і осьове зусилля на шнеку. Це дало можливість в комплексі аналізувати зміну цих параметрів в будь-який момент роботи машини. На осцилограмах добре видно різні періоди технологічного процесу (вприскування, витримки під тиском, завантаження) і протяжність циклу при пробці пластмас. Приклад таких осцилограм наведено на рис. 9.5.

P , МПа



a

P , МПа



б

Рис. 9.5. Приклад осцилограм запису параметрів:
a) тиску P з допомогою датчиків Д1, Д2, Д3, Д4 і Д5, крутильного моменту $M_{кр}$, осової сили $P_{ос}$; 1 – зона вприскування; 2 – витримка під тиском; 3 – охолодження; 4 – цикл;
б) технологічного процесу переробки пластмас на експериментальній установці (рис. 9.2)

Тарування експериментальної установки проводилось окремо для кожного з досліджуваних параметрів: датчиків тиску, крутильного моменту і осьового зусилля. Тарування датчиків тиску проводили в умовах, які наближені до реальних умов експлуатації термопластавтоматів при температурі нагріву матеріального циліндра 200–250 °С.

Схема тарування датчиків тиску і осьового зусилля наведена на рис. 9.6.

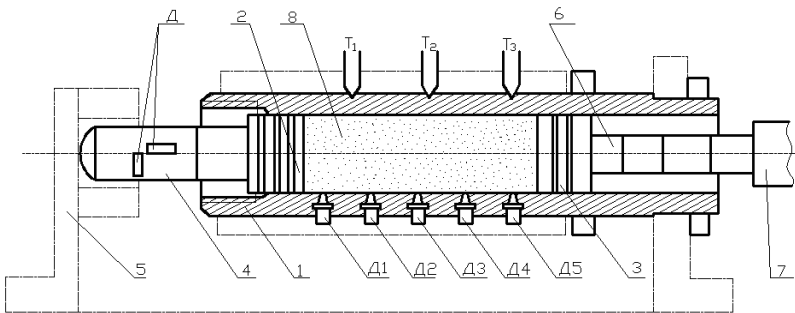


Рис. 9.6. Схема тарування датчиків тиску:

- 1 – матеріальний циліндр; 2 – ліва пробка; 3 – права пробка;
4 – збірний шток; 5 – пересувач; 6 – шток правої пробки; 7 – шток
гідро циліндра; D₁, D₂, D₃, D₄, D₅ – датчики тиску;
T₁, T₂, T₃ – термопари; D – тензодатчик для
вимірювання осьового зусилля**

Ліва пробка 2 через збірний шток 4 впиралася в рухому плиту 5, яка була підведена в переднє крайнє положення. Матеріальний циліндр без шнека заповнювався пластмасою, включався обігрів, пластмаса плавилась і ущільнювалась. Права пробка 3 через шток 6 з'єднувалась з штоком 7 гідроциліндра вприскування розплаву. При натискуванні на кнопку “вприск” за допомогою гідроциліндра через шток 6 створюється тиск розплаву в матеріальному циліндрі, який передавався на стінки циліндра, датчики D₁, D₂, D₃, D₄, D₅ і пробку 2. На одному з елементів збірного штоку 4 були наклеєні тензодатчики D для вимірювання осьового зусилля. Елемент штоку 4 з тензодатчиками, що включались в вимірювальну тензосистему попередньо був

протарований на пресі і відігравав роль динамометра. В процесі досліджень датчики Д1, Д2 і Д3 приєднувались до каналів 1, 2 і 3, датчики Д для вимірювання осьового зусилля приєднувався до каналу 4, датчик тиску Д4 приєднувався до каналу 5, а датчик Д5 – до каналу 6 осцилографа Н-700 (рис. 9.6). При включенні гідроциліндра 7 (рис. 9.6) показники датчиків тиску і осьового зусилля записувались на фотопапір осцилографом. На основі отриманих осцилограм будувались тарувальні графіки, згідно з якими розшифровувались осцилограми досліджень робочих параметрів технологічного процесу переробки різних пластмас.

Тарування крутильного моменту і осьового зусилля на шнеку проводилося за схемою, що показана на рис. 9.7.

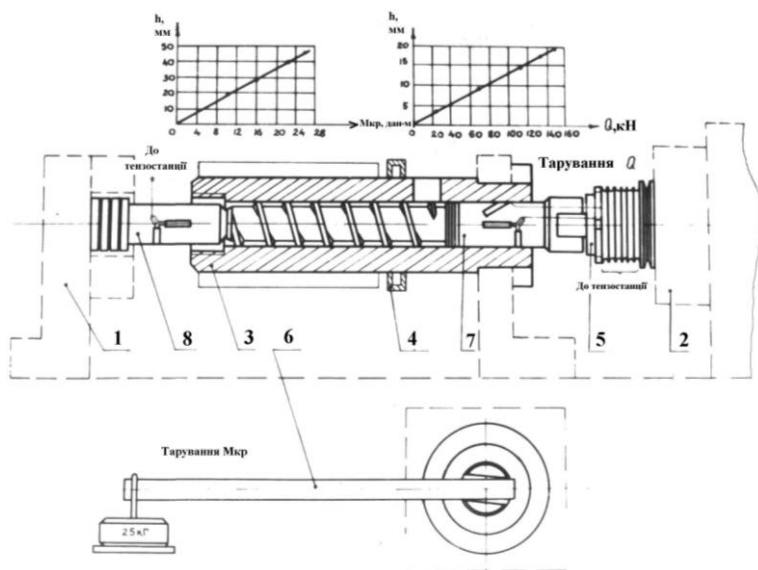


Рис. 9.7. Схема тарування крутильного моменту і осьового зусилля на шнеку:

- 1 – нерухома плита; 2 – гідроциліндр; 3 – матеріальний циліндр;**
- 4 – опора; 5 – струмознімач; 6 – тарувальне плече; 7 – шнек;**
- 8 – тензометричний динамометр**

При таруванні осьового зусилля шнек вставлявся в циліндр термопластавтомата, мундштук викручувався і на його місце вставлявся тензометричний динамометр 8 (рис. 9.7), який впирався

в нерухому плиту 1. При включенні гідроциліндра вприскування осьове зусилля від штока гідроциліндра передавалося через шнек на динамометр 8. Тензодатчики динамометра і тензодатчики для вимірювання осьового зусилля на штоку гідроциліндра під'єднувалися через підсилювач до осцилографа і їх сигнали записувалися на фотопapіp. На основі записаних осцилограм будувався тарувальний графік осьового зусилля, приклад якого показано на рис. 9.7.

При таруванні датчиків крутильного моменту один кінець шнека кріпився нерухомо в циліндрі, а в шліці в другому його кінці вставлявся перпендикулярно до осі важіль з плечем 1 м, на який підвішувалися гирі для створення крутильного моменту. Сигнали від тензодатчиків крутильного моменту, що наклеювалися на шнеку 7, записувалися на осцилограму осцилографом Н-700 і на їх основі будувався тарувальний графік крутильного моменту шнека (рис. 9.7).

В процесі проведення експериментальних досліджень змінними факторами були діаметр шнека, перероблювальний матеріал і величина зазору між шнеком і циліндром. Всі інші параметри установки залишилися незмінними, а саме: діаметр циліндра – 40 мм; пресформи – з об'ємом виробу “Тарілка” – 32 см³; тиск в гідросистемі – 10 МПа; протитиск шнеку в період завантаження – 0,4 МПа.

З великої кількості термопластичних матеріалів, які перероблюються термопластавтоматами, були вибрані поліетилен, полістирол, капрон і склопластик (поліамід склонаповнений). При цьому враховувалося їх фізико-механічні властивості, застосування в народному господарстві і перспективи подальшого використання. Характеристики досліджуваних матеріалів наведені нижче.

1. Поліетилен високого тиску низької щільності ПЕВД (Э15802-020) широко застосовується в народному господарстві, має широкий діапазон температур при переробці і широкий діапазон зміни коефіцієнта в'язкості.

2. Полістерол (ПСМ) – добре перероблюваний матеріал з високими фізико-механічними характеристиками, знаходить широке застосування в промисловості.

3. Капрон П 6.6 – представник групи поліамідних матеріалів. Він вимагає точного витримування режимів переробки. Незначні відхилення від режиму приводять до різкої зміни

в'язкості, що викликає або збільшення часу завантаження машини при малій в'язкості, або застигання матеріалу в мундштуці при його великій в'язкості. Витримка розплаву при високій температурі більше 15 хв. призводить до його хімічного розкладання. Збільшення зазору між шнеком і циліндром приводить до зменшення продуктивності машини.

4. Склопластик (ПС 68-30) перспективний, але важко перероблювальний матеріал. Основа пластик – поліамідна смола, яка має властивості, близькі до властивостей капрону. Наповнювачем є скловолокно, що значно змінює в'язкість матеріалу і при відхиленні від режиму переробки приводить до заклинювання шнека в циліндрі.

9.3. Дослідження впливу зазору між шнеком і циліндром на експлуатаційні характеристики термопластавтомату

Зазор між шнеком і циліндром, який в результаті зношування змінюється в процесі експлуатації, має великий вплив як на силові параметри, що виникають в матеріальному циліндрі так і на продуктивність термопластавтомату.

В процесі досліджень зазор між шнеком і циліндром змінювався за рахунок зміни діаметра шнека методом механічної обробки по зовнішньому діаметру витків. Таким чином імітувався знос шнека. Зміна діаметра шнека відбувалася шліфуванням по зовнішньому діаметру витків на довжині 600 мм від вихідного кінця. Для врахування характеру зношування витків в реальних умовах експлуатації (рис. 11.2) шліфування проводилося по конусу від вихідного кінця шнека. В першій групі дослідів проводилось зменшення діаметра шнека на вихідному кінці на 0,06 мм, а в подальших групах дослідів зменшення діаметру проводилося через 0,1–0,2 мм. Такий порядок зміни діаметра шнеку пояснюється бажанням більш детально дослідити вплив зазору на експлуатаційні параметри в інтервалі його значень до 0,5 мм, коли на поверхні шнека є зміцнений шар товщиною до 0,5 мм (метод азотування). Діаметр шнека після механічної обробки вимірювався в центрах по виступах витків з допомогою мікрометра з точністю 0,01 мм.

Всі досліди з впливу зазору між шнеком і циліндром на експлуатаційні характеристики термопластавтомату були розділені

на 6 груп. В першій групі дослідів застосовувався новий шнек, який забезпечував зазор з циліндром 0,09–0,11 мм. Першим перероблявся поліетилен в напівавтоматичному режимі. В процесі роботи машини секундоміром вимірювався час завантаження матеріального циліндра, час циклу. Кількість обертів шнека в період завантаження фіксувалася лічильником обертів, частота обертання шнека визначалася тахометром. Тиск по довжині матеріального циліндра, крутильний момент і осьове зусилля реєструвалися тензовиміральною станцією (рис. 9.2) на фотопапір.

Після закінчення досліджень з використанням поліетилену матеріальний циліндр повністю очищався від старого матеріалу і проводились аналогічні дослідження з використанням полістиролу. По аналогічній схемі проводились дослідження з капроном. Останнім випробовувався склопластик. Якість виробів оцінювалася візуально.

Після закінчення першої групи дослідів шнек виймався з машини і перешліфовувався на круглошліфувальному верстаті зі зменшенням його діаметру на 0,1 мм. Після цього проводилася друга група дослідів в аналогічній послідовності. Після завершення другої групи дослідів шнек знову перешліфовувався на менший діаметр і проводилася наступна група дослідів, включаючи шостої групи. Зазор між шнеком і циліндром від першої до шостої груп досліджень змінювався в такій послідовності: 0,11; 0,17; 0,27; 0,4; 0,62; 0,74.

У випадку, коли в якійсь з груп дослідів при переробці певного матеріалу продуктивність машини різко падала, або якість виробу була незадовільною, то в наступну групу дослідів цей матеріал не включався. Після кожної групи дослідів проводилось повторне тарування вимірального системи.

При обробці осцилограм, на яких були зафіксовані тиск в матеріальному циліндрі, крутильний момент і осьова сила на шнеку, вимірювались ординати цих характеристик в різні періоди циклу (вприскування, витримки під тиском і завантаження) і на основі тарувальних графіків визначались їх абсолютні величини. Результати заносились в загальні таблиці, на основі яких будувалися графіки залежності цих величин від величини зазору між шнеком і циліндром і розподіл тиску в матеріальному циліндрі по його довжині при переробці різних матеріалів. В кожній групі

досліджень для кожного матеріалу визначалося середнє значення часу завантаження, число обертів шнека при завантаженні і час циклу.

Кількість повторних спостережень N в процесі досліджень визначалася методом статистичної обробки експериментальних даних за методикою [175] на основі попередніх досліджень (табл. 9.1) експлуатаційних параметрів (часу завантаження t_3 , с; кількість обертів шнека в період завантаження $n_{ш}$; максимального тиску розплаву P_{\max} в мм запису осцилограми).

Таблиця 9.1

Результати попередніх експериментальних досліджень експлуатаційних характеристик (t_3 , $n_{ш}$, P_{\max}) термопластавтомату ДБ 3328 при переробці поліетилену

№ з/П	t_3 , с	X	X^2	$n_{ш}$	X	X^2	P_{\max}	X	X^2
1	18,0	-0,7	0,49	32,0	0,8	0,64	11,0	1,7	2,8
2	20,0	+1,3	1,69	33,5	2,3	5,29	11,5	1,2	1,44
3	17,0	-1,7	2,90	27,5	3,3	10,0	13,0	0,3	0,09
4	17,4	-1,3	1,69	30,0	1,2	1,44	12,0	0,7	0,49
5	20,0	+1,3	1,69	27,5	3,7	13,64	12,0	0,7	0,49
6	17,2	-1,5	2,25	29,0	2,2	4,84	13,5	0,8	0,64
7	17,5	-1,2	1,44	30,5	0,7	0,49	12,0	0,7	0,49
8	19,4	+0,7	0,49	34,5	3,3	9,9	13,0	0,3	0,09
9	18,6	-0,1	0,01	33,0	2,8	7,84	13,0	0,3	0,09
10	21,0	+2,3	5,29	28,5	2,7	7,24	14,0	1,3	1,69
11	20,2	+1,5	2,25	33,5	2,3	5,29	11,5	1,2	1,44
12	19,2	+0,5	0,25	33,0	1,8	3,24	12,5	0,2	0,02
13	19,0	+0,3	0,09	33,0	1,8	3,24	14,0	1,3	1,69
14	17,6	-1,1	1,21	31,5	0,8	0,09	13,0	0,3	0,09
15	18,4	-0,3	0,09	32,0	0,8	0,64	14,0	1,3	1,69
Σ	290,5		22,19	469,0		73,9	190,0		13,24
M	18,7			31,2			12,7		

Позначення в таблиці 9.1:

t_3 – час завантаження матеріального циліндра, с;

$n_{ш}$ – кількість обертів шнека в період завантаження;

P_{\max} – максимальний тиск розплаву за даними осцилограм, мм;

M – середньоарифметичне значення;

X – відхилення від середньоарифметичного значення;

$$N = \frac{v^2 T^2}{p^2}, \quad (9.1)$$

де: v – коефіцієнт мінливості, %;
 T – показник достовірності;
 p – показник точності, %;

$$v = \pm \frac{100\sigma}{M};$$

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum X^2}{n_1 - 1}};$$

n_1 – число варіантів попередніх спостережень.

Приймаємо $p = 5\%$, $T = 2,85$ [175, табл. 2, б], що відповідає вірогідності результату $p = 0,99$.

Тоді, згідно (9.1) маємо: $\sigma_{t_3} = 1,26$; $v_{t_3} = 6,8\%$ і $N_{t_3} = 12,3$; $\sigma_{n_{ui}} = 2,41$; $v_{n_{ui}} = 7,7\%$; $N_{n_{ui}} = 15,8$; $\sigma_{p_{\max}} = 0,93$; $v_{p_{\max}} = 7,3\%$; $N_{p_{\max}} = 14,4$.

Приймаємо $N = 16$.

9.4. Методика експериментальних досліджень зносостійкості пар тертя в середовищі розплаву пластмас

Зі всіх пар тертя в термопластавтоматах, що працюють в розплаві пластмас, найбільший знос мають пара шнек-циліндр. В зв'язку з цим наші дослідження присвячуються саме цій парі тертя. Умови її роботи в термопластавтоматах характеризуються наступними експлуатаційними параметрами: температура середовища (до 250 °C), частота обертання шнека 120–150 хв⁻¹, переміщення вздовж осі шнека в кожному циклі при вприскуванні розплавленої дози на віддаль 7–9 см за 3–4 секунди з швидкістю 2,5–3 см/с. За один цикл шнек робить 15–20 хв⁻¹ і одне лінійне переміщення. При цьому шнек і циліндр не повинні контактувати між собою в зв'язку з наявністю зазору за винятком випадків заклинювання при деформаціях осі шнека. Виходячи з вищезазначених умов роботи пари шнек-циліндр, нами спроектована експериментальна установка для проведення

досліджень зносостійкості матеріалів в середовищі пластмас, яка б моделювала реальні умови роботи пари “шнек–циліндр”.

З метою вивчення зносостійкості матеріалів з різними властивостями та методами їх зміцнення в середовищі розплаву склонаповнених пластмас нами розроблена спеціальна експериментальна установка (рис. 9.8, а), що моделює умови роботи пари шнек-циліндр екструдерів і термопластавтоматів. Установка складається з чотирьох вузлів: приводу, електрошкафа з вимірювальною апаратурою, вузла зношування зразків, механізму подачі розплаву пластмас.

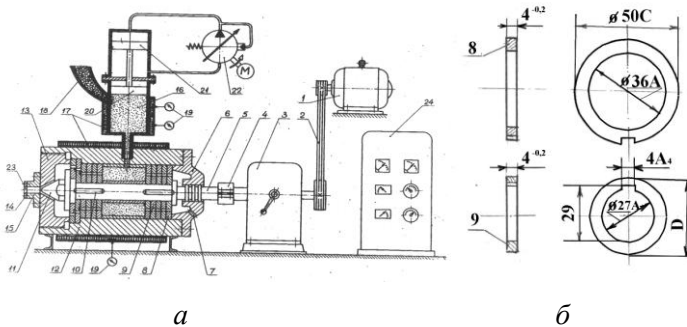


Рис. 9.8. Установка для випробувань на зношування в середовищі розплаву пластмас (а):

- 1 – електродвигун; 2 – клинопасова передача; 3 – редуктор; 4 – муфта; 5 – вал; 6 – кришка корпусу; 7 – отвір для виходу пластмаси; 8 – зовнішні нерухомі зразки; 9 – внутрішні зразки; 10 – шпонка; 11 – наконечник; 12 – корпус; 13 – фланець корпусу; 14 – регулююча засувка; 15 – фланець; 16 – електрообігрівальний циліндр; 17 – електронагрівач; 18 – загрузочний бункер; 19 – термопари; 20, 21 – поршень гідроциліндра; 22 – гідроагрегат; 23 – отвір для виходу пластмаси; 24 – електрошкафа. Зразки для випробувань на зносостійкість (б)**

Привід установки складається з електродвигуна 1, клинопасової передачі 2, двохступеневого редуктора 3, муфти 4, яка з'єднує вал редуктора з валом 5 вузла тертя. На валу з допомогою шпонок 10 кріпляться дослідні зразки 9, які обертаються разом з валом і моделюють роботу шнека. В корпусі

12 кріпляться циліндричні нерухомі зразки 8, які моделюють циліндр екструдера. Корпус закритий кришкою 6 і фланцем 15.

