


ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА до кваліфікаційної роботи МАГІСТРА


Освітньо-кваліфікаційний рівень


Спеціальність 132 – Матеріалознавство
Шифр і назва спеціальності
Освітньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів
Назва освітньої програми

на тему ***Моделі пластичності металів
за циклічного навантаження з великими деформаціями***

Шифр: КРТАМ 25. 24451.000. ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група МТВАм-24-1
Курс, група виконавця  Юрій ХАЛАМАН
Підпис Ім'я, прізвище

Керівник: д.т.н., професор кафедри ТАМ
Науковий ступінь, посада  Ілона ДРАЧ
Підпис Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:
зав. кафедри ТАМ, д.т.н., професор
 Олександр ДИХА
Підпис Ім'я, прізвище

5 грудня 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інженерії, транспорту та архітектури*

Кафедра *трибології, автомобілів та матеріалознавства*

Рівень вищої освіти *другий магістерський*

Галузь знань *13 – Механічна інженерія*

Спеціальність *132 – Матеріалознавство*

Освітньо-професійна програма *Відновлення та технічний сервіс автомобілів*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ



(підпис)

д.т.н., професор Олександр ДИХА

Науковий ступінь, ім'я, прізвище

7 жовтня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Халаману Юрію Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Моделі пластичності металів

за циклічного навантаження з великими деформаціями»

Керівник роботи Драч Ілона Володимирівна д.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по батькові науковий ступінь, вчене звання)

Затверджено наказом університету від 25 серпня 2025 р. № 65 (Д28)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 2 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані: *дані якісні джерела інформації щодо теми КРМ, результати моделювання одержано із застосуванням прикладних програм Mathcad, Matlab.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік задач): *проаналізувати сучасні підходи до моделювання пластичної деформації металів; дослідити особливості пластичної поведінки металів за умов циклічного навантаження з великими деформаціями; виконати експериментальні дослідження з метою отримання характеристик матеріалу для побудови моделі пластичності; сформулювати математичну модель пластичності з урахуванням накопичених деформацій; реалізувати модель у програмному середовищі комп'ютерного інженерного аналізу; оцінити ефективність запропонованої моделі для оптимізації параметрів процесу холодного об'ємного штампування.*

5. Перелік графічного матеріалу: *графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах.*

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 1 червня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Примітка
1	<i>Вибір напряму дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником</i>	30.08.2025	<i>виконано</i>
2	<i>Ознайомлення з предметною областю, формулювання мети та задач дослідження, визначення об'єкта та предмета дослідження</i>	10.09.2025	<i>виконано</i>
3	<i>Робота над розділом 1 – Характеристика предметної області та постановка задачі дослідження</i>	20.09.2025	<i>виконано</i>
4	<i>Робота над розділом 2 – Теоретичні основи моделювання пластичної деформації металів при циклічному навантаженні</i>	30.09.2025	<i>виконано</i>
5	<i>Робота над розділом 3 – Експериментальні дослідження та їх результати</i>	30.10.2025	<i>виконано</i>
6	<i>Робота над розділом 4 – Модель пластичності металів за циклічного деформування</i>	15.11.2025	<i>виконано</i>
7	<i>Оформлення пояснювальної записки згідно вимог</i>	25.11.2025	<i>виконано</i>
8	<i>Нормоконтроль пояснювальної записки</i>	2.12.2025	<i>виконано</i>
9	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	5.12.2025	<i>виконано</i>

Студент


Підпис

Юрій ХАЛАМАН

Ім'я, прізвище

Керівник


Підпис

Ілона ДРАЧ

Ім'я, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи:	<u>Моделі пластичності металів</u> <u>за циклічного навантаження з великими</u> <u>деформаціями</u>
Виконавець кваліфікаційної роботи:	<u>студент групи МТВАм-24-1</u> <u>Халаман Юрій Михайлович</u>
Керівник кваліфікаційної роботи:	<u>д.т.н., професор кафедри ТАМ</u> <u>Драч Ілона Володимирівна</u>

Кваліфікаційна робота магістра містить:

Пояснювальна записка				Кількість додатків
Сторінок	Рисунків	Таблиць	Джерел інформації	
80	10	6	27	1





Об'єктом дослідження є процеси пластичного деформування металів за умов циклічного навантаження при багатопереходному холодному об'ємному штампуванні.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання під час проектування та вдосконалення технологій холодного штампування, підвищення точності прогнозування якості штампованих і відновлених деталей, зниження ймовірності виникнення дефектів та підвищення ресурсу виробів автомобільного призначення.

Ключові слова: циклічна пластичність, пластичні деформації, ефект Баушингера, моделювання пластичних деформацій.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Характеристика предметної області та постановка задачі дослідження.....	12
1.1 Загальна характеристика процесів пластичного деформування металів	12
1.2 Циклічне навантаження та його вплив на властивості металів	13
1.3 Великі пластичні деформації та особливості їх урахування	16
1.4 Основні підходи до побудови моделей пластичності металів	15
1.5 Експериментальні методи дослідження пластичної поведінки металів	16
1.6 Математичне моделювання процесів холодного об'ємного штампування	16
1.7 Особливості багатоперехідного холодного об'ємного штампування	17
1.8 Роль моделей пластичності в атестації та вдосконаленні технологій штампування	17
Висновки до розділу.....	18
2 Теоретичні основи моделювання пластичної деформації металів при циклічному навантаженні	19
2.1 Поняття пластичної деформації та її фізична природа	19
2.2 Напружений і деформований стан твердого тіла	19
2.3 Критерії пластичності	20
2.4 Моделі зміцнення металів	22
2.5 Фізична модель Тейлора (дислокаційна модель)	23

					КРТАМ 25. 24451.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Моделі пластичності металів за циклічного навантаження з великими деформаціями	Літ.	Арк.	Акрюшів	
Розроб.		Халаман						4	
Перевір.		Драч							
Реценз.									
Н. Контр.		Бабак							
Затверд.		Диха						ХНУ група МТВАМ 24-1	

2.6	Моделювання процесів циклічного деформування металів.....	24
2.6.1	Формування гістерезисних петель	24
2.6.2	Накопичення пластичної деформації	25
2.6.3.	Циклічне зміцнення та розм'якшення	25
2.6.4.	Релаксація напружень	26
2.6.5.	Перебудова дислокаційної структури при великих деформаціях	26
2.6.6.	Залишкові напруження	27
2.6.7.	Стабілізація напружено-деформованого стану	27
2.7	Ефект Баушингера.....	28
2.8	Моделювання великих пластичних деформацій	29
2.9	Математичні моделі пластичності для циклічного навантаження	31
2.10	Теоретичні основи моделювання процесів холодної обробки тиском	32
	Висновки до розділу 2	33
3	Експериментальні дослідження та їх результати	34
3.1	Мета та завдання експериментальних досліджень	34
3.2	Об'єкт і методика експериментальних досліджень	34
3.3	Опис експериментальної установки та вимірювального обладнання	36
3.4	Характер навантаження та умови проведення випробувань	36
3.5	Експериментальні діаграми деформування та їх аналіз	37
3.6	Накопичення пластичної деформації при циклічному навантаженні	37
3.7	Прояв ефекту Баушингера при циклічному деформуванні	38
3.8	Вплив циклічної деформації на механічні властивості металу	38
3.9	Узагальнення результатів експериментальних досліджень	38

3.10. Розрахункові формули, модель еволюції та чисельні приклади	39
3.11 Таблиця вихідних параметрів і приклад чисельного розрахунку σ_0 на старті	41
3.12 Побудова кривих $\sigma_0(\varepsilon)$	43
3.13 Реалізація методики експериментальних досліджень	44
3.14 Аналітичне оброблення результатів експериментальних досліджень	46
3.15 Результати експериментальних досліджень	48
Висновки до розділу 3	52
4 Модель пластичності металів за циклічного деформування	54
4.1 Побудова моделі пластичності за циклічного деформування	55
4.2 Чисельний аналіз моделі	61
4.3 Удосконалення технології штампування деталі «гайка»	67
Висновки до розділу.....	67
Висновки.....	69
Перелік посилань	73
Додатки.....	76

ВСТУП

Сучасний етап розвитку машинобудування, зокрема автомобільної промисловості, характеризується постійним зростанням вимог до якості, надійності та довговічності деталей і вузлів. Підвищення експлуатаційних навантажень, ускладнення конструкцій транспортних засобів, зменшення маси виробів за одночасного збільшення їхньої міцності зумовлюють необхідність впровадження прогресивних технологій обробки металів. Особливе місце серед таких технологій посідають процеси пластичного формоутворення, які забезпечують високі показники використання матеріалу, підвищені механічні властивості готових виробів та високу продуктивність [1].