Правий кінець вала опирається на підшипник ковзання, а лівий – закінчується наконечником 11, який кріпить рухомі зразки на валу з допомогою різьбового з'єднання. Корпус нагрівається електронагрівачами 17. Температура нагріву контролюється з допомогою термопар 19 і підтримується в заданих межах постійною. Гранульована пластмаса подається через загрузочний бункер 18 в циліндр 16, де вона плавиться і подається під тиском поршнем 20 в вузол тертя. Робочий поршень приводиться в зворотно-поступальний рух гідроциліндром з поршнем 21 з допомогою гідроагрегата 22. Розплавлена пластмаса, що пройшла через зазор між рухомими і нерухомими зразками, виходить з вузла тертя через отвори 7 і 23. Для підтримки однакового об'єму пластмаси, що проходить через зазори з правої і лівої сторін вузла тертя, на отворі 23 встановлена регулююча засувка 14. Конструкція зразків для випробування на зносостійкість наведена на рис. 9.8, б.

На даній установці проведені порівняльні дослідження на знос зразків зі сталей 20, 45 і 38ХМЮА, поверхня яких зміцнювалась за різними видами хіміко-термічної обробки: сульфидування, цементації, борування, традиційного газового азотування в печах в середовищі аміаку на протязі 48 годин та іонному азотуванні в тліючому розряді в безводневому середовищі при температурі 520 °С, складі насичуючого середовища 75об%N₂ + 25об%Ag , тиску в вакуумній камері 320 Па і часі дифузійного насичення 8 годин. Фізико-механічні характеристики зразків наведені в таблиці 9.2.

Таблиця 9.2

Фізико-механічні характеристики зразків після різних видів хіміко-термічної обробки сталей

Вид хіміко-термічної обробки	Матеріал зразків	Мікротвердість поверхні	
		До ХТО	Після ХТО
Борування	Сталь 45	2750	13000
Іонне азотування	38ХМЮА	3100	9150
Традиційне газове азотування в печах	38ХМЮА	3100	9720
Цементація	Сталь 20	2450	6500
Сульфидування	45Х	2850	4200

Випробування проводилися при тиску 4МПа і температурі 240 °С в середовищі розплаву склонаповненого поліаміду П68-30 з вмістом 30 % за вагою скловолокна.

Знос зразків визначався через кожні 0,5 млн. обертів робочого валу (шлях тертя $0,58 \cdot 10^5$ м) на універсальному інструментальному мікроскопі УИМ-10 з точністю до 0,5 мкм. Вимірювання проводились в одних і тих самих точках на двох взаємно-перпендикулярних діаметрах. Перед вимірюванням зразки очищалися від пластмаси. Кожний результат визначався як середнє арифметичне значень з десяти замірів. Кожний експеримент повторювався три рази і знос визначався як середнє арифметичне з результатів трьох дослідів.

9.5. Дослідження властивостей поверхневого шару після азотування в тліючому розряді та їх оптимізація за критерієм максимальної зносостійкості

Азотування в тліючому розряді проводилося в безводневих середовищах (суміші азоту з аргоном в різних співвідношеннях) технологічний процес добре керується чотирьма технологічними параметрами: температурою дифузійного насичення (T , °С), тиском в вакуумній камері (P , Па), складом насичуючого середовища (вмістом Ag об. % в суміші з азотом) та часом дифузійного насичення (τ , год.) і дозволяє змінювати властивості азотованого шару (твердість, товщину, фазовий склад і градієнт твердості по товщині) в широких межах. Це відкриває можливості для оптимізації цих властивостей для отримання максимальних експлуатаційних характеристик і, зокрема, максимальної зносостійкості.

Теоретичними і експериментальними дослідженнями [149,159] показано, що найбільший вплив на фазовий склад азотованих шарів має температура і тиск в процесі дифузійного насичення. Тому з метою скорочення кількості експериментів при дослідженні властивостей азотованого шару та процесу зношування азотованих зразків було використано двох факторний ротатбельний план другого порядку (план Бокса) [177]. В процесі досліджень змінювалися такі фактори: температура в межах 500–620 °С, тиск у вакуумній камері в межах – 125–355 Па. Тривалість

азотування та вміст аргону у газовому середовищі фіксувалися, і становили відповідно 480 хв та 25 % Ar. Ці параметри вибрані з умови забезпечення максимальної товщини і твердості азотованого шару для сталі 38ХМЮА на основі попередніх досліджень, якими було встановлено, що товщина азотованого шару залежно від часу азотування змінюється за параболічною залежністю і після 8 год дифузійного насичення практично не змінюються. Залежність поверхні азотованого шару сталі 38ХМЮА від вмісту аргону в насичуючому середовищі має екстремальний характер з максимумом при 25 % Ar.

Для отримання моделі використовувався алгебраїчний поліном другого порядку [177]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2, \quad (9.2)$$

де $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти регресії;

x_1, x_2 – величини, які залежать від змінних факторів.

Для запису умов експерименту і обробки експериментальних даних рівні факторів кодувались.

Прийняті такі змінні фактори:

X_1 – температура азотування,

X_2 – тиск в вакуумній камері.

При кодуванні значень X_1 і X_2 верхній рівень позначають +1, нижній –1, а нульовий 0. Кодування фактора X_i визначається виразом:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (9.3)$$

де i – номер фактора;

X_i – натуральне значення i -го фактора;

X_{0i} – натуральне значення нульового рівня i -го фактора;

ε_i – інтервал зміни i -го фактора.

Експериментальні дослідження проводилися на рівнях та з інтервалами, які наведені в таблиці 9.3.

Таблиця 9.3

Рівні та інтервали зміни факторів

Позначення	Фактор	Рівень варіювання					Інтервал варіювання ϵ
		-1,414	-1	0	+1	+1,414	
X_1	Температура, °C	500	520	560	600	620	40
X_2	Тиск, Па	125	160	240	320	355	80

Матриця плану для композиційного ротатбельного планування другого порядку наведена в таблиці 9.4. Дослідження зношування азотованих зразків проводились на сталі 38ХМЮА в середовищі розплаву склонаповненого поліаміду ПС68-30 з вмістом 30 % скловолокна.

Таблиця 9.4

Матриця ротатбельного планування експерименту

Номер досліді	Матриця планування		Робоча матриця	
	X_1	X_2	$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{Па}$
1	+	+	600	320
2	-	+	520	320
3	+	-	600	160
4	-	-	520	160
5	-1,414	0	500	240
6	+1,414	0	620	240
7	0	-1,414	560	125
8	0	+1,414	560	355
9	0	0	560	240
10	0	0	560	240
11	0	0	560	240
12	0	0	560	240
13	0	0	560	240

Після проведення експерименту за ротатбельним планом другого порядку, отримали значення мікротвердості поверхні, інтенсивність зношування. Значення були перевірені на однорідність дисперсій похибок за критерієм Кохрена. Коефіцієнти рівняння регресії знаходилися за допомогою матричного методу, а також перевірялась їх значимість по довірчих границях за

допомогою критерію Стьюдента при п'яти процентному рівні значимості.

Для визначення якості поверхневого шару та структури внутрішніх шарів модифікованих сталевих зразків, проводили мікроструктурний аналіз металів. У оптичному мікроскопі ММ-10 розглядали мікрошліфи, що мають шліфовану і поліровану гладку поверхню, що відображає світлове проміння. Дослідження мікроструктури азотованих зразків проводили на “прямих” та “косих” шліфах. При “прямих” шліфах зразки для полегшення обробки поміщали в спеціальний затиск, що складається з двох пластин, які можна за допомогою гвинтів зближувати і розсовувати (струбчинки).

При “косих” шліфах для виявлення тонкого азотованого шару використовували струбцину, яка дозволяє шліфувати зразок під кутом 30 градусів, відповідно, товщина азотованого шару вимірювалася в масштабі 2:1.

Для поверхневого травлення використовували реактив, який складається з 4% спиртового розчину азотної кислоти.

Вимірювання мікротвердості на поверхні азотованих сталевих зразків та розподілу мікротвердості по перерізу поверхневих шарів азотованих зразків проводили на “прямих” та “косих шліфах” за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3, використовуючи при цьому навантаження 50 та 100 г.

В даній роботі для рентгеноструктурних досліджень використовували ДРОН-3М. Цей прилад широкого призначення, основна функція якого – зняття рентгенівського спектру (“дифрактограми”). За допомогою рентгеноструктурного аналізу ми визначали фазовий та кількісний склад поверхневих шарів сталевих зразків після іонного азотування. Рентгеноструктурний аналіз проводився з автоматичним записом кривих розподілу інтенсивності дифракційних віддзеркалень в кобальтовому випроміненні. Рентгенівські дані описують структурні зміни в поверхневому шарі азотованих зразків.

РОЗДІЛ 10

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СИЛОВИХ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ В МАТЕРІАЛЬНОМУ ЦИЛІНДРІ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ РІЗНИХ ПЛАСТМАС

В процесі переробки пластмас в матеріальному циліндрі термопластавтоматів діють силові параметри (тиск, крутильний момент, осьове зусилля), величина і розподіл яких залежить від режиму роботи термопластавтомату. Силові параметри впливають на зносостійкість, міцність і довговічність конструктивних елементів матеріального циліндра. На величину і розподіл силових параметрів крім режиму роботи значний вплив мають зазор між шнеком і циліндром та реологічні властивості перероблювальних матеріалів. Значне збільшення зазору в результаті зношування пари “шнек–циліндр” викликає перерозподіл силових параметрів в матеріальному циліндрі, зниження продуктивності термопластавтомату та якості продукції.

10.1. Дослідження величини і розподілу тиску по довжині матеріального циліндра при переробці різних пластмас

На рис. 10.1–10.4 наведені осцилограми, а в таблиці 10.1 – цифрові дані тиску в матеріальному циліндрі термопластавтомату ДБ3328 при переробці різних пластмас. З наведених даних видно, що в періоди завантаження і вприскування виникають різні величини тиску. Максимальний тиск виникає в матеріальному циліндрі в період вприскування розплаву і в зоні, що наближена до вихідного кінця шнека ($L = 80$ мм, табл. 10.1). Для різних пластмас величина максимального тиску різна і залежить від реологічних властивостей розплаву, зокрема його в'язкості, та забезпечення якості виробу. Дослідження показують, що величина максимального тиску в період завантаження в 1,5–2 рази менша в порівнянні з періодом вприскування розплаву

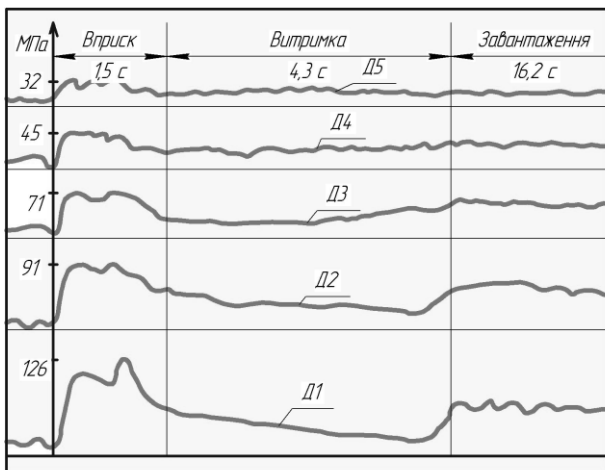


Рис. 10.1. Осцилограма тиску в різних зонах матеріального циліндра при переробці поліетилену високого тиску ПВД (зазор між шнеком і циліндром $\delta=0,11$ мм)

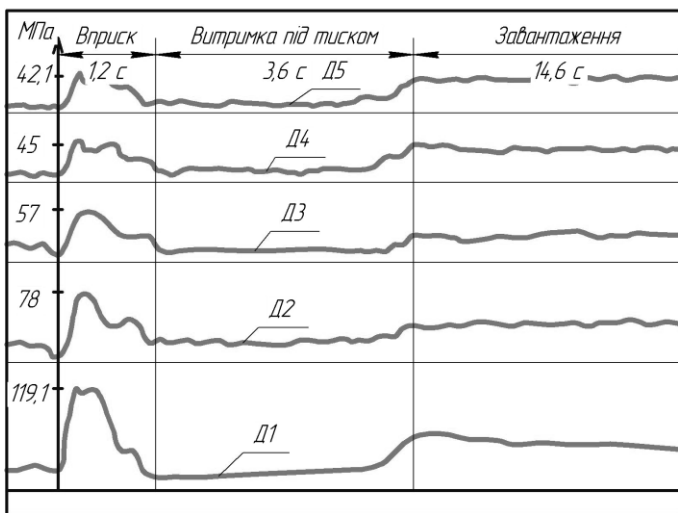


Рис. 10.2. Осцилограма тиску в різних зонах матеріального циліндра при переробці капрону Пб.6 (зазор між шнеком і циліндром $\delta=0,11$ мм)

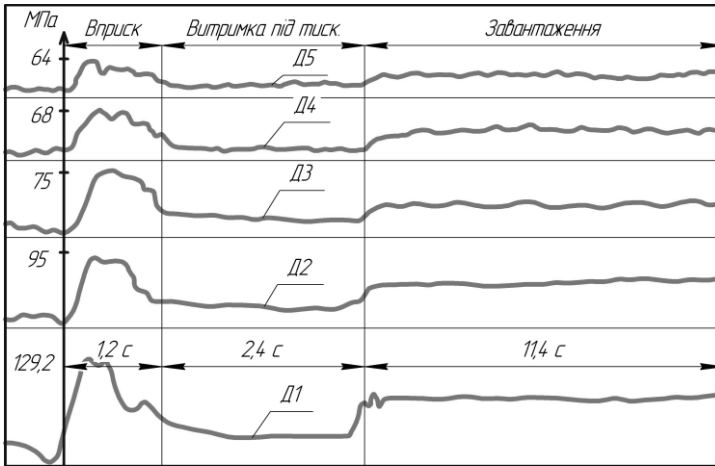


Рис. 10.3. Осцилограма тиску в різних зонах матеріального циліндра при переробці полістиролу ПСМ (зазор між шнеком і циліндром $\delta=0,11$ мм)

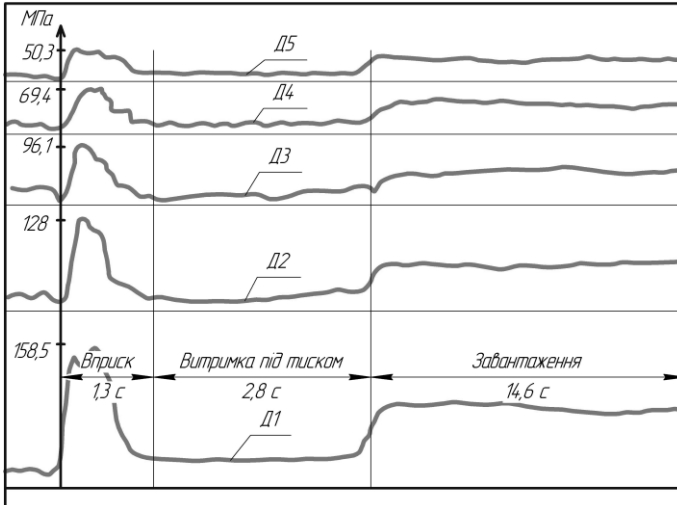


Рис. 10.4. Осцилограма тиску в різних зонах матеріального циліндра при переробці поліаміду склонаповненого ПСА68-30 (зазор між шнеком і циліндром $\delta=0,11$ мм)

Таблиця 10.1

Розподіл тиску по довжині матеріального циліндра при переробці різних матеріалів при зазорах між шнеком і циліндром $\delta=0,11$ мм та $0,74$ мм

№ з/п	Відстань від вихідного кінця шнека L , мм	Тиск P в матеріальному циліндрі, МПа			
		Склопластик ПС68-30	Поліетилен ПВТ	Полістирол ПСМ	Капрон П6.6
Період завантаження $\delta = 0,11$ мм, $P \cdot 10^{-2}$ МПа					
1	80	90,2	83,1	92,2	67,4
2	160	78,1	65,2	76,8	58,1
3	240	55,4	52,3	67,5	53,3
4	320	45,2	47,9	60,0	52,6
5	400	44,0	43,5	53,0	52,5
Період вприскування $\delta = 0,11$ мм					
6	80	158,5	126,0	129,0	119,1
7	160	123,0	91,0	95,0	78,0
8	240	96,1	71,0	75,0	57,0
9	320	69,4	45,0	68,9	45,0
10	400	50,3	32,0	64,0	42,1
Період завантаження $\delta = 0,74$ мм, $P \cdot 10^{-2}$ МПа					
1	80	58	62,8	66,0	65,0
2	160	54,2	58,3	64,0	65,5
3	240	52,8	56,0	63,0	66,3
4	320	52,2	54,8	62,4	67,5
5	400	52,0	54,0	62,0	68,0
Період вприскування $\delta = 0,74$ мм					
1	80	144,0	135,0	122,0	105,0
2	160	135,0	105,0	100,0	110,0
3	240	105,0	82,0	90,0	76,0
4	320	94,0	85,0	82,0	77,0
5	400	81,0	90,0	83,0	79,0

На рис. 10.5–10.8 наведені графіки розподілу тиску по довжині матеріального циліндра для різних пластмас в періоди завантаження і пластикації та вприскування розплаву при зазорах між шнеком і циліндром $0,11$ мм і $0,74$ мм. З рисунків видно, що тиск в матеріальному циліндрі зменшується по довжині циліндра в

напрямку від зони розплаву до зони завантаження. Така закономірність має місце як в період завантаження і пластикації матеріалу, так і в період вприскування.

При цьому градієнт зміни тиску різний для різних матеріалів, що в значній мірі обумовлюється властивостями розплаву пластмас і в першу чергу їх в'язкістю. Виключенням з такої закономірності є збільшення тиску в напрямку зони завантаження для капрону П6.6 в період завантаження і пластикації при зазорі між шнеком і циліндром $\delta = 0,74$ мм (рис. 10.6). Це пояснюється тим, що розплав капрону має найнижчу в'язкість ($0,15$ Н/см²) з досліджуваних нами матеріалів і при зазорі $\delta = 0,74$ мм має місце значне перегікання розплаву в напрямку зони завантаження і відповідне збільшення тиску до $0,68$ МПа на відстані 400 мм проти $0,65$ МПа на відстані 80 мм від вихідного кінця шнека.

З графіків 10.5–10.9 видно, що збільшення зазору між шнеком і циліндром приводить до зменшення перепаду тиску по довжині циліндра для всіх матеріалів як в період вприскування розплаву, так і в період завантаження і пластикації (рис. 10.6).

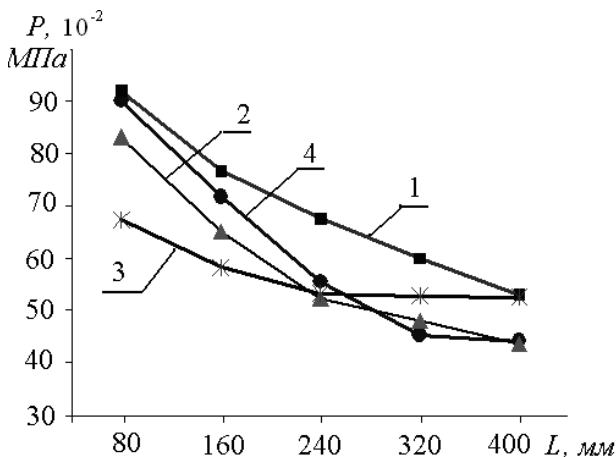


Рис. 10.5. Розподіл тиску по довжині циліндра від зони пластикації в період завантаження при зазорі між шнеком і циліндром $\delta = 0,11$ мм:

1 – полістирол ПСМ; 2 – поліетилен ПВТ; 3 – капрон П6.6;
4 – поліамід склонаповнений ПС68-30

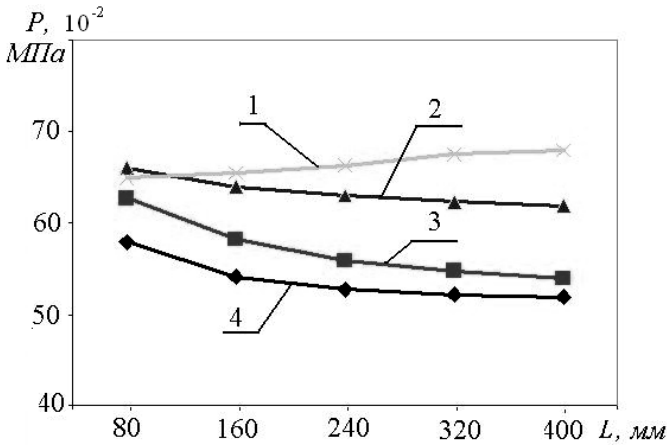


Рис. 10.6. Розподіл тиску по довжині циліндра в період завантаження і пластикації пластмас при зазорі між шнеком і циліндром $\delta=0,74$ мм:

1 – капрон П6.6; 2 – полістирол ПСМ; 3 – поліетилен ПВТ;
4 – поліамід склонаповнений ПС68-30

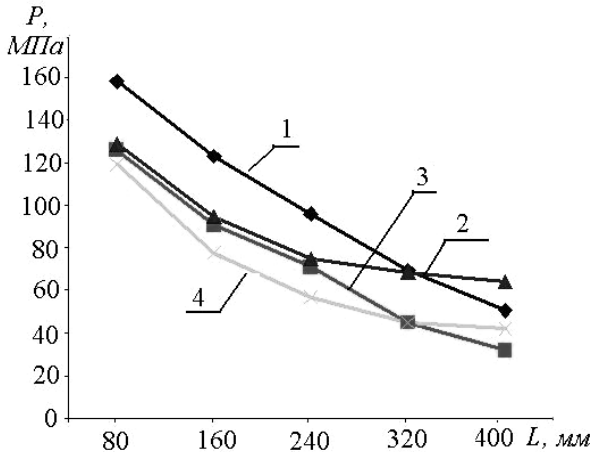


Рис. 10.7. Розподіл тиску по довжині циліндра від зони пластикації до зони завантаження в період вприскування розплаву пластмас при зазорі між шнеком і циліндром $\delta=0,11$ мм:

1 – поліамід склонаповнений ПС68-30; 2 – полістирол ПСМ;
3 – капрон П6.6; 4 – поліетилен високого тиску ПВТ

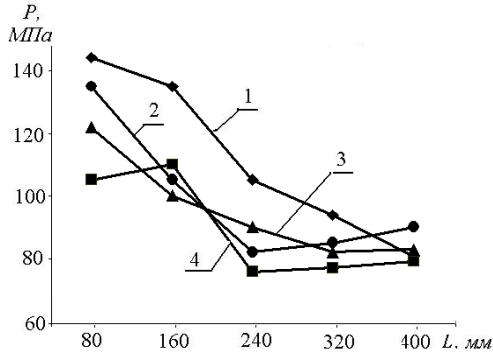


Рис. 10.8. Розподіл тиску по довжині циліндра, період вприскування при зазорі $\delta=0,74$ мм між шнеком і циліндром: 1 – поліамід склонаповнений ПС68-30; 2 – поліетилен високого тиску ПВТ; 3 – полістирол ПСМ; 4 – капрон П6.6

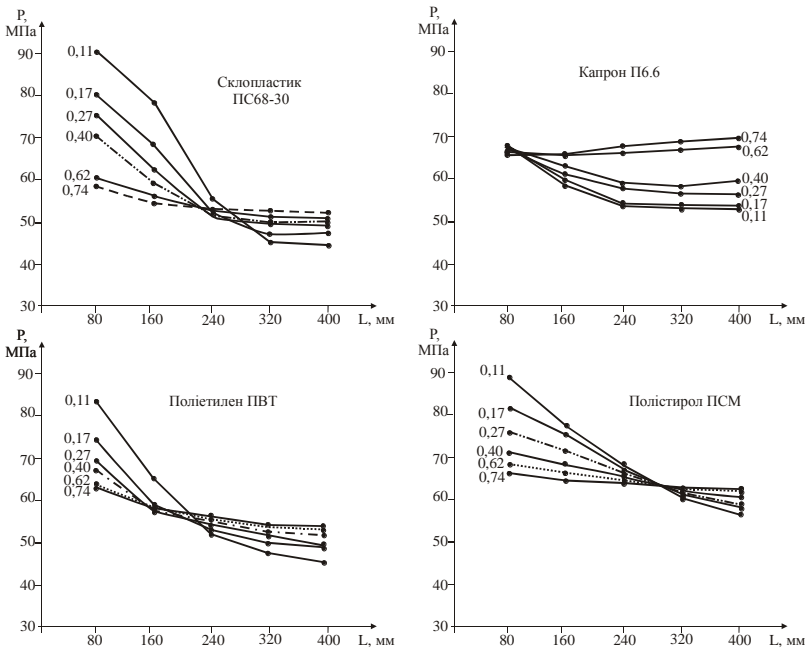


Рис. 10.9. Розподіл тиску по довжині циліндра в період завантаження і пластикації різних матеріалів при різних значеннях зазору між шнеком і циліндром

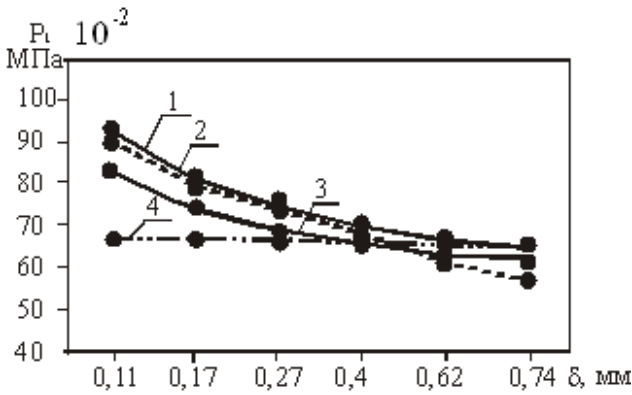
10.2. Вплив зазору між шнеком і циліндром на розподіл тиску в різних зонах матеріального циліндра при переробці різних пластмас

В таблиці 10.2 наведені дані, а на рис. 10.10, *a* і 10.11, *a* показані залежності тиску в матеріальному циліндрі термопластавтомату ДБ3328 в зоні розплаву (датчик Д1) на віддалі 80 мм від вихідного кінця шнеку в періоди завантаження і вприскування при переробці різних пластмас. З рис. 10.10, *a* і 10.11, *b* видно, що зі збільшенням зазору між шнеком і циліндром тиск в зоні вприскування зменшується як в період завантаження, так і в період вприскування для всіх досліджуваних матеріалів. При цьому закономірності цих змін різні для різних періодів технологічного процесу. В період завантаження (рис. 10.10, *a*) зменшення тиску в залежності від зазору δ відбувається по експоненціальному закону для всіх досліджуваних матеріалів. При цьому вище абсолютне значення тиску мають матеріали з більшою в'язкістю (полістирол ПСМ і склопластик ПС68-30).

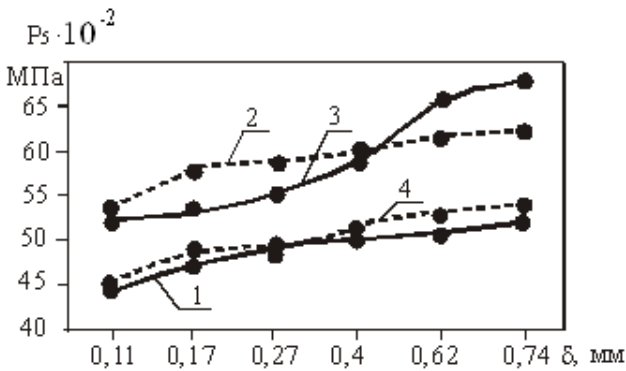
Таблиця 10.2

Тиск в зоні розплаву (датчик Д1) термопластавтомату ДБ3328 при різних зазорах між шнеком і циліндром при переробці різних пластмас

№ з/п	Зазор між шнеком і циліндром $\delta \cdot 10^{-3}$ м	Максимальний тиск P_{\max} в матеріальному циліндрі, МПа			
		Склопластик ПС68-30	Поліетилен ПВТ	Полістирол ПСМ	Капрон П6.6
Період вприскування					
1	0,11	158,5	126,0	129,2	119,1
2	0,17	158,1	126,1	128,8	119,6
3	0,27	158,0	126,0	128,1	118,0
4	0,40	157,2	124,8	128,0	110,2
5	0,62	150,3	114,0	127,2	107,1
6	0,74	136,4	110,1	126,4	105,7
Період завантаження, $P_{\max} \cdot 10^{-2}$ МПа					
1	0,11	90,2	83,1	92,2	67,4
2	0,17	80,1	74,3	81,4	67,1
3	0,27	74,3	69,6	75,5	66,9
4	0,40	68,5	67,2	70,7	66,7
5	0,62	62,3	63,7	67,3	65,8
6	0,74	58,4	63,3	65,9	65,2



a

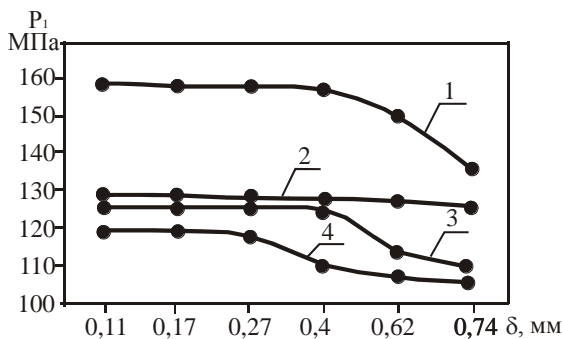


б

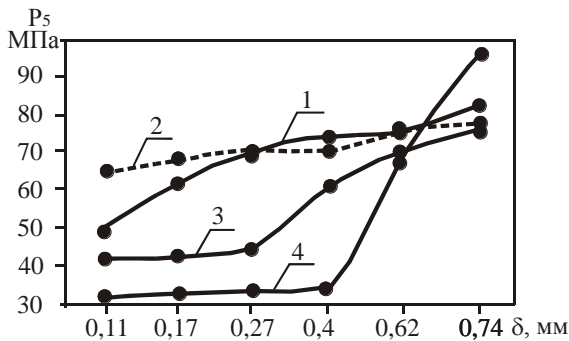
Рис. 10.10. Вплив зазору δ на тиск в зоні датчиків Д1 (*a*) і Д5(*б*) матеріального циліндра в період завантаження різних пластмас: 1 – ПС68-30; 2 – ПСМ; 3 – П6.6; 4 – ПВТ

В період вприскування розплаву залежність тиску від зазору δ має інший характер. Для пластмас ПВТ, ПСМ і П6.6, які не мають наповнювачів, значення тиску в 1,2–1,3 рази менший, ніж склонаповненого поліаміду ПС68-30 (рис. 10.11, *a*). В досліджуваних межах зміни зазору δ від 0,1 мм до 0,74 мм закономірності зміни тиску в цей період різні для різних матеріалів. Полістирол ПСМ в усьому названому інтервалі має прямолінійну

залежність тиску від зазору. Для інших досліджуваних матеріалів при певному значенні зазору відбувається більш інтенсивне падіння тиску. Так, для капрону П6.6 це спостерігається при зазорах δ більших від 0,27 мм, для поліетилену ПВТ – при зазорах δ більших від 0,4 мм, для поліаміду склонаповненого ПС68-30 – при зазорах більших від 0,62 мм. Це пояснюється різною в'язкістю розплаву перероблюваних матеріалів, з яких найвищу в'язкість має розплав полістиролу ПСМ і найменшу – капрон П6.6, і більшим переливом розплаву з меншою в'язкістю через зазор між гребнями шнеку і циліндром під дією високого тиску в зоні вприскування.



а



б

Рис.10.11. Вплив зазору δ на тиск в зоні датчиків Д1 (а) і Д5(б) матеріального циліндра в період вприскування різних пластмас: 1 – ПС68-30; 2 – ПСМ; 3 – П6.6; 4.- ПВТ

Таблиця 10.3

Результати експериментальних досліджень експлуатаційних параметрів термопластавтомату ДБ3328 в період завантаження при переробці різних матеріалів

Зазор між шнеком і циліндром δ , 10^{-3} м	Тиск P_i вздовж циліндра, 10^{-2} МПа					Крутильний момент, Н·м	Осьове зусилля $P_{ос}$, кН
	Віддаль від кінця шнека, мм						
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5		
Матеріал – поліамід склонаповнений ПС68-30							
0,11	90,2	78,1	55,4	45,2	44,6	381	95,0
0,17	80,1	68,3	52,3	47,3	47,5	222	80,2
0,27	74,3	62,5	51,2	49,8	49,3	224	76,0
0,40	68,5	59,4	51,6	50,1	50,4	255	72,2
0,62	62,3	56,1	52,8	51,3	51,0	271	62,3
0,74	58,4	54,5	53,2	52,6	52,2	302	60,1
Матеріал – капрон П6.6							
0,11	67,4	58,1	53,3	52,6	52,5	280	68,7
0,17	67,1	59,3	53,8	53,4	53,2	96	68,1
0,27	66,9	60,7	57,4	56,7	55,4	88	67,9
0,40	66,7	61,9	58,2	57,1	59,1	135	67,5
0,62	65,8	65,2	66,3	66,5	65,8	174	66,8
0,74	65,2	65,4	67,3	67,8	68,1	230	65,9
Матеріал – поліетилен ПВТ							
0,11	83,1	65,2	52,3	47,9	45,5	310	84,2
0,17	74,3	59,0	53,1	50,0	48,9	170	75,0
0,27	69,6	57,9	54,6	51,6	49,3	172	70,1
0,40	67,2	57,8	55,2	52,8	51,8	180	67,8
0,62	63,7	58,2	55,8	53,8	53,3	227	64,4
0,74	63,3	58,4	56,1	54,5	54,1	275	63,3
Матеріал – полістирол ПСМ							
0,11	92,2	76,8	67,5	60,0	53,0	334	93,0
0,17	81,4	75,4	66,4	60,8	57,9	280	82,2
0,27	75,5	71,2	65,7	61,1	58,8	262	75,4
0,40	70,7	67,7	65,1	61,8	60,0	251	71,1
0,62	67,3	66,1	64,2	62,4	61,8	265	67,9
0,74	65,9	64,2	63,3	62,5	62,3	330	66,0

Таблиця 10.4

Величина тиску P_{\max} і осьової сили $P_{\text{ос max}}$ в матеріальному циліндрі термопластавтомату ДБ3328 в період вприскування розплаву пластмас при різних значеннях зазору δ між шнеком і циліндром

№ з/п	Зазор між шнеком і циліндром $\delta, 10^{-3}$ м	Тиск P_i вздовж циліндра, МПа					Максимальне осьове зусилля $P_{\text{ос}}$, кН
		Віддаль від кінця шнека, мм					
		P_1 80	P_2 160	P_3 240	P_4 320	P_5 400	
1	2	3	4	5	6	7	8
Матеріал – полістирол ПСМ							
1	0,11	129,2	95,0	75,0	68,0	64,0	150,5
2	0,17	128,8	94,1	76,2	71,4	68,0	141,1
3	0,27	128,1	93,3	78,1	71,0	70,2	143,2
4	0,40	128,0	90,0	83,0	76,2	70,1	145,5
5	0,62	127,2	94,1	87,3	77,1	75,3	141,3
6	0,74	126,4	102,0	91,2	81,3	77,4	138,7
Матеріал – поліетилен ПВТ							
7	0,11	126,0	91,0	71,0	45,0	32,0	147,1
8	0,17	126,1	90,2	72,4	45,3	33,2	149,6
9	0,27	126,0	98,6	73,1	46,0	34,0	150,8
10	0,40	124,8	101,0	75,0	52,0	35,0	155,6
11	0,62	114,0	105,0	78,0	77,1	70,2	151,2
12	0,74	110,1	105,3	81,4	85,2	96,3	148,8
Матеріал – капрон П6.6							
13	0,11	119,1	78,0	57,0	45,0	42,1	139,3
14	0,17	119,6	71,2	39,3	40,2	42,8	132,0
15	0,27	118,0	88,1	59,4	42,5	45,3	130,4
16	0,40	110,2	102,0	75,0	60,6	61,5	123,3
17	0,62	107,1	104,0	76,1	73,3	70,4	130,4
18	0,74	105,7	108,2	79,0	76,2	76,3	124,5
Матеріал – поліамід ПС68-30							
19	0,11	158,5	123,0	96,1	69,4	50,3	188,2
20	0,17	158,1	112,0	84,0	70,2	62,1	172,3
21	0,27	158,0	104,0	81,4	72,0	70,2	170,7
22	0,40	157,2	97,7	78,9	75,8	73,3	169,4
23	0,62	150,3	115,2	98,0	82,6	75,5	164,1
24	0,74	136,4	110,3	103,0	92,2	82,0	166,5

На рис. 10.10, б і 10.11, б наведені графіки залежності тиску від величини зазору δ в зоні розміщення датчика Д5, який знаходився на віддалі 400 мм від вихідного кінця шнека. З рисунків видно, що в період завантаження і в період вприскування розплаву відбувається збільшення тиску із збільшенням зазору δ . При цьому більш інтенсивна відбуваються ці зміни в період вприскування (рис. 10.11, б), що обумовлено більш інтенсивним процесом переливу розплаву через зазор δ . З рис. 10.11, б наглядно видно при якому зазорі відбувається різке наростання тиску в даній зоні в залежності від в'язкості розплаву (для П6.6 – при $\delta > 0,27$ мм, для ПВТ при $\delta = 0,4$ мм; для ПС68-30 при $\delta > 0,62$ мм).

В таблицях 10.3 і 10.4 та на рис. 10.12–10.13 наведені залежності зміни тиску P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 в різних зонах по довжині матеріального циліндра (віддаль від вихідного кінця шнека відповідно 80; 160; 240; 320 і 400 мм) від величини зазору δ між шнеком і циліндром. З наведених даних видно, що в різних зонах по довжині циліндра тиск має різне значення для різних пластмас і змінюється за різними законами як в період завантаження, так і в період вприскування розплаву.

З рис. 10.12 видно, що при переробці склопластику ПС68-30 тиски P_1 і P_2 в зонах 1 і 2 зменшуються із збільшенням зазору δ зі змінним градієнтом, який також зменшується зі збільшенням зазору. В зонах 4 і 5 тиски P_4 і P_5 , навпаки, збільшуються зі збільшенням δ . При цьому градієнти їх зміни близькі між собою за величиною і значно менші в порівнянні з значенням P_1 і P_2 в зонах 1 і 2. Інтервал зміни тисків P_1 – P_5 при зазорі $\delta = 0,1$ мм досить великий (0,42–0,90 МПа) і значно зменшується зі збільшенням зазору і для значень $\delta = 0,74$ мм знаходиться в межах 0,50–0,58 МПа.

Характер зміни тиску в різних зонах матеріального циліндра від величини зазору для полістиролу ПСМ і поліетилену ПВТ подібний до склопластику ПС68-30 (рис. 10.12). Для капрону П6.6 цей характер залежностей інший. При збільшенні значень зазору δ від 0,17 до 0,62 мм тиски P_2, P_3, P_4 і P_5 значно збільшуються, а діапазон їх зміни при $\delta = 0,62$ – $0,74$ мм суттєво зменшується. при переробці різних пластмас виникають різні крутильні моменти і осьові зусилля на шнеку, які в значній мірі залежать від коефіцієнта в'язкості розплаву та змінюються зі зміною зазору між шнеком і циліндром. Це пояснюється низькою в'язкістю і

іншими фізико-механічними та реологічними властивостями капрону Пб.6 в порівнянні з іншими досліджуваними матеріалами.