Однією з найбільш ефективних технологій пластичного формоутворення є багатоперехідне холодне об'ємне штампування, яке широко застосовується у виробництві кріпильних виробів, елементів трансмісії, підвіски та інших відповідальних деталей автомобілів. Перевагами цієї технології є висока точність розмірів, покращена структура металу, відсутність термічних впливів, а також можливість одержання виробів складної форми без додаткової механічної обробки. Разом з тим багатоперехідні процеси холодного штампування супроводжуються складним напружено-деформованим станом матеріалу, значними пластичними деформаціями та багаторазовим циклічним навантаженням [1].

У процесі багатоперехідного деформування метал перебуває в умовах змінних напружень, накопичення пластичних деформацій, локалізації деформування, що істотно впливає на його структуру, фізико-механічні властивості та опір руйнуванню. За таких умов у матеріалі відбуваються процеси наклепу, структурної перебудови, виникнення внутрішніх напружень, що у подальшому можуть призводити до появи дефектів, зниження довговічності та передчасного виходу деталей з ладу. Тому проблема достовірного опису пластичної поведінки металів за умов циклічного

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		8

навантаження з великими деформаціями є надзвичайно актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору [2].

Ефективне керування процесами пластичного формоутворення, забезпечення якості штампованих виробів і стабільності технологічних параметрів неможливі без застосування сучасних методів математичного моделювання. Математичні моделі пластичності дозволяють описувати закономірності деформування матеріалу, прогнозувати розподіл напружень і деформацій, оцінювати можливість виникнення дефектів, таких як тріщини, складки, надриви, а також визначати раціональні режими деформування. Особливу складність становить моделювання процесів із урахуванням циклічного характеру навантаження та великих накопичених деформацій, що характерно саме для багатоперехідних технологій холодного об'ємного штампування [2].

Сучасний розвиток комп'ютерних систем інженерного аналізу значно розширив можливості дослідження процесів пластичного деформування. Чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів, дають змогу з високою точністю відтворювати реальні умови технологічних процесів, аналізувати напружено-деформований стан заготовки на кожному етапі формоутворення та оцінювати вплив параметрів процесу на якість готового виробу. Проте достовірність результатів такого моделювання безпосередньо залежить від адекватності прийнятих моделей пластичності, які мають враховувати реальну поведінку матеріалу за складних режимів навантаження [3, 4].

Особливої уваги потребує врахування явищ циклічного зміцнення, розм'якшення, ефекту Баушингера та накопичення пошкоджень, що проявляються під час багаторазового пластичного деформування [2]. Ігнорування цих факторів призводить до істотних похибок у прогнозуванні формозмінення, силових параметрів процесу та експлуатаційних характеристик штампованих деталей. Тому поєднання експериментальних досліджень пластичної поведінки металів і побудови на їх основі адекватних математичних

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		9

моделей є необхідною умовою для вдосконалення сучасних технологій холодного об'ємного штампування.

Актуальність цієї кваліфікаційної роботи також зумовлена потребами галузі відновлення та технічного сервісу автомобілів. У процесі експлуатації та ремонту транспортних засобів значна кількість деталей відновлюється методами пластичного деформування, зокрема правкою, обтиском, висаджуванням, холодним штампуванням. Забезпечення необхідного ресурсу відновлених деталей вимагає достовірного прогнозування їх напружено-деформованого стану та залишкових деформацій з урахуванням попередньої історії навантаження. У цьому контексті використання моделей пластичності, адаптованих до умов циклічного деформування з великими деформаціями, є надзвичайно важливим.