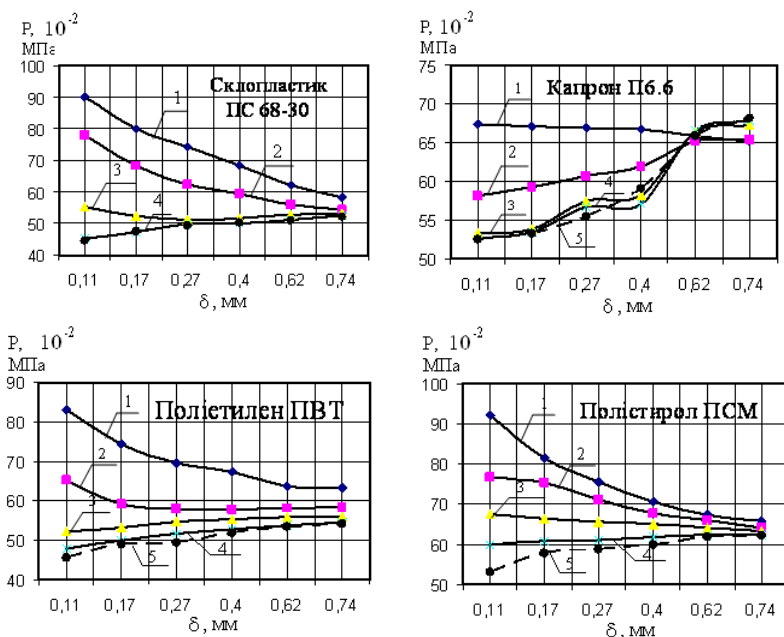


Рис. 10.12. Вплив зазору δ між шнеком і циліндром на розподіл тиску P в різних зонах матеріального циліндра в період завантаження і пластикації різних пластмас.

Віддаль зони від вихідного кінця шнека:

1 – 80 мм; 2 – 160 мм; 3 – 240 мм 4 – 320 мм; 5 – 400 мм

В період вприскування зміна тиску в залежності від величини зазору δ в різних зонах по довжині циліндра (рис. 10.13) характеризується залежностями, що значно відрізняються для різних досліджуваних матеріалів. Залежності $P = f(\delta)$ для полістиролу ПСМ характеризується незначним зменшенням величини P_1 (2,5%) при збільшенні зазору δ від 0,1 до 0,74 мм. Тиски P_3 , P_4 і P_5 у відповідних зонах 3; 4; 5 значно менші за абсолютною величиною (в 1,3–2 рази) в порівнянні з P_1 і збільшуються при збільшенні δ .

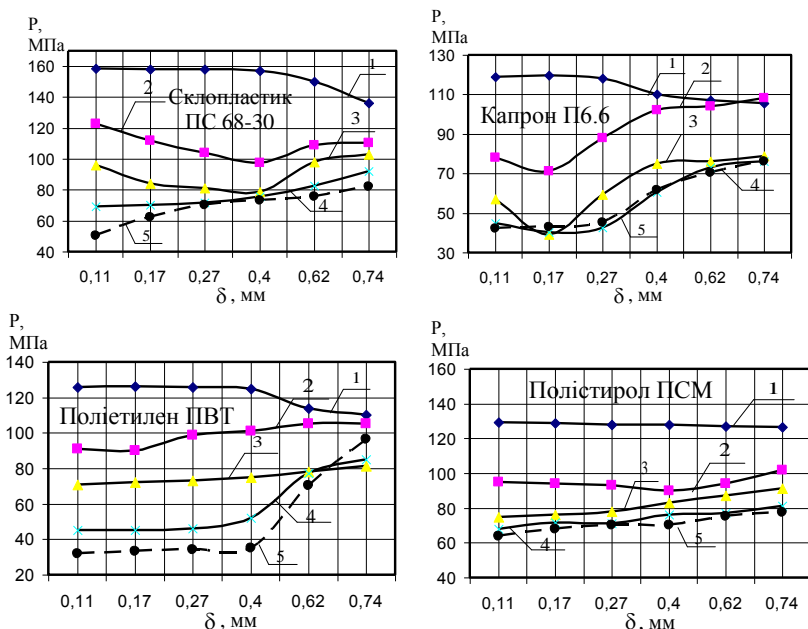


Рис. 10.13. Вплив зазору δ між шнеком і циліндром тиску в різних зонах матеріального циліндра в період вприскування розплаву пластмас. Віддаль від вихідного кінця шнека: 1 – 80 мм; 2 – 160 мм; 3 – 240 мм; 4 – 320 мм; 5 – 400 мм

Для склопластику ПС68-30, поліетилену ПВТ і капрону Пб.6, які мають меншу в'язкість розплаву в порівнянні із в'язкістю розплаву полістеролу ПСМ, особливістю залежності тиску P в різних зонах матеріального циліндра від зазору δ є те, що в період вприскування розплаву значення тисків P_1 – P_5 при певних критичних значеннях зазору δ для кожного з названих матеріалів різко змінюється, а саме: в сторону зменшення в зоні дії тиску P_1 ; в сторону збільшення в зонах дії сил P_4 і P_5 . Такими критичними значеннями зазору δ є: для капрону Пб.6 – 0,27–0,3 мм; для поліетилену ПВТ – 0,4 мм; для склопластику ПС68-30 – 0,62 мм. При цьому значення таких критичних зазорів пов'язано і в певній мірі корелюється із значеннями в'язкості розплаву даних матеріалів. При значеннях зазорів більших від критичних

відбувається зменшення тиску в зоні вприскування розплаву, що може при певних їх значеннях зменшувати працездатність машини, впливати на якість продукції.

10.3. Дослідження крутильного моменту і осевого зусилля на шнеку в період завантаження і пластикації пластмас

На рис. 10.14 наведені графіки залежності крутильного моменту $M_{кр}$ на шнеку від зазору δ між шнеком і циліндром в період завантаження і пластикації пластмас. З графіків видно, що зазор δ суттєво впливає на величину $M_{кр}$. При мінімальному значенні $\delta = 0,11$ мм для всіх досліджуваних матеріалів він має максимальне значення і знаходився в межах від 280 Н·м (для капрону 6.6) до 380 Н·м (для склопластику ПС68-30). При цьому величина $M_{кр}$ тим більша, чим більша в'язкість розплаву матеріалу.

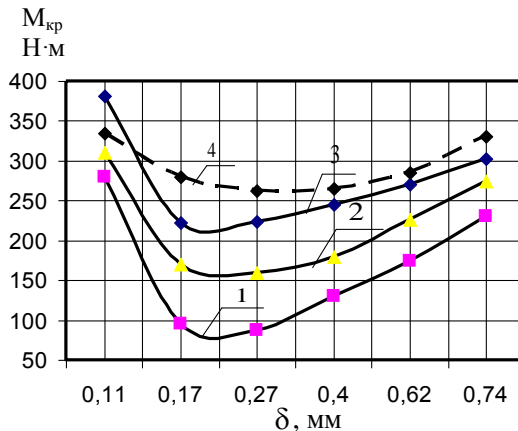


Рис. 10.14. Залежність крутильного моменту від зазору δ в період завантаження різних пластмас:

1 – капрон П6.6; 2 – поліетилен ПВТ; 3 – склопластик ПС68-30;
4 – полістирол ПСМ

Для всіх досліджуваних матеріалів в інтервалі значень зазору $\delta = 0,17-0,4$ мм спостерігається значне зменшення $M_{кр}$ в порівнянні з його значенням при $\delta = 0,11$ мм. Це пояснюється тим,

що мінімальному зазору $\delta = 0,11$ мм в матеріальному циліндрі виникають великі сили тертя в результаті контактування поверхонь шнека і циліндра в зв'язку з деформуванням шнека від повздовжнього згину при дії великого осьового зусилля (до 95 кН, табл. 10.3) та наявності відхилення від прямолінійності осі шнека при існуючій технології його виготовлення (підрозділ 10.1).

Дослідженнями встановлено, що на шнек діють великі осьові сили (до 95 кН в період завантаження і до 188 кН в період вприскування, табл. 10.3 і 10.4), які викликають поздовжні деформації шнека в результаті поздовжнього згину [176], що викликає більш інтенсивний знос поверхонь шнека і циліндра та додаткові енерговитрати в процесі роботи.

Дослідження показали, що при збільшенні зазору δ від оптимальних значень 0,17–0,4 мм величина крутильного моменту збільшується для всіх досліджуваних матеріалів. Це пояснюється збільшенням сил тертя в матеріальному циліндрі в зв'язку з попаданням гранул матеріалу в зазор між гребенем шнека і циліндром, та перерозподілом тиску по довжині циліндра зі збільшенням зазору δ .

10.4. Вплив зазору між шнеком і циліндром на продуктивність термопластавтомату та якість продукції

Крім силових, геометричних і кінематичних параметрів деталей матеріального циліндра на продуктивність екструдерів і термопластавтомату великий вплив має величина зазору між шнеком і циліндром. Під дією великого тиску, що діє в матеріальному циліндрі, відбувається перетікання розплаву пластмас через гребні витків шнека, що приводить до зниження продуктивності машини, зміни тиску і при певних їх значеннях зниження якості продукції.

Втрати продуктивності в залежності від величини зазору δ між шнеком і циліндром можна вирахувати за формулою [31]:

$$Q = \frac{\pi^2 D N h \sin \phi \cos \phi}{2} - \frac{\pi D h^2 \sin^2 \phi \cdot P}{12 \mu L} - \frac{\pi^2 D^2 \delta^3 \operatorname{tg} \phi \cdot P}{12 \mu e L}, \quad (10.1)$$

де Q – продуктивність;
 D – зовнішній діаметр шнека;
 N – число обертів в хвилину;
 e – ширина гребня нарізки в напрямку осі шнека;
 h – глибина нарізки;
 δ – зазор між шнеком і циліндром;
 P – тиск в кінці шнека;
 L – довжина зони дозування;
 μ – в'язкість розплаву.

В таблиці 10.5 наведені розрахунки продуктивності термопластавтомату ДБ3328 та її втрати від перетікання розплаву різних матеріалів при різних зазорах між шнеком і циліндром, які обчислені за формулою (10.1) для наступних вихідних даних: $D = 38$ мм; $N = 60$ хв⁻¹, $\varphi = 17^\circ$; $e = 4$ мм; $L = 8$ см; $P = 100$ МПа; $h = 3,25$ мм. З табл. 10.5 видно, що для різних матеріалів втрата від перетікання розплаву різна і тим більша, чим менша в'язкість розплаву і більший зазор між шнеком і циліндром. Для всіх досліджуваних матеріалів при зазорі $\delta = 0,25$ мм втрати продуктивності в матеріальному циліндрі від перетікання розплаву при тиску 100 МПа не перевищують 4 %, тоді як ці втрати при зазорі 0,5 мм значно зростають і для капрону Пб.6 складають 21,53 %.

Такі результати співпадають з результатами досліджень інших авторів [45] при дослідженні зношування черв'ячних пресів, в яких збільшення зазору між шнеком і циліндром від 0,055 до 0,27 мм при переробці поліетилену високого тиску марки 102–14 на екструдері 4Г63-25 продуктивність зменшилась на 20 %, а питомі витрати електроенергії збільшилась на 50 %.

Величина зазору між шнеком і циліндром термопластавтоматів теж має великий вплив на їх експлуатаційні характеристики, а саме: тиск в різних зонах по довжині циліндра; величина крутильного моменту; час в період завантаження та пластикації; продуктивність термопластавтомата тощо.

Слід відзначити, що термопластавтомат на відміну від екструдерів є машиною циклічною дії, з автоматичною системою управління вузлів завантаження і пластикації матеріалу, змикання і розмикання пресформи, вприскування розплаву в пресформу та її охолодження.

Таблиця 10.5

Розрахунки продуктивності термопластавтомату ДБ3328 та її витрати від перетікання розплаву різних матеріалів при різних зазорах між шнеком і циліндром

Матеріал	В'язкість матеріалу, $\kappa\Gamma \cdot c/cm^2$	Зазор δ , мм	Продуктивність термопласт-автомату Π , $cm^3/xв$	Втрати продуктивності	
				ВТ, $cm^3/xв$	ВТ/П, %
Поліетилен високого тиску	0,025	0,1	389,0	4,6	1,09
		0,15	383,40	5,59	1,43
		0,25	369,1	9,0	2,54
		0,5	340,0	49,0	12,59
		0,75	234,5	154,5	39,71
Капрон П6.6	0,015	0,1	385,0	7,46	1,94
		0,15	375,5	9,58	2,46
		0,25	371,1	13,9	3,64
		0,5	302,1	82,0	21,53
		0,75	122,3	262,7	68,23
Полістирол ПСМ	0,05	0,1	390,0	2,18	0,56
		0,15	387,2	2,8	0,71
		0,25	385,0	5,0	1,23
		0,5	365,6	24,4	6,26
		0,75	312,7	77,3	21,51
Склопластик ПС68-30	0,04	0,1	398,5	2,75	0,7
		0,15	395,0	3,5	0,9
		0,25	392,0	6,3	1,58
		0,5	368,0	30,5	7,65
		0,75	302,0	96,5	34,21

Продуктивність термопластавтомата можна визначити за залежністю:

$$\Pi = \frac{3600 \cdot (T - T_{nd})}{t_{\text{ц}}} N \text{ вироб/змiну,} \quad (10.2)$$

де T – протяжність зміни в год.;

T_{nd} – час на підготовку термопластавтомата до роботи в год.;

N – кількість виробів в прес-формі;

$t_{\text{ц}}$ – протяжність циклу, сек.;

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_3 + t_{\text{нр}} + t_{\text{ен}} + t_{\text{ох}} + t_n;$$

де t_p – час розмикання пресформи, с.;

t_3 – час змикання пресформи, с.;

$t_{\text{нр}}$ – час перехідного руху пресформи, с.;

$t_{\text{ен}}$ – час вприскування розплаву, с.;

$t_{\text{ох}}$ – час витримки під тиском і охолодження пресформи, с.;

t_n – час паузи між циклом, с.

Протяжність циклу складається з часу змикання напівформ, часу їх спільного руху, часу заповнення пресформи розплавом, часу витримки під тиском і охолодження пресформи, часу розмикання пресформи та паузи між циклами.

Мінімальна пауза між циклами $t_{n_{\text{min}}}$ приймається 1–2 секунд. В цьому випадку виникає мінімальна протяжність циклу $t_{\text{ц}_{\text{min}}}$. Якщо в процесі роботи термопластавтомата час завантаження і пластикації матеріалу буде більшим від мінімальної протяжності циклу ($t_{\text{зв}} > t_{\text{ц}_{\text{min}}}$), як наслідок від збільшення зазору δ між шнеком і циліндром, то в цьому випадку буде збільшуватися час паузи t_n , що викличе і зменшення продуктивності термопластавтомата. У випадку, коли протяжність завантаження і пластикації порції матеріалу менша від протяжності циклу при мінімальній паузі ($t_{\text{зв}} \leq t_{\text{ц}_{\text{min}}}$), величина зазору δ між шнеком і циліндром не впливає на продуктивність термопластавтомата. Проте в усіх випадках величина зазору δ впливає на енергозатрати на одиницю продукції, зміну тиску в матеріальному циліндрі та якість виробів.

В таблиці 10.6 наведені результати досліджень експлуатаційних параметрів термопластавтомату ДБ3328 в залежності від величини зазору при переробці різних пластмас. З таблиці 10.6 видно, що зі збільшенням зазору δ , збільшується час завантаження і пластикації $t_{\text{зв}}$ матеріалів та кількість обертів шнека n в даний період. Характер зміни $t_{\text{зв}}$ для різних матеріалів різний (рис. 10.15). Найбільший час завантаження спостерігається при переробці капрону Пб.6 і найменший час $t_{\text{зв}}$ – при пробці полістиролу ПСМ. Матеріали, що мають меншу в'язкість розплаву і більшу схильність до перетікання через гребні шнека, при

збільшенні зазору вимагають більшого часу на завантаження при наборі необхідного об'єму порції матеріалу для вприскування. І, навпаки, матеріали з більшою в'язкістю розплаву мають менший час завантаження t_{36} при наборі порції матеріалу.

З рис. 10.15 і таблиці 10.6 видно, що для всіх досліджуваних матеріалів при зазорах 0,17–0,27 мм існує мінімальне значення t_{36} , яке в подальшому збільшується зі збільшенням δ . При цих зазорах діє мінімальний крутильний момент $M_{кр}$ (табл. 10.6), який теж збільшується при подальшому збільшенні зазору. Це обумовлено тим, що в результаті викривлення осі шнека при існуючій технології виготовлення шнеків і під дією осевого зусилля шнек деформується та поверхня шнека контактує з поверхнею циліндра. При зазорі $\delta = 0,11$ мм виникають великі сили тертя між поверхнями шнека і циліндра, що зумовлює зменшення кутової швидкості шнека, підвищення часу завантаження порції матеріалу та збільшення енерговитрат в період завантаження в результаті збільшення крутильного моменту.

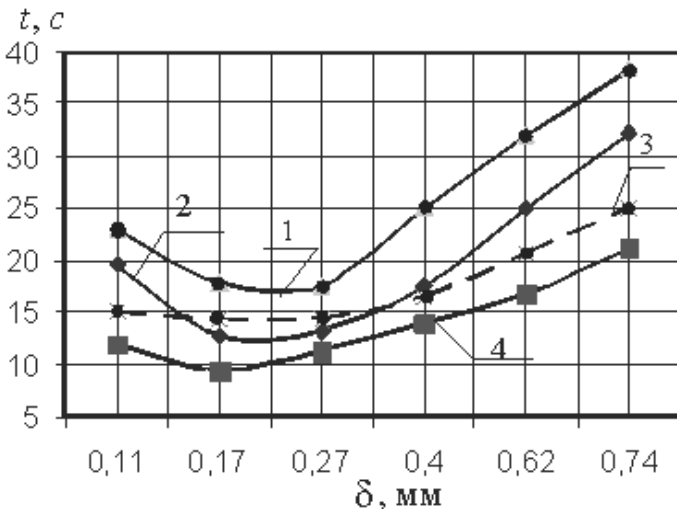


Рис. 10.15. Залежність часу завантаження і пластикації t_{36} від зазору δ між шнеком і циліндром при переробці різних пластмас: 1 – капрон П6.6; 2 – поліетилен ПВТ, 3 – склопластик ПС68-30; 4 – полістирол ПСМ

Таблиця 10.6

Експлуатаційні параметри процесу переробки різних пластмас при різних зазорах δ між шнеком і циліндром термопластавтомата ДБ3328 в період завантаження і пластикації матеріалу

Зазор δ , мм	Параметри технологічного процесу										
	$t_{зв}$, с	n , об	ω , об/с	$M_{кр}$, Н·м	$P_{ос}$, кН	$t_{зв}$, с	n , об	ω , об/с	$M_{кр}$, Н·м	$P_{ос}$, кН	
	Поліетилен ПВТ					Капрон П6.6					
0,11	19,5	32,7	1,68	310	84,2	23,0	37,8	1,65	250	68,7	
0,17	12,7	23,2	1,83	170	75,0	17,8	31,8	1,79	96	68,1	
0,27	13,1	24,3	1,85	172	70,1	17,6	31,7	1,80	98	67,9	
0,40	17,6	32,0	1,82	180	67,8	25,1	45,9	1,83	135	67,5	
0,62	25,0	45,7	1,83	227	64,4	32,0	58,2	1,82	174	66,8	
0,74	32,2	58,9	1,83	275	63,3	38,4	70,6	1,84	230	68,9	
	Полістирол ПСМ					Склопластик ПС68-30					
0,11	12,0	20,5	1,7	334	93,0	15,0	26,6	1,74	381	95,0	
0,17	9,4	17,0	1,82	280	82,2	14,4	26,3	1,82	222	80,2	
0,27	11,3	20,7	1,83	262	75,4	15,3	28,0	1,83	224	76,0	
0,40	14,9	27,0	1,81	251	71,1	16,5	29,8	1,81	255	72,2	
0,62	16,8	30,7	1,83	265	67,9	22,6	41,1	1,82	271	62,3	
0,74	21,1	38,4	1,82	330	66,0	25,0	45,7	1,83	302	60,1	

Позначення:

$t_{зв}$ – середній час завантаження і пластикації матеріалу в матеріальному циліндрі;

n – середня кількість обертів шнека під час завантаження;

ω – середня кутова швидкість при завантаженні;

$M_{кр}$ – крутильний момент;

$P_{ос}$ – осьове зусилля на шнеку при завантаженні.

При значеннях зазору δ більших від 0,3 мм відбувається збільшення часу $t_{зв}$ в результаті перетікання розплаву через гребні шнека і тим більше, чим менша його в'язкість (рис 10.15). В умовах проведення експериментів на термопластавтоматі ДБ3328 при оптимальних зазорах $\delta = 0,2-0,3$ мм протяжність циклу склала 20–25 с. Розрахунки [32, табл. 6] показують, що для термопластавтоматів з об'ємом вприскування 63 см³ час

охолодження виробу складає 27,5 с. Тому згідно даних рис. 10.15 зменшення продуктивності термопластавтомату ДБ3328 в процесі переробки різних пластмас буде виникати при наступних значеннях зазору δ : для капрону П6.6 $\delta > 0,3$ мм; для поліетилену $\delta > 0,4$ полістиролу $\delta > 0,74$ мм, для склопластику $\delta > 0,62$ мм. Тому з метою запобігання зменшення продуктивності термопластавтомата рекомендується при переробці пластмас враховувати степiнь зносу шнека, що впливає на величину зазору δ між шнеком і циліндром, і спочатку при невеликому зазорі δ необхідно переробляти матеріали з меншим коефіцієнтом в'язкості розплаву, а матеріали з більшим коефіцієнтом в'язкості переробляти при більших допустимих зазорах. Наприклад, серед досліджуваних нами матеріалів слід переробляти в першу чергу капрон П6.6 при зазорах $\delta < 0,3$ мм, в другу чергу поліетилен ПВТ при зазорах $\delta < 0,4$ мм, в третю чергу склопластик ПС68-30 при зазорах $\delta < 0,62$ мм і на завершення полістирол ПСМ.

Разом з цим, при переробці пластмас слід враховувати вплив зазору на якість продукції. Проведене нами візуальне дослідження якості виробів в процесі проведення експериментів показали, що в деяких матеріалів (капрон П6.6, поліетилен ПВТ) вже при зазорі між шнеком і циліндром 0,5 мм якість виробу знижується (появляються в виробах непластифіковані зерна, дефекти поверхні тощо), що є недопустимим.

РОЗДІЛ 11

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗНОШУВАННЯ ШНЕКІВ ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТІВ ТА ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ ПІСЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ЗА РІЗНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

11.1. Дослідження форми і величини зносу шнеків термопластавтомату

На рис. 11.1 наведені результати вимірювань зміни форми і мікротвердості поверхні шнека по його довжині при виготовленні за існуючою на ВАТ “Термопластавтомат” технологією, яка включала операції механічної обробки, азотування в печах в середовищі аміаку і шліфування з наступним поліруванням поверхні.

З результатів вимірювань видно, що шнек в процесі хіміко-термічної обробки отримує значні деформації. Це обумовлено тим, що в процесі азотування при проходженні через піч потоку аміаку виникає різна температура по довжині шнека, яка приводить до зміни фізико-механічних характеристик азотованого шару (твердості і товщини) і, як наслідок, до різних деформацій при охолодженні. Після хіміко-термічної обробки шнек шліфують, в результаті чого нерівномірно знімається азотований шар з поверхні. На окремих витках величина знятого шару досягає 0,4–0,5 мм, тобто, повністю знімається азотований шар. В результаті такої обробки твердість витків шнека з різних сторін має різне значення, що в процесі експлуатації приводить до підвищених деформацій та зниження його зносостійкості і, в окремих випадках, до заклинювання шнека.

Як альтернативу існуючій технології зміцнення поверхні шнеків газовим азотуванням в печах в середовищі аміаку нами проведені дослідження зміни форми і деформації вісі шнеків із сталі 38ХМЮА після азотування в плазмі тліючого розряду в безводневих середовищах.

Технологія включала: підвішування шнеків з вертикальним розміщенням вісі шнеків; іонну очистку поверхні від окисних плівок методом іонного бомбардування в плазмі тліючого розряду в середовищі аргону при напрузі 1500 В на протязі 20 хв; дифузійне насичення поверхні азотом в тліючому розряді при температурі

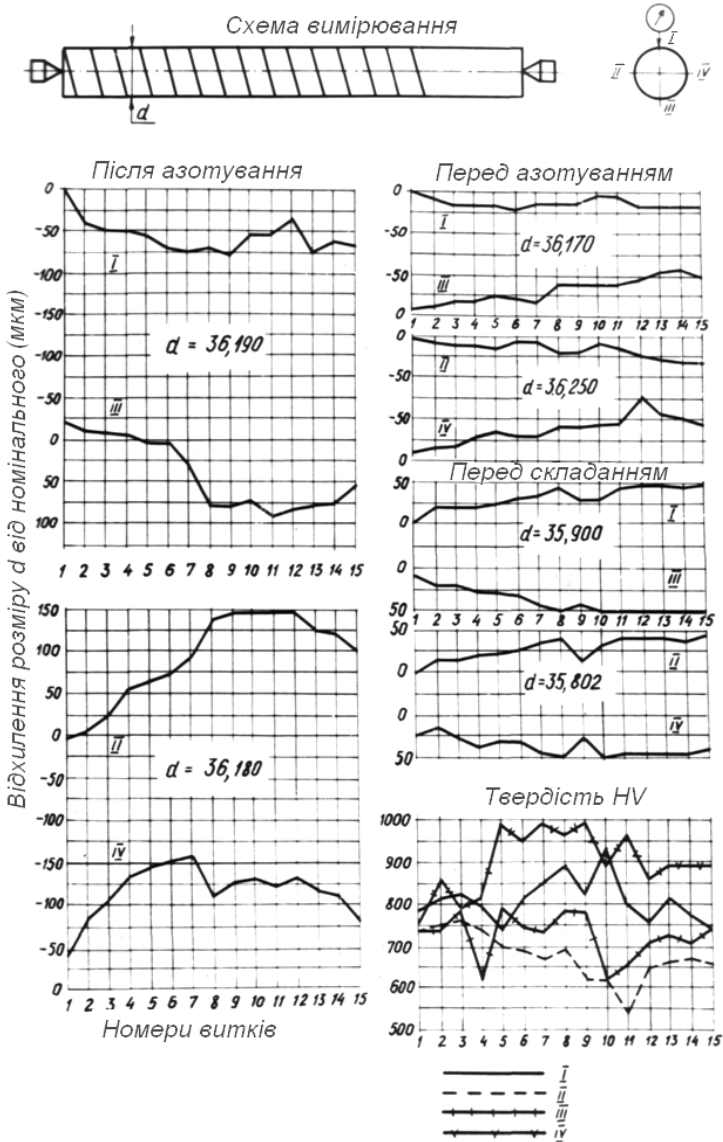


Рис. 11.1. Відхилення діаметра шнека від номінального розміру по довжині

560 °С в середовищі 75 об. %N₂+25 об. %Ar при тиску 250 Па на протязі 8 годин; остигання в вакуумі до температури 25 °С. Після зміцнення проводився контроль твердості поверхні, товщини азотованого шару і деформації вісі шнека в порівнянні з їх значенням до зміцнення.

Дослідженнями встановлено, що мікротвердість поверхні після азотування складала 9850 МПа і була рівномірною по всій поверхні, товщина азотованого шару досягала 420 мкм. Відхилень форми витків не виявлено, а деформація осі шнека не перевищувала 4 мкм, що знаходиться в границях допуску. Шорсткість поверхні залишилася такою ж, як і до азотування. Це свідчить про те, що після азотування в тліючому розряді практично відсутні деформації вісі шнека, немає погіршення класу чистоти поверхні і відпадає необхідність в шліфувальній операції поверхні після її зміцнення.

Нами проводилися дослідження величини і характеру зношування шнеків діючих термопластавтоматів після їх зняття з експлуатації в результаті зношування. Шнеки виготовлялися за існуючою технологією із застосуванням традиційного пічного газового азотування в середовищі аміаку. Вимірювання зносу проводились з допомогою спеціального пристрою на гребнях витків в центрах у двох взаємоперпендикулярних площинах з точністю до 1 мкм. Результати вимірювань зносу виступів витків шнека термопластавтомата ДБЗЗ-28 після 4 млн. циклів роботи при переробці полістиролу ПСМ наведені в таблиці 11.1 і рис. 11.2. З рис. 11.2 видно, що на кривій зношування по довжині шнека, яка побудована на основі даних середніх значень зносу таблиці 11.1, можна виділити три характерні зони:

– перша зона мінімального зносу на довжині 160 см, що розміщена під загрузочним бункером, в цій зоні матеріал не плавиться і шнек працює в умовах мінімального тиску і мінімальної температури;

– друга зона характеризується інтенсивним зростанням зносу, в цій зоні значно зростає тиск, відбувається екструзія матеріалу і початок плавлення та різке зростання температури;

– третя зона характеризується менш інтенсивним зростанням зносу, в цій зоні високий тиск і температура, матеріал розплавлений, гомогенізований з мінімальною в'язкістю і з високою хімічною активністю по відношенню до металевої поверхні шнеку.

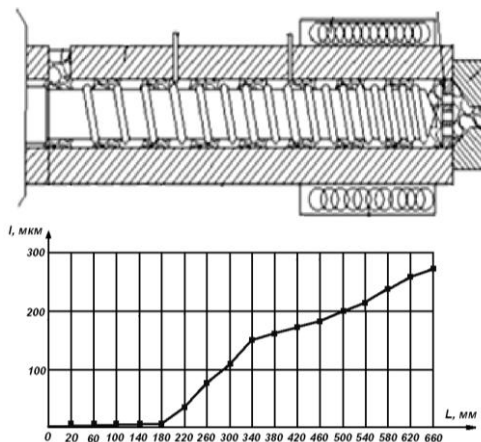


Рис. 11.2. Крива зношування шнеку по довжині

Таблиця 11.1

Величина зносу витків шнека термопластавтомату ДБЗЗ-28 після 4 млн. циклів роботи при переробці полістиролу ПСМ

№ витка	Середня відстань від хвостовика, см	Знос в чотирьох точках у двох взаємно перпендикулярних площинах, мкм				Середнє значення зносу, мкм
		0°	180°	90°	270°	
1	20	0	+1	-1	0	0
2	60	2	+1	0	+3	1,5
3	100	3	2	1	2	2,0
4	140	5	3	2	4	3,5
5	180	6	4	3	5	4,5
6	220	25	60	15	20	30
7	260	40	110	21	45	54
8	300	90	120	35	95	85
9	340	130	150	70	180	132
10	380	140	170	100	200	152
11	420	150	190	115	210	169
12	460	170	200	120	205	174
13	500	200	215	170	200	194
14	540	225	225	200	210	215
15	580	260	250	220	220	232
16	620	260	270	270	250	252
17	660	270	280	280	270	275

В залежності від типу перероблюваного матеріалу переважає той чи інший вид зношування шнека. Наприклад, при переробці наповнених пластмас з абразивними частинами, (склопластику ПС68-30) переважаючим є абразивне зношування, а при переробці ненаповнених пластмас (капрону, поліетилену, полістиролу, тощо) переважаючим є корозійно-механічне зношування.

На рис. 11.3 наведено поверхні зношування витків шнека: *a* – при переробці склопластика ПС-68-30; *б* – корозійно-механічне зношування при переробці полістиролу ПСМ. В процесі абразивного зношування на поверхні витків видно риси від дії абразиву. При корозійно-механічному зношуванні видно ямки (основний знос) в результаті дії агресивного середовища.

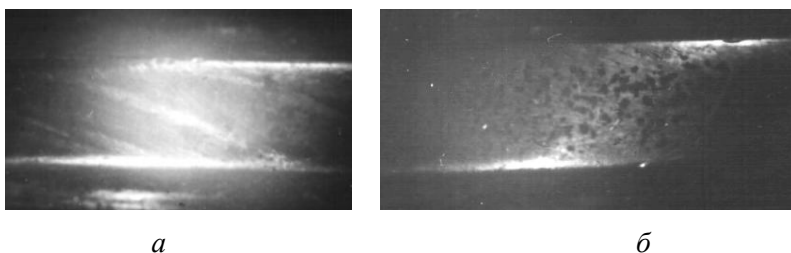


Рис. 11.3. Поверхні зношування витків шнека:
a – при переробці склопластика ПС-68-30; *б* – при переробці полістиролу ПСМ

Таким чином, на основі проведених досліджень встановлено, що існуюча технологія виготовлення шнеків термопластавтоматів з застосуванням пічного газового азотування не забезпечує високу зносостійкість і працездатність термопластавтоматів. Альтернативою даній технології є технологія зміцнення поверхні шнеків азотуванням в плазмі тліючого розряду, що не виключає деформації вісі шнеку, забезпечує вихідну шорсткість поверхні, рівномірну твердість по довжині шнека, виключаючи необхідність в шліфувальній операції поверхні після зміцнення.

11.2. Порівняльні дослідження зносостійкості зразків, зміцнених за різними технологіями

В таблиці 11.2, і на рис. 11.4–11.5 наведені результати випробувань різних сталей з різними видами хіміко-термічної обробки в середовищі розплаву ПС68-30. З таблиці 11.2 видно, що після проходження шляху тертя $4.08 \cdot 10^5$ м (4 млн обертів робочого валу) найменший знос мали зразки зі сталі 38ХМЮА після іонного азотування в тліочому розряді за режимом: температура 520 °С, середовище 75 %N₂ + 25 %Ar, тиск $P = 320$ Па і час азотування $\tau = 8$ год. Величина зносу і інтенсивності зношування зразків за даним режимом в 1,6–3,5 рази менша в порівнянні за зразками, що зміцнювались за іншими видами хіміко-термічної обробки (газовому азотуванню в печах в середовищі аміаку, цементації, сульфидуванню і боруванню). Зразки зі сталі 45, що зміцнювались методом борування, після 3 млн. обертів ($3,05 \cdot 10^5$ м шляху тертя) мали найменшу величину інтенсивності зношування ($I = 0,07 \cdot 10^{-9}$ м, табл. 11.2). Проте, при подальших випробуваннях їх знос різко збільшився (рис. 11.4) в зв'язку з розтріскуванням і вилущуванням борованого шару. Кінетика інтенсивності зношування в середовищі розплаву ПС68-30 наведена на рис. 11.5. Збільшення інтенсивності зношування зразків, що зміцнювались методами хіміко-термічної обробки (криві 2–6), зі збільшенням шляху тертя пояснюється зменшенням твердості по товщині дифузійних покриттів.

Таблиця 11.2

Інтенсивність зношування зразків в середовищі розплаву ПС68-30, зміцнених за різними технологіями

Матеріал	Вид термічної і хіміко-термічної обробки	Мікро твердість поверхні, МПа	Інтенсивність зносу $I \cdot 10^{-9}$ після шляху тертя, $L \cdot 10^5$ м			
			1,16	2,32	3,5	4,6
Сталь 45	Гартування	4520	0,54	0,56	0,55	0,56
Сталь 45	Борування	13000	0,05	0,06	0,07	Руйн.
Сталь 20	Цементація	6500	0,35	0,38	0,43	0,56
Сталь 45Х	Сульфидування	4200	0,47	0,54	0,61	0,71
38ХМЮА	Азотування пічне в NH ₃	9720	0,23	0,26	0,46	0,65
38ХМЮА	Іонне азотування режим 2	9150	0,25	0,3	0,38	0,46

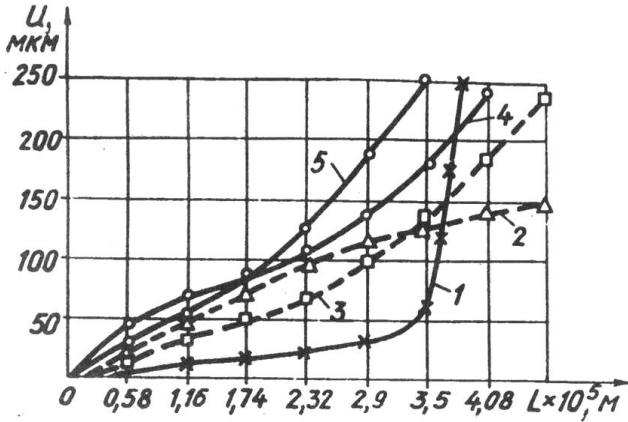


Рис. 11.4. Знос зразків, зміцнених за різними технологіями хіміко-термічної обробки, в середовищі розплаву ПС-68:
 1 – сталь 45 борована; 2 – сталь 38ХМЮА після іонного азотування за режимом 3 (табл.2); 3 – сталь 38ХМЮА після традиційного газового азотування; 4 - сталь 20 цементована; 5 – сталь 45Х після сульфідуювання

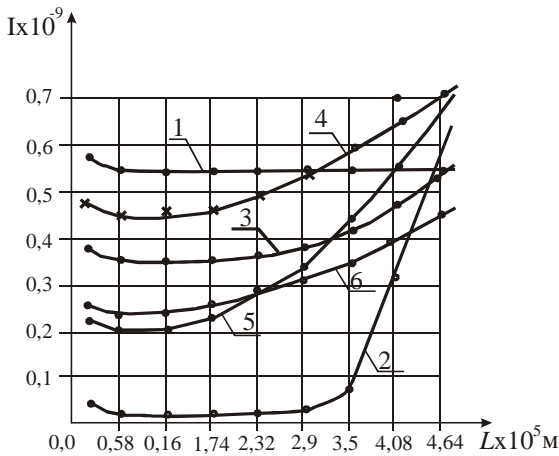


Рис. 11.5. Інтенсивність зносу в розплаві ПС-68 різних сталей після зміцнення поверхні:
 1 – сталь 45 (гартування); 2 – сталь 45 (борування); 3 – сталь 20 (цементация); 4 – сталь 45 (сульфідуювання); 5 – 38ХМЮА (пічне азотування); 6 – сталь 38ХМЮА(азотування в тліючому розряді)

Відомо, що в абразивних середовищах існує кореляційний зв'язок між зносом і твердістю поверхонь тертя, тому інтенсивність зношування зменшується при підвищенні твердості. В нашому випадку середовище є не тільки абразивним, але і хімічно активним в результаті деструкції поліаміду та утворення корозійно-активних компонентів середовища. Тому для забезпечення високої зносостійкості поверхні тертя в даному середовищі крім великої твердості вона повинна мати досить високу корозійну стійкість і бездефектну структуру. Борований шар мав велику кількість мікротріщин, що і стало однією із головних причин його низької корозійної стійкості та інтенсивного руйнування після проходження шляху тертя $3,5 \cdot 10^5$ м.

Аналіз зношування зразків зі сталі 38ХМЮА після традиційного газового азотування і іонного азотування в тліючому розряді за різними технологічними режимами показав, що іонне азотування за досліджуваним технологічним режимом забезпечував значно більшу зносостійкість після проходження зразками шляху тертя $4,08 \cdot 10^5$ м (табл. 11.2, рис. 11.4). Це пояснюється такими причинами, що при газовому пічному азотуванні в середовищі аміаку азотований шар мав значно більший градієнт зменшення твердості по глибині азотованого шару ніж при іонному азотуванні. Розміщена на поверхні ϵ -фаза великої твердості забезпечує в початковий період зношування високу зносостійкість, а після її стирання інтенсивність зносу різко збільшується (рис. 11.5).

При іонному азотуванні градієнт зменшення твердості по глибині значно менший в порівнянні з пічним газовим азотуванням (рис. 11.10). На поверхні крім ϵ -фази є велика кількість γ' -фази і нітридний шар має більшу товщину, що і зумовлює його більшу зносостійкість на протязі більшого шляху тертя. Нітридний шар при іонному азотуванні характеризується більшою пластичністю і меншою дефектністю в порівнянні з нітридним шаром при пічному газовому азотуванні, котрий має велику крихкість, неоднорідність і значну кількість мікротріщин. Дефектність азотованого шару при традиційному газовому азотуванні сприяє зростанню ролі корозійної складової в процесі зношування і зниженню зносостійкості поверхні.

Таким чином, порівняльні дослідження зносостійкості зразків, що зміцнювалися за різними технологіями, показали перспективність застосування технології азотування в тліючому розряді (іонне азотування) для підвищення зносостійкості

конструктивних елементів в сереловищі розплаву склонаповненого поліаміду ПС69-30.

Проведені дослідження показали, що в парі тертя інтенсивність зношування внутрішніх кілець, що обертаються, вища в порівнянні з зовнішніми нерухомими зразками при однакових фізико-механічних характеристиках їх поверхонь. Це пояснюється більш інтенсивним протіканням електрохімічних і корозійних процесів при русі зразків в хімічно активному середовищі.

11.3. Дослідження властивостей сталі 38ХМЮА після азотування в тліючому розряді

Модифікація поверхні сталі 38ХМЮА проводилася в тліючому розряді в середовищі суміші азоту з аргоном. Властивості азотованого шару керувалися чотирма технологічними параметрами: температурою дифузійного насичення, тиском в вакуумній камері, складом насичуючого середовища і часом азотування.

Теоретичні і експериментальні дослідження [159] показали, що всі вказані вище технологічні параметри процесу азотування мають вплив на властивості азотованого шару. Тому нами досліджувався вплив кожного із технологічних факторів при азотуванні в тліючому розряді на твердість, товщину, фазовий склад і градієнт зміни властивостей по товщині азотованого шару.

Змінюючи технологічні параметри процесу азотування, можна змінювати властивості азотованого шару в широких межах, одержуючи на поверхні нітридну зону різного фазового складу, різної товщини або азотовані шари без нітридної зони (рис. 11.6).

На рис. 10.7 наведені залежності товщини і твердості азотованого шару на сталі 38ХМЮА при різних температурах дифузійного насичення і постійних значеннях двох інших технологічних факторів. З рис. 11.7, *а* видно, що товщина азотованого шару збільшується із збільшенням часу азотування по параболічній залежності і тим більше, чим вища температура дифузійного насичення. Твердість азотованого шару при азотуванні в тліючому розряді дуже швидко зростає (рис. 11.7, *б*) перші 5–10 хвилин і досягає максимальних значень для певного значення температури.

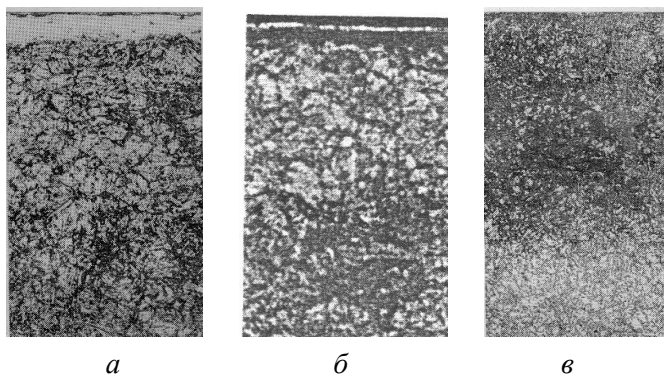


Рис. 11.6. Мікроструктура сталі 38ХМЮА після азотованого в тліючому розряді в безводневих середовищах. *а, б* – з нітридною зоною різною товщини, *в* – без нітридної зони

При збільшенні часу азотування твердість поверхневого шару практично мало змінюється при тисках в вакуумній камері 240 Па і більше. При тисках в вакуумній камері менших від 240 Па твердість поверхневого шару поступово зменшується із збільшенням часу азотування. Це обумовлено тим, що в процесі дифузійного насичення поверхні азотом діють два конкуруючих процеси – адсорбція і розпилення іонним бомбардуванням. Із зменшенням тиску процеси розпилення починають переважати процеси адсорбції і тим більше, чим менший тиск в вакуумній камері.

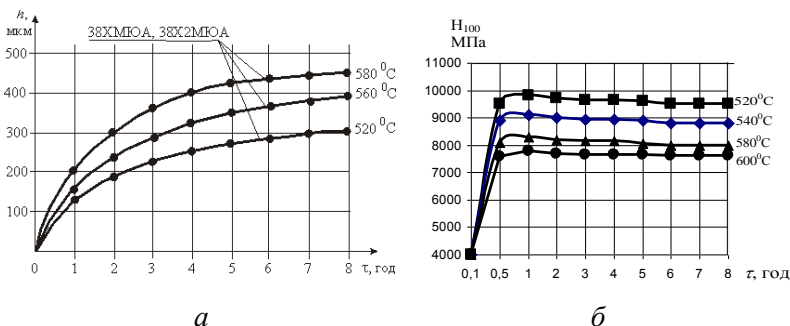


Рис. 11.7. Залежність товщини азотованого шару (*а*) і твердості поверхні (*б*) сталі 38ХМЮА після покращення від часу азотування при різних температурах дифузійного насичення в середовищі 75%N₂+25%Ar і тиску в вакуумній камері 240 Па

На рис. 11.8 наведені залежності властивостей поверхневих шарів сталі 38ХМЮА від процентного вмісту аргону в насичуючому середовищі в суміші з азотом при різних температурах азотування, часі дифузійного насичення 8 год і тиску в вакуумній камері 240 Па. З рис. 11.8, *а* видно, що існує оптимальне значення процентного вмісту аргону в насичуючому середовищі в суміші з азотом (25 об.% Ar), при якому досягається найбільша товщина азотованого шару і максимальне значення при температурі 620 °С. Мікротвердість азотованого шару зменшується зі збільшенням процентного вмісту аргону в суміші з азотом при всіх температурах азотування.

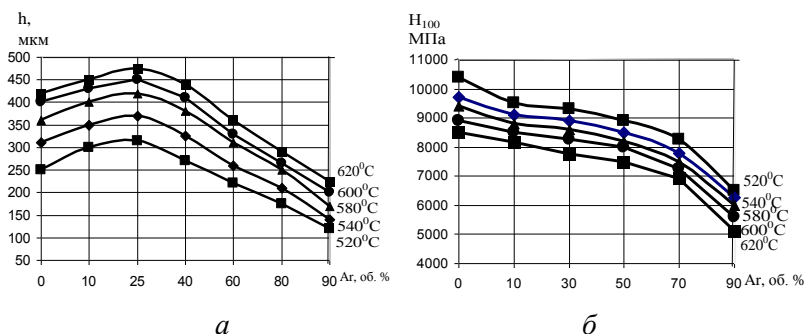


Рис. 11.8. Залежність товщини азотованого шару (*а*), твердості поверхні (*б*) сталі 38ХМЮА від вмісту аргону в насичуючому азотно-аргонному середовищі при різних температурах дифузійного насичення на протязі 8 год і тиску в вакуумній камері 240 Па

Дослідження впливу тиску в вакуумній камері і температури дифузійного насичення при постійних значеннях часу дифузійного насичення і об'ємного вмісту аргону в суміші з азотом проводилися з використанням математичного планування експериментів (двох факторного ротатбельного плану другого порядку, плану Бокса [177], розділ 9). Час азотування і об'ємний вміст аргону в насичуючому середовищі вибиралися з умови забезпечення максимальної товщини і високої твердості азотованого шару (рис. 11.7 і 11.8) і приймалися відповідно 8 год і 25% Ar.

Результати експериментальних досліджень властивостей азотованих шарів сталі 38ХМЮА після азотування за різними режимами відповідно до плану Бокса наведені в табл. 11.3.

Таблиця 11.3

Робоча матриця та результати експериментальних досліджень властивостей поверхневого шару сталі 38ХМЮА після азотування в тліючому розряді в безводневих середовищах

Номер режиму азотування	Робоча матриця		Мікро-твердість Н ₁₀₀ , МПа	Товщина азотованого шару		Гradient твердості по товщині МПа/мкм
	T, °C	P, Па		Нітридної зони h _N , мкм	Дифузійної зони h _д , мкм	
1	600	320	8940	3,0	400	21,9
2	520	320	9350	6,0	240	32,2
3	600	160	8600	6,2	360	20,0
4	520	160	9520	7,0	230	31,7
5	500	240	9800	10,0	180	38,1
6	620	240	8030	1,0	410	17,9
7	560	125	9100	4,0	290	25,3
8	560	355	9200	5,0	360	26,3
9	560	240	9300	6,0	350	25,8
10	560	240	9350	5,5	365	28,3
11	560	240	9310	4,5	360	28,2
12	560	240	9290	5,0	355	28,1
13	560	240	9300	3,5	350	28,4

На основі результатів експериментальних досліджень відповідно, до двох факторного рототабельного плану, отримані емпіричні математичні залежності товщини азотованого шару (11.1) і твердості поверхні (11.2) сталі 38ХМЮА від температури і тиску, при постійних значеннях інших параметрів азотування ($\tau = 8$ год, і вмісту аргону 25 %Ar). На основі цих математичних залежностей наведені графіки (рис. 11.9) зміни вказаних вище параметрів.

$$h = 356,1 + 76,9x_1 + 18,6x_2 + 7,5x_1x_2 - 31,4(x_1)^2 - 16,4(x_2)^2 \quad (11.1)$$

$$H_{100} = 9310,2 - 479,1x_1 + 38,9x_2 + 127,5x_1x_2 - 188,0(x_1)^2 - 70,5(x_2)^2 \quad (11.2)$$

З рис. 11.9, *а* видно, що товщина азотованого шару зростає зі збільшенням температури азотування і зменшенням тиску у вакуумній камері. Це обумовлено зростанням енергії іонів азоту при такому характері зміни даних технологічних параметрів. Проте твердість поверхневого шару, навпаки, зменшується при збільшенні температури і зменшенні тиску в вакуумній камері (рис. 11.9, *б*). Тому, виходячи з умов одержання максимальних експлуатаційних характеристик, слід вибирати оптимальне співвідношення цих величин (твердості і товщини азотованого шару). Для умов забезпечення максимальної зносостійкості в корозійно-активному і абразивному середовищі необхідна висока твердість поверхні з ϵ -фазою і велика товщина азотованого шару, яка досягається оптимальним режимом азотування: $T = 540$ °С, $P = 240$ Па, $\tau = 8$ год, вміст аргону в суміші з азотом 25%).

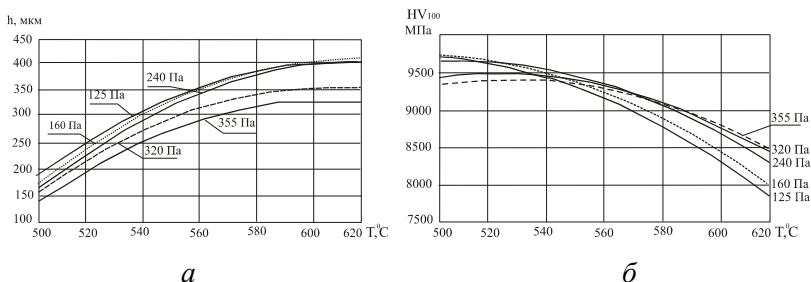


Рис. 11.9. Залежність товщини азотованого шару (*а*) і твердості поверхні (*б*) від температури дифузійного насичення при різних тисках в вакуумній камері

Технологічні параметри азотування мають великий вплив на фазовий склад поверхневого шару і розподіл твердості по його товщині. На рис. 11.10 наведені графіки зміни твердості по товщині азотованого шару при різних режимах азотування. З рис. 11.10 і таблиці 11.3 видно, що змінюючи режими азотування можна змінювати градієнт твердості по товщині в значних межах. Це має великий вплив на експлуатаційні характеристики конструкційних елементів.

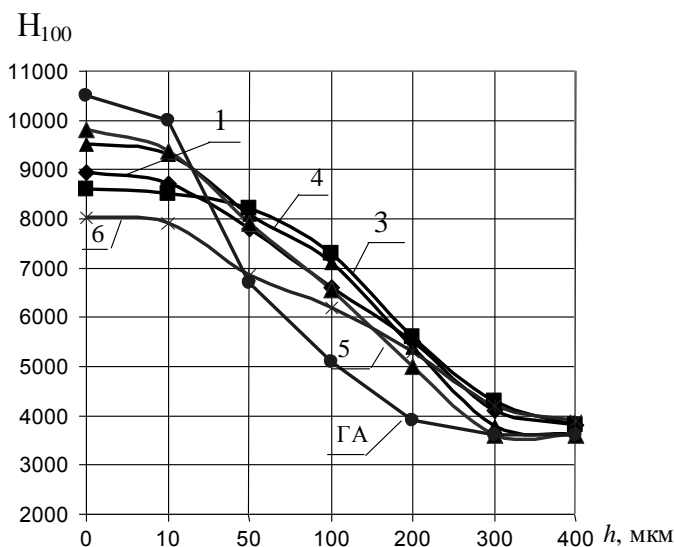


Рис. 11.10. Розподіл твердості по товщині азотованого шару в залежності від режимів азотування (табл. 11.3):
ГА – газове азотування в середовищі аміаку при температурі 540 °С на протязі 45 годин

При різних режимах азотування на поверхні утворюються різні фази: ϵ , γ' та $\alpha_{(\text{FeN})}$. Їх співвідношення впливає на твердість і корозійну стійкість поверхневого шару. Наявність твердої ϵ -фази (Me_{2-3}N) сприяє підвищенню корозійної стійкості поверхні. Дослідження [149] показують, що при азотуванні в тліючому розряді в безводневих середовищах на поверхні можуть бути всі три фази в різному співвідношенні. Вміст ϵ -фази збільшується зі збільшенням температури і підвищенням тиску в вакуумній камері.

Таким чином, проведені дослідження властивостей азотованого шару при азотуванні в тліючому розряді в безводневих середовищах сталі 38ХМЮА показали, що їх можна змінювати в широких межах з допомогою технологічних параметрів процесу азотування і оптимізувати за певним експлуатаційним критерієм.

11.4. Оптимізація властивостей поверхні сталі 38ХМЮА при азотуванні в тліючому розряді за критерієм максимальної зносостійкості

З метою оптимізації властивостей поверхневого шару сталі 38ХМЮА при азотуванні в тліючому розряді в безводневому насичуючому середовищі за критерієм максимальної зносостійкості в середовищі розплаву склонаповненого поліаміду ПС68-30 було використано двох факторний ротатбельний план другого порядку (план Бокса). Результати досліджень наведені в таблиці 11.4.

Таблиця 11.4

Робоча матриця плану експериментів та результати експериментальних досліджень зносостійкості сталі 38ХМЮА в середовищі розплаву склонаповненого поліаміду ПС68-30

Номер режиму азотування	Робоча матриця		Мікротвердість H_{100} , МПа	Товщина азотованого шару		Знос U , мкм після шляху тертя $4,6 \cdot 10^5$ м	Інтенсивність ношування $I \cdot 10^{-9}$ після шляху тертя $4,6 \cdot 10^5$ м	Знос U , мкм нітридної зони після шляху тертя $0,1 \cdot 10^5$ м
	T , °С	P , Па		Нітридної зони h_N , мкм	Дифузійної зони h_D , мкм			
1	600	320	8940	3,0	410	193,2	0,42	12,2
2	520	320	9350	6,0	290	156,4	0,34	11,5
3	600	160	8600	6,2	430	230,0	0,50	13,4
4	520	160	9520	7,0	300	147,2	0,32	11,0
5	500	240	9800	10,0	260	184,0	0,46	9,0
6	620	240	8030	1,0	450	197,8	0,45	15,0
7	560	125	9100	4,0	360	174,8	0,38	12,0
8	560	355	9200	5,0	350	170,2	0,37	11,3
9	560	240	9300	6,0	360	165,6	0,36	11,5
10	560	240	9350	5,5	365	164,5	0,37	11,1
11	560	240	9310	4,5	360	165,0	0,36	11,0
12	560	240	9290	5,0	355	166,0	0,35	11,2
13	560	240	9300	3,5	350	164,8	0,37	11,0

На основі математичної обробки результатів експериментів (табл. 11.4) одержана залежність інтенсивності зношування від

температури і тиску процесу азотування після $4,6 \cdot 10^5$ м шляху тертя, при часі дифузійного насичення 8 год. в середовищі 75 % $N_2 + 25$ % Ar , яка описується рівнянням:

$$I_H = 0,3461 + 0,0307x_1 - 0,0093x_2 - 0,025x_1x_2 + 0,0491(x_1)^2 + 0,0091(x_2)^2 \quad (11.3)$$

На рис. 11.11 наведені графіки залежності інтенсивності зношування сталі 38ХМЮА від температури азотування при різних тисках в насичуючих середовищах, які одержані на основі рівняння (11.3). Використовуючи наведені графіки, знайдені оптимальні значення температури ($T = 545$ °С) і тиску ($P = 240$ Па) при яких досягається мінімальна інтенсивність зношування.

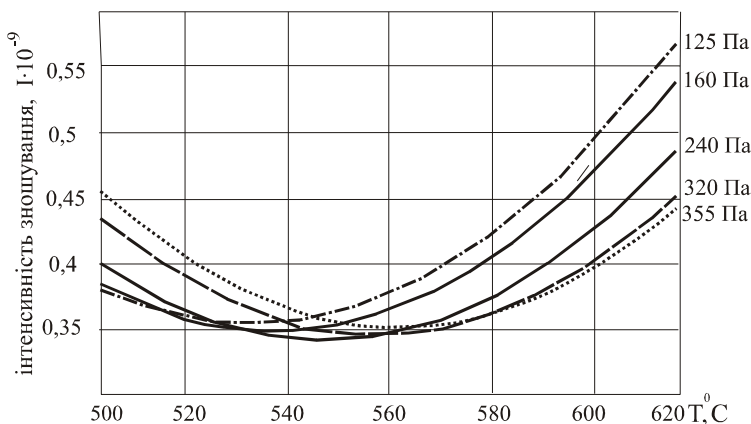


Рис. 11.11. Залежність інтенсивності зношування сталі 38ХМЮА від температури дифузійного насичення при різних значеннях тиску в вакуумній камері

Кінетика зношування зразків азотованих за різними режимами залежно від шляху тертя наведена в таблиці 11.5 і на рис. 11.12.

З таблиці 11.5 і рис. 11.12 видно, що величина зносу та інтенсивності зношування змінюються в широкому діапазоні залежно від режиму азотування і зростають зі збільшенням шляху тертя. На величину зношування впливають не лише твердість поверхні азотованого шару, але його товщина та градієнт твердості по глибині.

Таблиця 11.5

Характеристики зношування сталі 38 ХМЮА після азотування за різними режимами

Номер режиму	Мікротвердість H_{100} , МПа	Товщина дифузійної зони $h_{дб}$, мкм	Знос U , мкм при $L \cdot 10^5$, м				Інтенсивність зносу $I \cdot 10^{-9}$ при $L \cdot 10^5$, м				Градієнт твердості по товщині, МПа/мкм
			1,2	2,3	3,5	4,6	1,2	2,3	3,5	4,6	
1	8940	410	44,6	85,8	133,7	193,2	0,35	0,37	0,382	0,42	21,9
2	9350	290	30,2	65,4	108,5	156,4	0,26	0,28	0,310	0,34	32,2
3	8600	430	42,9	88,0	157,5	230,0	0,37	0,41	0,450	0,50	20,0
4	9520	300	25,3	55,1	95,2	147,2	0,22	0,24	0,270	0,32	31,7
5	9800	260	29,0	62,6	122,8	184,0	0,25	0,31	0,351	0,46	38,1
6	8030	450	35,7	71,9	126,8	197,8	0,31	0,36	0,392	0,45	17,9
7	9100	360	39,4	83,5	127,7	174,8	0,34	0,35	0,365	0,38	25,3
8	9200	350	38,3	81,2	126,0	170,2	0,33	0,34	0,360	0,37	26,3
9	9300	360	37,1	78,9	119,0	165,6	0,32	0,33	0,340	0,36	25,8
Оптимальний режим азотування											
-	9500	320	24,4	53,4	91,0	142,6	0,21	0,23	0,26	0,31	28,3

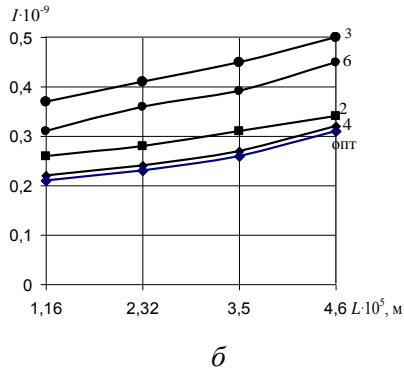
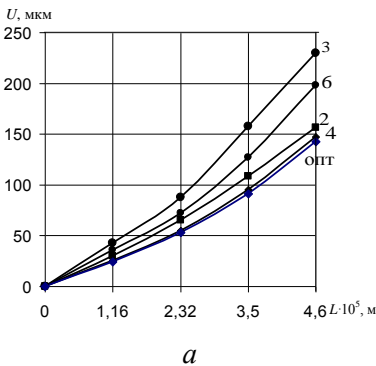


Рис. 11.12. Залежність зносу (а) та інтенсивності зношування (б) від шляху тертя при різних режимах азотування (табл. 11.3): опт. — оптимальний режим азотування

Проведені дослідження показали, що в парі тертя інтенсивність зношування внутрішніх кілець, що обертаються, вища в порівнянні з зовнішніми нерухомими зразками при однакових фізико-механічних характеристиках їх поверхонь. Це пояснюється більш інтенсивним протіканням електрохімічних і корозійних процесів при русі зразків в хімічно активному середовищі.

Дослідженнями [104, 121] встановлено, що в абразивному середовищі інтенсивність зношування обернено пропорційна твердості поверхні. Дана закономірність підтверджується характером зношування нітридної зони азотованого шару (рис. 11.13), твердість якої залежить від її фазового складу і співвідношення фаз.

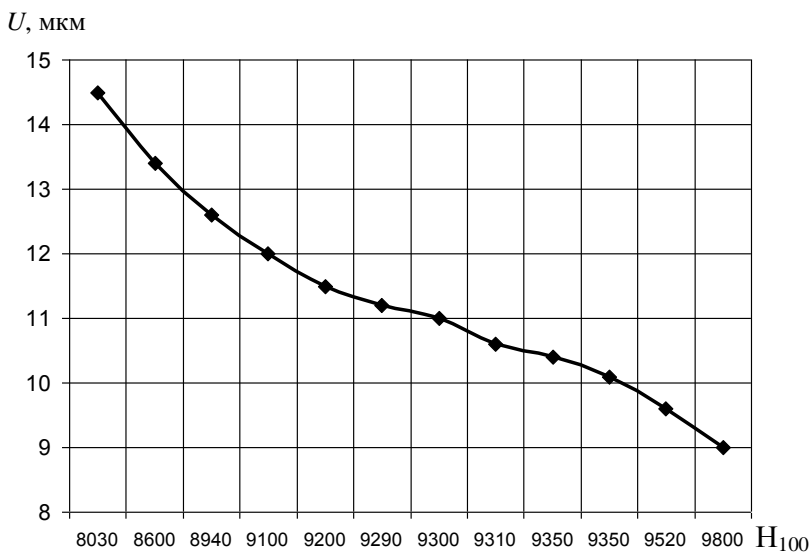


Рис. 11.13. Залежність зносу нітридної зони від твердості поверхневого шару

Для дифузійної зони ця закономірність порушується в зв'язку зі зміною градієнта її твердості по товщині. Максимальна зносостійкість азотованого шару в цілому досягається при високій твердості поверхневого шару і меншому градієнті зміни твердості по товщині. Тому, після шляху тертя 4,6·10⁵ м (табл. 11.5)

мінімальну інтенсивність зношування має азотований шар з твердістю поверхні 9 480 МПа (оптимальний режим азотування) і меншим градієнтом твердості (28,3 МПа/мкм), в той час як азотований шар з максимальною твердістю поверхні 9 800 МПа (режим №5, табл. 11.5) і значно більшим (1,4 рази) градієнтом твердості по товщині (38,1 МПа/мкм) має більшу інтенсивність зношування.

Таким чином, на основі проведених досліджень встановлено, що інтенсивність зношування азотованих шарів залежить від твердості, товщини та градієнта зміни властивостей по товщині азотованого шару. Для умов зношування сталі 38ХМЮА в середовищі розплаву склонаповненої пластмаси ПС68-30 існує оптимальний режим азотування (температура 545 °С, тиск в вакуумній камері 240 Па, тривалість азотування 8 годин, середовище дифузійного насичення 75 об.% N₂+25 об.%Ar), який забезпечує мінімальну інтенсивність зношування її поверхні.

Висновки до частини II

1. Розроблена методика розрахунку зносостійкості і довговічності азотованих шарів з стабільною структурою без метастабільних фаз при абразивному зношуванні, яка може бути використана при розрахунках зносостійкості градієнтних покриттів з стабільною структурою одержаними за іншими технологіями.

2. Показано, що існуюча традиційна технологія пічного газового азотування шнеків в середовищі аміаку приводить до значних деформацій осі шнеків і в процесі подальшого їх шліфування знімається азотований шар в місцях прогину, що викликає зниження зносостійкості шнеків. Запропонована альтернативна технологія азотування шнеків в плазмі тліючого розряду в безводневих насичуючих середовищах, яка не викликає деформацій осі шнеків, забезпечує їх високу зносостійкість та економічність процесу виготовлення.

3. Експериментальними дослідженнями встановлено нерівномірний розподіл тиску по довжині матеріального циліндру як в період завантаження і пластикації пластмас, так і в період вприскування розплаву в пресформу. При цьому величина тиску і характер його розподілу по довжині циліндра різний для різних

пластмас і залежить від їх реологічних властивостей і зазору між шнеком і циліндром.

4. Встановлено вплив зазору між шнеком і циліндром на величину крутильного моменту і часу набору порції матеріалу в період завантаження для різних пластмас. Показано, що для різних пластмас в залежності від в'язкості їх розплаву існують критичні значення зазорів, при збільшенні яких збільшуються енергозатрати, зменшується якість продукції та продуктивність термопластавтоматів. В зв'язку з цим рекомендуються максимальні допустимі значення зазорів між шнеком і циліндром при переробці різних пластмас: 0,3 мм для капрону П6.6 та склонаповненого поліаміду ПС68-30; 0,4 мм для поліетилену ПВТ та полістеролу ПСМ.

5. На основі порівняльних експериментальних досліджень зносостійкості зміцнених за різними технологіями пар тертя в середовищі розплаву склонаповненого поліаміду ПС68-30 показано, що для умов роботи пари "шнек-циліндр" термопластавтоматів найбільш перспективною технологією зміцнення поверхні шнеків є азотування в плазмі тліючого розряду в безводневих насичуючих середовищах, яка забезпечує мінімальні (в межах допуску) викривлення осі шнека та велику зносостійкість його поверхні в корозійно-абразивному середовищі.

6. Визначено оптимальний технологічний режим іонного азотування зразків із сталі 38ХМЮА (температура 520 °С, тиск 265 Па, насичуюче середовище 75 об.%N₂ + 25об.%Ar, час дифузійного насичення 8 год.), що забезпечує максимальну їх зносостійкість в середовищі розплаву склонаповненого поліаміду ПС68-30 і і перевищує в 1,8 рази існуючу технологію традиційного пічного газового азотування в аміаку.

Література

1. Калинчев Э.Л. Свойства и переработка термопластов / Э.Л. Калинчев, Б.М. Соковцева – М.: Химия, 1983. – 287 с.
2. Пахаренко В.А. Переработка полимерных композиционных материалов / В.А. Пахаренко, Р.А. Яковлева, А.В. Пахаренко// - Воля, - Киев, 2006. – 550 с.
3. Наполнители для полимерных композиционных материалов. Справочное пособие / Под. Ред Г. Каца и Д.В. Милевски – М. Химки, 1981. – 436 с.
4. Баранова А.В. Порошкообразные и волокнистые наполнители пластмасс, применяемых за рубежом // Химическая промышленность за рубежом. – 1977 - №12. – С. 21-41.
5. Композиционные полимерные материалы. К.: Наукова думка, - 1976. – 192 с.
6. Никулина Е.П. Производство и потребление важнейших добавок для пластмасс в США // Химическая промышленность за рубежом. – 1978 - №4. – С. 3-39.
7. Пронников А.С. Надежность машин / А.С. Пронников. – М.: Машиностроение. – 1978. – 592 с.
8. Елизаветин М.А. Повышение надежности машин / М.А. Елизаветин. – М.: Машиностроение. – 1973. - 430 с.
9. Переработка пластмасс / Шварц О., Эбелинг Ф.-В., Фурт Б. / под. общ. Ред. А.Д. Паниматченко. – СПб.: Профессия. – 2005. – 320 с.
10. Литье пластмасс под давление / Т.А. Освальд, Л-Ш. Тунг, П.Дж. Грэмман; под общ. Э.Л. Калинчева – СПб.: Профессия, 2006. – 712 с.
11. Гуль В.Е. Основы переработки пластмасс / В.Е. Гуль, М.С. Акутин – М.: Химия. – 1985. – 400 с.
12. Соколов Б.А. Машины для автоматизированного производства деталей из реактопластов / Д.А. Соколов, Б.А. Петров, В.А. Татаркин и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
13. Калинчев Э.Л. Оборудование для литья под давлением / Э.Л. Калинчев, Е.И. Калинчева, М.В. Соковцева. – М.: Машиностроение, 1985. – 265 с.

14. Завгородний В.К. Оборудование предприятий по переработке пластмасс / В.К. Завгородний, Э.Л. Калинин, Е.Г. Махаринский. – Изд. “Химия”, Л., - 1972 – 464 с.
15. Рябинин Д.Д. Червячные машины для переработки пластмасс и резиновых изделий / Д.Д. Рябинин, Ю.Е. Лукач. – М.: Машиностроение – 1965. – 363 с.
16. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластам / М. – Госиздат, - 1962, - 468 с.
17. Оборудование для переработки пластмасс: Справочное пособие / Под ред. В.К. Завгороднего. – М.: Машиностроение, 1976. – 416 с.
18. Силин В.А. Динамика процессов переработки пластмасс в червячных машинах / В.А. Силин. – М.: Машиностроение, 1972. – 150 с.
19. Стамбурский Е.А. Износ оборудования при переработке пластмасс / Е.А. Стамбурский, А.И. Бейль, В.П. Карливан и др. – М.: Химия, 1985. – 208 с.
20. Техника переработки пластмасс / Под ред. Н.И. Басова, В. Броя. – М.: Химия, 1985. – 528 с.
21. Герман Х. Шнековые машины в технологии / Х. Герман. – М.: Химия, 1977. – 250 с.
22. Швецов Г.А. Технология переработки пластических масс / Г.А. Швецов, Д.У. Алимова, М.Д. Барышникова. – М.: Химия, 1988. – 512 с.
23. Холмс-Уолкер В.А. Переработка полимерных материалов / Пер. с англ., под ред. М.Л. Фридмана. – М.: Химия, 1979. – 309 с.
24. Гладченко А.Н. реология износостойкости металлических трибосистем / А.Н. Гладченко, И.В. Шевеля // Хмельницкий, ТУП “Универ” - 2001. – 183 с.
25. Бартеньев Г.М. Трение и износ полимеров / Г.М. Бартеньев, В.В. Лаврентьев. - Л.: Химия, 1972. – 240 с.
26. Гурвич С.Г. Машины для переработки термопластических материалов / С.Г. Гурвич, Г.А. Ильященко, С.Х. Свириденко. - М.М.: Машиностроение, 1966. – 365 с.

27. Гуль В.Е. – В кн. Оборудование для переработки пластмас. Справочное пособие по расчету и конструированию. – М., Машиностроение, 1976. – 407 с.
28. Гурвич, С.Г. Расчет и конструирование машин для переработки пластических материалов / С.Г. Гурвич, Г.А. Ильяшенко, Ш.Е. Мочман. – М., Машиностроение, 1970. – 295 с.
29. Бернхарт Э. Переработка термических материалов. Пер. с англ. / М., “Химия”, 1965. - 748 с.
30. Вопросы экструзии термопластов /Под ред. А. Н. Левина. М: Иноиз- дат, 1963. - 334 с.
31. Каплун, Я.Б. Формующее оборудование экструдеров / Я.Б. Каплун, В.С. Ким. – М., 1969. – 159 с.
32. Завгородний, В.К. Литьевые машины для термопластов и реактопластов / В.К. Завгородний, Э.Л. Калинин, Е.И. Марам. – М., 1968. – 374 с.
33. Rauwendaal C., International polymer Processing VII (1992), 1, 26-31.
34. Leonard L., Plastics Machinery and Equipment (1990), October, 43-44.
35. Rauwendaal, C., Ed., Mixing in Polymer Processing, Marcel Dekker (1991). New York.
36. Rauwendaal, C., Plastics World, (1990) November. 45-49.
37. Schwittay, D. Spritzgiessschnecken fur die Thiermoplastverarbeitung. Company Lilerature Bayer A.G. (1978).
38. Rauwendaal, C., Polymer Extrusion, 4th ed. Hanser Publishers (2001). Munich.
39. Peischl. G. C., Bruker, I. Polym. Eng. Sri. (1989), 29, 202.
40. Fraser, K., Coyle, D. J., Bruker, I. “Evaluation of an Injection Molding Mixing Screw” SPE ANTRC (1989). Dallas. TX. 214-219.
41. Rauwendaal, C Plastics World (1991). 43-47.
42. Spalding, M., Dooley. J. Hyun. K. S., "The Effect of Flight Radii Size on the Performance of Single Screw Extruders" SPE-ANTEC (1999).
43. Rauwendaal, C., Polym. Eng. Sri. (1986), 6.1245.
44. Miller, B., Plastics World (1982). March, 34-38.

45. Зверлин В.Г. Исследование предельно допустимого износа рабочих органов червячных прессов / Химическое и нефтяное машиностроение. – 1982. - №9. – с. 20-22.
46. Rauwendaal, C., Gramann, P.J., "Non-Return Valve with Distributive and Dispersive .Mixing Capability" SPE-ANTEC, Orlando. FL. (2000).
47. Darnell. Mol, SPEJ. (1956). 12, 20.
48. Rauwendaal, C., Intern. Polym. Processing. VII (1992). 1, 26.
49. Maddock, B, H., SPE J. (1967). July. 23-29.
50. Rauwendaal, C., Adv. Polym. Tech. (1996), 15. (2), 135.
51. Tadmor, Z., Cogos, C., Principles of Polymer Processing, John Wiley and Sons (1979), New York, p. 279.
52. Tadmor, Z., Polym. Eng. Sci. (1966). 6. 185.
53. Mohr, W.D. Saxton, RL., Jepson, C., C. H, Ind. Eng. Chem (1957), 49, 1855.
54. Erwin, L., Polym. Eng. & Sci. (1978), 18, 572.
55. Erwin, L., In: Mixing in Polymer Processing. Rauwendaal, C., (Ed.) Marcel Dekker (1991). New York.
56. Meijer. H. E., Janssen, J. M. H., "Mixing of Immiscible Liquids" In: Mixing and Compounding of Polymers Manas-Zloczower, I., Tadmor. Z. (Eds.) Hanser (1994), Munich, p. 136.
57. Tadmor, Z., Klein, L., Engineering Principles of Ptasticating Extrusion. Van Nostrand Reinhold Company (1970). New York.
58. Oswald, T.A., Menges, G., Materials Science of Polymers for Engineers. Hanser (1995). New York.
59. Grace, H.P., Cham. Eng Commntm. (1982), 14, 225.
60. Jenssen, J.M.H., Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology. (1993). The Netherlands.
61. Datta, S., Lohse, D.J., Polymeric Compatibilizers, Hanser (1996). Munich.
62. Rauwendaal, G., Understanding Extrusion. Hanser (1998). Munich.
63. Gramann, P.J., Ph. D. Thesis, University of Wisconsin-Madison (1995), Madison, WI.
64. Saxton, R. L., U.S. Patent 3,006,029.
65. LeRoy, G., US. Patent 3,486,192.

66. Rauwendaal, C.J., Gramann, P.J., Davis, B.A., Osswald, T.A., U.S. Patent 6,136,246.

67. Rauwendaal, C.J., U.S. Patent 5,932,159.

68. BEMflow, Fluid Dynamics Simulation Program, The Madison Group: Polymer Processing Research Corporation.

69. Rauwendaal, C., Gramann, P.J., Backmixing in Screw Extruders, SPE ANTEC, Orlando, FI, (2000).

70. Пахаренко В.А. Наполненные термопласты. Справочник / В.А. Пахаренко, В.Г. Зверлин, Е.М. Кириенко. Киев: Техника, 1986. – 162 с.

71. Торнер Р.В. Оборудование заводов по переработке пластмасс / Р.В. Торнер, М.С. Акутин. - М.: Химия, 1986. – 400 с.

72. Моделирование и оптимизация экструзии полимеров / Скачков В.В., Торнер Р.В., Стунгур Ю.В., Реутов С.В. – Л.: Химия, 1984. – 152 с.

73. Тадмор З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогас. – М.: Химия, 1984. – 632 с.

74. Калинин Э.Л. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий / Э.Л. Калинин, М.Б. Соковцева. – Л.: Химия, 1987. – 416 с.

75. Фридман М.Л. Технология переработки кристаллических полиолефинов. – М.: Химия, 1977. – 400 с.

76. Зверлин В.Г. Проблемы повышения эксплуатационной стойкости червяков и цилиндров экструзионного оборудования / В.Г. Зверлин, А.Н. Гладченко, В.В. Сазонов // Сер. ХМ – 2. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1980. – 45 с.

77. Износ шнеков при пластикации наполненного полиэтилена / Селиванова А.А., Будкина Г.М., Теплова П.Т., Сидорова Л.М. // Пластические массы. – 1975. - №8. – С. 38-39.

78. Мэддок В.Г. Влияние износа шнека на производительность экструдера // Вопросы экструзии термопластов. – М.: Изд-во Иностран. лит., 1983. – С. 102-106.

79. Inrich Klein. Predicting the effect of screw wear on the performance of plasticating extruders // Polymer Engineering and Science. – 1975. – V. 15. - №6. – P. 444-450.

80. Roggenbach H., Vogel H., Verschleissprobleme bei der Versrbeitung von glasfaserverstarken Thermoplasten auf

Spritzgiessmaschinen // Plastverarbeiter. – 1972. – Bd.23. - №9. – S. 599-606.

81. Tadotoshi Sone. Wearing of injection molding mashinen by FRT and improvement / Sone Tadotshi, Tora Akiyama // Japan Plastics Age. – 1973. – V.11. - №6. – p. 43-46.

82. Барабанова А.В. Порошкообразные и волокнистые наполнители пластмасс, применяемых за рубежом // Химическая промышленность за рубежом. – 1997. - №12. – С.

83. Menning G. Verschleiss – Prufmetoden in der Kunststoffverarbeitung / G. Menning, P. Vols // Kunststoffe – 1980. – Bd.70. - №7. – S. 617 – 623.

84. Зверлин В.Г. Обеспечение износостойкости экструдерного оборудования при переработке высоконаполненных полимеров / В.Г. Зверлин, А.Н. Гладченко, В.В. Сазонов // Обзорная информ. Сер. Хм – 2. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1987. – 42 с.

85. Гороховський Г.А. Поверхностное диспергирование динамически контактирующих полимеров и металлов. – Киев: Наукова думка, 1972. – 238 с.

86. Meridies R. Plastverarbeiter / R. Meridies, F.Bassner // 1970. – Bd. 21. - №7. – S. 617-623.

87. Kunststoffe – 1977. – Bd. 67. - №2. – S. 81-88.

88. Volz P. Kunststoffe – 1977. – Bd. 67. - №5. – S. 2791-283.

89. Reinhard H., Hartung P. Verschleiss bei Verarbeitung von Kunststoffen // Kunststoffe – 1986. – Bd. 76. - №4. – S. 369-374.

90. Каплун В.Г. Дослідження працездатності і надійності термопластавтомата ДБ 33-28 при переробці пластмасс / В.Г. Каплун, П.В. Матвійшин, В.А. Гончар // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. - №4. – С. 87-94.

91. Гладченко А.Н. Износостойкость оборудования для переработки полимерных материалов / А.Н. Гладченко, В.Г. Зверлин, С.Д. Петренко, И.В. Шевеля. – М.: Машиностроение, 1992. – 256 с.

92. Burger F. Schnecken – und Zulindeverschleiss an Krauss – Maffei Doppelsckenextrudern // Krauss – Maffei Austria News. – 1978. - №1. – S. 11, 12.

93. Боровикова С.М. Одностадийный метод изготовления изделий из стеклонаполненных термопластов // Пластические массы. – 1977. - №11. – С. 22-24.
94. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах – К.: Техника, 1970. – 396 с.
95. Крагельный В.И. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
96. Поверхностная прочность металлов при трении / Под общ. Редакции Б.И. Костецкого. – Киев: Техника, 1976, - 292 с.
97. Крагельский В.И. Основы расчетов на трение и износ / В.И. Крагельский, М.А. Добычин, В.С, Камбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
98. Гинсбург Л.С. Релаксация напряжений в металлах. – М.: Машиностроение, 1957. – 192 с.
99. Каплун В.Г. Експериментальні дослідження властивостей процесу зношування матеріалів зі структурою метастабільного аустеніту при терті кочення / В.Г. Каплун, К.А, Паршенко // Вісник технологічного університету Поділля. – 2004. - №5. – С. 9-13.
100. Шевеля В.В. Микротекучесть и деформационное упрочнение металлов при циклическом нагружении / В.В. Шевеля, А.Н. Гладченко, Л.И. Нефедова // Физико-химическая механика материалов. – 1979. - №3. – С. 69-74.ю
101. Шевеля В.В. О природе пиков стойкости инструмента при обработке металлов резанием / В.В. Шевеля, А.Н. Гладченко, И.В. Шевеля, В.А. Венедиктов // Трение и износ. – 1990. - №1. –С. 136 -142.
102. Рыбакова Л.М. Триботехнические характеристики сопряжения вал-вкладыш и релаксационная способность материалов / Л.М. Рыбакова, С.А. Полякова, А.И. Осин // Вестник Машиностроения. – 1986. - №9. – С. 26-29.
103. Volz P. Verschleiss in der Kunststofftechnologien // Kunststoffe. – 1979. – Bd. 69. - №11. – S. 758 – 771.
104. Хрущев М.М. Абразивное изнашивание / М.М. Хрущев, М.А. Бабичев. – М.: Наука. – 1970. – 252 с.

105. Добровольський А.Г. Абразивная износостойкость материалов. Справочное пособие / А.Г. Добровольський, П.И. Кошеленко. – К.: Техника. 1989. – 128 с.

106. Mahler W.D. Einfluss von Glaskorpergrosse und Gestalt auf den Verschleiss beim Verarbeiten von verstärkten Thermoplasten // Kunststoffe. – 1977. – Bd. 67. - №4. – S. 224-226.

107. Стамбурський Е.А. Исследование влияния состава композиционных полимерных материалов на износ рабочих органов экструзионного оборудования: Актореф. Дис. Канд. Тех.наук / Рига, 1979. – 19 с.

108. Knappe W. Modellversuche zum Verschleiss in Kunststoffverarbeitungsmaschinen // Kunststoff Rundschau. – 1972. - №2, 3. – S. 45-51.

109. Kunstoffer, 1977. – 67. - №2. – S. 81-88.

110. Dominighaus Hans. Verleissprobleme bei der Verarbeitung gefuller und Verstärkter // Formmassen, Kunststoffe, Rundschau. – 1971. – Bd. 18. - №8. – S. 383 – 389.

111. Warth R.A. Factor saffecting the wear of extruder screws / R.A. Warth, R.A. Lai Fook // Kunstsoffen. – 1978. – V. 3. - №2. – P. 68-72.

112. Lucins W. Verschleissprobleme beim Spritzdiessen von verstärkter Thermoplasten // Kunstsoffen. – 1973. – Bd. 63. - №7. – S. 433 – 435.

113. I. Strain rate effects in low speed two-body abrasion / I. Larsen-Basse, P.A. Tanouye // Wear of Materials. – 1977, Int. Conf. on Wear of Materials^ St. Louis. – Mo. – 1977.

114. Natham G.X. The empirical relations wear abrasive wear und the applied condition / G.X. Nathan, W.I.D. Jones // Wear. – 1966. - №9 – P. 300-309.

115. Wang Y.-L. An analysis of influence of plastic indentation on three-body abrasive wear of metals / Y.-L. Wang, Z.-S. Wang // Wear. – 1988. V. 122. - №2. – P. 123-133.

116. Thomas T.R. Computer simulation of wear // Wear. - 1972. - V.22 - N1 -P.83-90.

117. Hisakado T. The influence of surface roughness on abrasive wear // Wear. -V.41.-N1 - P. 179-190.

118. Zum Gahr K. H. Modeling of two-body abrasive wear"// Wear. - 1987. - V.124.-N1. - P.87-103.
119. Fang L. Predicting three-body abrasive wear using Monte Carlo methods / L. Fang, W. Liu, D. Du, X. Zhang, Q. Xue // Wear. - 2004. - V.256. - N7-8. - P.685-694.
120. Брыков Н.Н. ТС вопросу о закономерностях сопротивляемости сталей и сплавов абразивному изнашиванию / Н.Н. Брыков, М.Н. Брыков // Problems of Tribology. -1997. -N4. - С.13-20.
121. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. - М.: Машиностроение, 1966. – 332 с.
122. Torrance A.A. A new approach to the mechanics of abrasion // Wear. - 1981.-67. - N2.-P.233-257.
123. S.L. Bull. Can scratch testing be used as a model for the abrasive wear of hard coatings? // Wear. - 1999. - V.233-235. - N. - pp.412-423.
124. Гладченко А.Н. Триботехническое обеспечение долговечности экструзионной техники: Автореферат дис. д-ра техн. Наук: 05.02.04 – К., 1992. – 24 с.
125. Брыков М.Н. Разработка и применение материаловедческих основ повышения износостойкости железоуглеродистых сплавов при абразивном изнашивании: Автореферат дис. д-ра техн. Наук: 05.02.01 – К., 2008. – 24 с.
126. Hurricks P.L. Some metallurgical factors controlling the adhesive and abrasive wear resistance of steels. A review // Wear. - 1973. - V.26. - N3. - P.285-304.
127. Goode P.D. Wear mechanisms in ferrous alloys // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. - 1989. - V39. - N1-4. - P.521-530.
128. Scheffler O. The abrasive wear of steels in South African soils / O. Scheffler, C Allen // Tribology International. - V.21. - N3. - P. 127-135.
129. S.F. Scieszka. A technique to study abrasive wear in contacts with particulate materials // Wear Volume 119, Issue 2, 15 September 1987, Pages 237-249.

130. S. Quirke, O. Scheffler and C. Allen. An evaluation of the wear behaviour of metallic materials subjected to soil abrasion // Soil and Tillage Research Volume 11, Issue 1, February 1988, Pages 27-42.
131. A. P. Mouritz and I. M. Hutchings. The abrasive wear of steel during rolling-sliding contact with rock counterfaces // Wear Volume 134, Issue 1, November 1989, Pages 99-113.
132. Misra A. A classification of three-body abrasive wear and design of new tester / A. Misra, I. Finnie // Wear. - 1980. - 60. - P. 111-121.
133. Ivusic V. Transition wear behaviour of an abrasion-resistant cast iron // Wear Volume 74, Issue 2, 22 December 1981, Pages 307-314.
134. H.-J. Yu and S. D. Bhole. Development of a prototype abrasive wear tester for tillage tool materials // Tribology International Volume 23, Issue 5, October 1990, Pages 309-316.
135. Доронькин Е.Д. Новые инструментальные материалы без вольфрама и кобальта / Е.Д. Доронькин // Цветные металлы. – 1982. - №9. – с. 16-17.
136. Сом А.И. Новые износостойкие сплавы для плазменной наплавки / А.И. Сом, П.В. Гладкий, Е.Ф. Переплетчиков // Наплавка износостойких и жаростойких сталей и сплавов. Наплавочные материалы. – Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, 1983. – с. 7-11.
137. Сом А.И. Выбор сплавов для наплавки червяков экструдеров / А.И. Сом, П.В. Гладкий, Е.Ф. Переплетников, А.Н. Гладченко // Химическое и нефтяное машиностроение, 1987. - №6. – С. 33-35.
138. Фрумин И.И. Современные типы наплавочного материала и их классификация // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавочный металл. – Киев: Наук. Думка, 1977. – С. 3-17.
139. Antony K.C. Wear resistant cobalt-base alloys // J. Metals. – 1983. – V. 35. - №2. - p. 52-60.
140. Тиба Н. Изготовление износостойких цилиндров и червяков для экструдеров и литьевых машин / Н. Тиба, Н. Сэкинэ // заявка 59-25941. Япония. Заявлено 02.08.82, №7 – 134910, опубл. 10.02.84.

141. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1983. – 328 с.
142. Крешенбаум В.Я. Механотермическое формирование поверхности трения. – М.: Машиностроение, 1978. – 213 с.
143. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. – Киев: Наук. думка, 1984. – 272 с.
144. Лахтин Ю.М. Азотирование стали / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган // М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.
145. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справ. Под ред. Л.С. Ляховича. – М.: Машиностроение, 1981. – 420 с.
146. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. – 184 с.
147. Дубинин Г.Н. Диффузионное хромирование сплавов. – М.: Машиностроение, 1964. – 340 с.
148. Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах. – М.: Машиностроение, 1979. – 224 с.
149. Каплун В.Г. Прогрессивные технологии упрочнения конструктивных элементов / В.Г. Каплун, П.В. Каплун// В кн. “Современные технологии в машиностроении”. Харьков НТУ “ХПИ”, 2007. – С. 388-403.
150. Деркач В.В. Повышение износостойкости цилиндра экструдера методом термомодиффузионной биметализации / Автореф. дис. канд.техн. наук, Киев. – 2000. – 19 с.
151. Кидин И.Н. Физические основы электротермической обработки металлов. –М.: Металлургия, 1969. – 376 с.
152. Линник В.А. Современная техника газотермического напыления покрытий / В.А. Линник, П.Ю. Пекшев. – М.: Машиностроение, 1985. – 127 с.
153. Справочник сварщика / Под. ред. В.В. Степанова. – М.: Машиностроение, 1974. – 519 с.
154. Степанов Б.В. Высокопроизводительные методы наплавки. – М.: машиностроение, 1977. – 74 с.
155. Вельбой В.П. Технології і обладнання для напилення / В.П. Вельбой, П.В. Каплун //Хмельницький, ТУП. – 2007. – 162 с.
156. Упрочнение деталей лучом лазера. Под ред. В.С. Коваленка. – Киев: Техника. – 1990. – 192 с.

157. Месяц Г.А. Надежность машин для переработки пластмасс / Г.А. Месяц, В.Г. Нечипоренко, О.А. Коханова. – К.: Техника, 1972. – 140 с.

158. Картинский Ц.Т. Технологические параметры ионного азотирования // Вестник машиностроения, 1979. - №12. – с. 56-58.

159. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. – Харьков: НЕЦ ХФТИ. – 2006. – 364 с.

160. Бартенев С.С. Детонационные покрытия в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1982. – 215 с.

161. Протасов Г.А. Газотермические покрытия в Химическом машиностроении и методы определения их свойств / Г.А. Протасов, Д.Ф. Альштулер // Обзорная информация. Сер. ХМ – 9 – М: ЦНИИТИ химнефтемаш, 1982. – 54 с.

162. Иванов М.Н. Детали машин – М., 1984. – 399с.

163. Volkt A. Nolybdan mindert Verschleiss in Doppelschneckenexntudern // Maschinenmarkt – 1982. - Bd. 58. – №12. – S. 193-194.

164. Schule H. Verschleissminimierung durch Maschinenelemente aus Keramik / H. Schule, W.I. Ratzel // Kunststoffe. – 1986. - Bd. 76. – №1. – S. 35-41.

165. Матвіїшин П.В. Вплив зазору між шнеком і циліндром на експлуатаційні характеристики термопластавтомата ДБ 3328 / П.В. Матвіїшин, В.Г. Каплун // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. - № 3. – С.-23 - 27

166. Матвіїшин П.В. Зносостійкість дифузійних покриттів в середовищі розплаву склонаповнених полімерів / П.В. Матвіїшин, В.Г. Каплун // Матеріали 3-ї Міжн. наук.-техн. конф. “Сучасні проблеми трибо техніки” МУК, Миколаїв. – 2009. – С. 78-80.

167. Матер. міжн. конф. “Ольвійський форум – 2008: стратегії України в геополітичному просторі”, Ялта, Крим,- 2008, - частина 2, С. 135-137.

168. Каплун В.Г. Дослідження зносу і тиску в матеріальному циліндрі термопластавтоматів при переробці пластмас / Проблеми трибології (Promblems of Tribology). - №3. – 2007. – С. 25-29.

169. Матвіїшин П.В. Розрахунок зносостійкості і довговічності градієнтних покриттів при абразивному зношуванні/ П.В. Матвіїшин, В.А. Гончар, П.В. Каплун, В.Г. Каплун// Проблеми трибології (Problems of Tribology) – №1 – 2012. – С.116 – 119.

170. Матвіїшин П.В. Дослідження зносостійкості пар тертя в середовищі скло наповнених пластмас / П.В. Матвіїшин, В.Г. Каплун // Проблеми трибології (Promblems of Tribology). - №4. – 2009. – С. 80-85.

171. Каплун В.Г. Оптимізація технології азотування сталі 38ХМЮА в тліючому позряді за параметром зносостійкості в розплаві склонаповненої пластмаси /В.Г. Каплун, П.В. Матвіїшин, Н.С. Машовець // Проблеми трибології (Promblems of Tribology), - №3.- 2011. – С. 106-109.

172. Матвіїшин П.В. Особливості експлуатації термопластавтоматів при переробці різних пластмас / П.В. Матвіїшин, В.Г. Каплун // Тези доп. VI міжнар. конф. молодих науковців “Інформатика та механіка”, м. Кам’янець-Подільський, 2008. – С. 63-64.

173. Каплун В.Г. Підвищення зносостійкості деталей машин в середовищі розплаву пластмас / В.Г. Каплун, П.В. Матвіїшин // Сб. научн. тр. міжн. научно-техн. конф. “Машиностроение и техносфера”, XXI века -2010, Т. №2,-С. 3-7.

174. Павловський М.А. Теоретична механіка. Динаміка./М.А. Павловський, Л.Ю. Акинфієва, О.Ф. Бойчук // Київ, Вища школа, 1990,-480 с.

175. Леонтьев Н.Л. Техника статистических вычислений Л. Лесная промышленность, 1996,-236с.

176. Каплун В.Г. Исследование шнека термопластавтомата на устойчивость с применением ЭВМ/ В.Г. Каплун, В.Д. Леськив, Л.А. Силина, Б.С. Вольнский// Инф. Матер. АН УССР. Киев: Наук. Думка, 1979.-С.26-27.

177. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента / Владислав Борисович Тихомиров – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3
ЧАСТИНА І	6
Вступ	7
Розділ 1. Огляд досліджень зносостійкості екструдерів	
1.1. Наукові основи процесу екструзії.	9
1.2. Конструкції екструдерів для переробки фуражного зерна	13
1.2.1. Конструкції та характеристики екструдерів для переробки зерна, що випускаються за кордоном	19
1.2.2. Розвиток екструзійної техніки, виготовленої в Україні	26
1.3. Умови роботи вузла екструдювання при переробці фуражного зерна.	33
1.4. Відомі методи підвищення зносостійкості вузла екструдювання і завдання нових наукових досліджень	38
Розділ 2. Методика наукових досліджень	
2.1. Установки для проведення експериментів	46
2.2. Умови проведення експериментів (матеріали, середовище).	55
2.3. Планування експериментів.	60
2.4. Обробка результатів експериментів	62
Розділ 3 Результати експериментальних досліджень зносостійкості сталей	
3.1. Порівняльні експериментальні дослідження зносостійкості зразків зміцнених за різними технологіями	64
3.2. Вплив структури поверхневих шарів на зносостійкість сталей в модельному розчині	69
3.3. Вплив розміру абразивного зерна на інтенсивність зношування різних сталей	78
3.4. Оптимізація технологічних параметрів іонного азотування сталей за критерієм максимальної зносостійкості.	80
Розділ 4. Розрахунок зносостійкості матеріалів в абразивному середовищі	
4.1. Розрахунок зносостійкості та довговічності конструктивних елементів з метастабільними фазами в структурі матеріалів	97

4.2. Розрахунок зносостійкості та довговічності конструктивних елементів з метастабільними фазами в структурі матеріалів і градієнтними дифузійними покриттями	101
4.3. Теоретико-експериментальна методика розрахунку трибологічних характеристик і довговічності конструктивних елементів та приклади її застосування	106

Розділ 5. Конструкційні методи підвищення довговічності та ремонтпридатності вузла екструдуювання

5.1. Експериментальна установка для переробки фуражного зерна з додаванням мінералів	111
5.2. Конструкція матеріального циліндра екструдера	116
5.2.1. Конструкція шнека матеріально циліндра	117
5.2.2. Конструкція секційного циліндра	118
5.3. Принципова схема гравітаційного дозатора сипучих матеріалів	120

Розділ 6. Технологія виготовлення комбікормів з домішками відходів зернового виробництва та мінералу сапоніту

6.1. Методи проведення експериментальних досліджень	122
6.2. Результати експериментальних досліджень технології виготовлення комбікормів	124
Висновки до частини I	135
Література	137
ЧАСТИНА II	149
Вступ	150

Розділ 7. Стан існуючих досліджень з працездатності і надійності термопластавтоматів

7.1. Особливості конструкції і експлуатації термопластавтоматів	152
7.2. Сучасні наукові підходи до питань зносостійкості матеріалів	164
7.3. Прогресивні методи підвищення зносостійкості	169

Розділ 8. Розрахунок зносостійкості і довговічності градієнтних покриттів

8.1. Розрахунок зносостійкості і довговічності азотованих шарів при абразивному зношуванні	176
--	-----

8.2. Методика і приклад розрахунку зносостійкості і довговічності ащотованого шару	181
--	-----

Розділ 9. Методика експериментальних досліджень

9.1 Дослідження геометричних параметрів, твердості поверхні та зносу шнеків, виготовлених за існуючою технологією	183
9.2. Методика дослідження тиску, крутильного моменту і осьового зусилля в матеріальному циліндрі при переробці різних пластмас	184
9.3. Дослідження впливу зазору між шнеком і циліндром на експлуатаційні характеристики термопластавтомату	192
9.4 Методика експериментальних досліджень зносостійкості пар тертя в середовищі розплаву пластмас	195
9.5. Дослідження властивостей поверхневого шару після азотування в тліючому розряді та їх оптимізація за критерієм максимальної зносостійкості	198

Розділ 10. Результати експериментальних досліджень силових і експлуатаційних параметрів в матеріальному циліндрі при переробці різних пластмас

10.1. Дослідження величини і розподілу тиску по довжині матеріального циліндра при переробці різних пластмас	202
10.2. Вплив зазору між шнеком і циліндром на розподіл тиску в різних зонах матеріального циліндра при переробці різних пластмас	209
10.3. Дослідження крутильного моменту і осьового зусилля на шнеку в період завантаження і пластикації пластмас	217
10.4. Вплив зазору між шнеком і циліндром на продуктивність термопластавтомату та якість продукції	218

Розділ 11. Результати експериментальних досліджень зношування шнеків термопластавтоматів та дослідних зразків після зміцнення за різними технологіями

11.1. Дослідження форми і величини зносу шнеків термопластавтомату	225
11.2. Порівняльні дослідження зносостійкості зразків, зміцнених за різними технологіями	230
11.3. Дослідження властивостей сталі 38ХМЮА після азотування в тліючому розряді	232

11.4. Оптимізація властивостей поверхні сталі 38ХМЮА при азотуванні в тліючому розряді за критерієм максимальної зносостійкості 239
Висновки до частини II 243
Література 245