Метою кваліфікаційної роботи є формулювання та дослідження моделі пластичності металів за умов циклічного навантаження з великими деформаціями на основі експериментальних даних, а також оцінювання ефективності її використання для атестації та вдосконалення технології багатоперехідного холодного об'ємного штампування деталі типу «гайка» із застосуванням комп'ютерних систем інженерного аналізу.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачається розв'язання таких основних завдань:

- проаналізувати сучасні підходи до моделювання пластичної деформації металів;
- дослідити особливості пластичної поведінки металів за умов циклічного навантаження з великими деформаціями;
- виконати експериментальні дослідження з метою отримання характеристик матеріалу для побудови моделі пластичності;
- сформулювати математичну модель пластичності з урахуванням накопичених деформацій;

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		10

– реалізувати модель у програмному середовищі комп'ютерного інженерного аналізу;

– оцінити ефективність запропонованої моделі для оптимізації параметрів процесу холодного об'ємного штампування.

Об'єктом дослідження є процеси пластичного деформування металів за умов циклічного навантаження при багатопереходному холодному об'ємному штампуванні.

Предметом дослідження є моделі пластичності металів при великих деформаціях та закономірності їх застосування для математичного моделювання процесів формоутворення.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання під час проектування та вдосконалення технологій холодного штампування, підвищення точності прогнозування якості штампованих і відновлених деталей, зниження ймовірності виникнення дефектів та підвищення ресурсу виробів автомобільного призначення.

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		11

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасний автомобільний транспорт є складною інженерною системою, надійність та довговічність якої безпосередньо залежать від працездатності її конструкційних елементів. У процесі експлуатації деталі автомобілів зазнають дії змінних механічних навантажень, вібрацій, температурних коливань та агресивних середовищ, що призводить до розвитку пластичних деформацій, втомного руйнування та зниження експлуатаційних характеристик матеріалів. Особливо небезпечними є умови циклічного навантаження з великими деформаціями, характерні для елементів підвіски, трансмісії, рами та кузовних конструкцій [1].

Ефективне відновлення та технічний сервіс автомобілів неможливі без глибокого розуміння закономірностей деформування та руйнування металевих матеріалів. Визначальну роль у цьому відіграють сучасні моделі пластичності, які дають змогу описувати нелінійну поведінку металів за складних режимів навантаження, прогнозувати залишкові деформації, втрату міцності та ресурс деталей після відновлення [3, 4].

Актуальність цієї кваліфікаційної роботи зумовлена зростанням вимог до надійності відновлених автомобільних деталей, необхідністю підвищення точності прогнозування їх довговічності та забезпечення безпеки експлуатації транспортних засобів. Використання адекватних моделей пластичності металів за циклічного навантаження з великими деформаціями дозволяє обґрунтовано обирати матеріали, технології відновлення та режими зміцнювальної обробки.

1.1 Загальна характеристика процесів пластичного деформування металів

Пластичне деформування металів є одним з основних процесів сучасного машинобудування та матеріалознавства, що лежить в основі більшості

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		12

технологій формоутворення. На відміну від пружної деформації, пластична деформація є незворотною і супроводжується глибокими структурними змінами в матеріалі, які визначають його механічні та експлуатаційні властивості [2, 5].

У процесі пластичного деформування відбувається переміщення дислокацій, утворення нових дефектів кристалічної ґратки, перебудова субструктури, а також накопичення внутрішніх напружень. Інтенсивність цих процесів залежить від величини деформації, швидкості навантаження, температури, виду напруженого стану та властивостей самого матеріалу [5].

У технологіях холодного об'ємного штампування пластична деформація протікає при температурах, значно нижчих за температуру рекристалізації, тому всі структурні зміни, зумовлені наклепом, зберігаються в готовому виробі. Це призводить до зростання міцності та твердості, але водночас до зменшення пластичності та ударної в'язкості. Таким чином, необхідним є пошук оптимального співвідношення між міцнісними та пластичними характеристиками.

Особливістю багатоперехідних процесів формоутворення є те, що матеріал зазнає не одноразового, а багаторазового пластичного деформування, причому напрям дії напружень може змінюватися. Це створює складну історію навантаження, яка суттєво впливає на поведінку матеріалу та його працездатність у подальшій експлуатації.

1.2 Циклічне навантаження та його вплив на властивості металів

Циклічним навантаженням називають процес періодичної зміни напружень або деформацій у матеріалі з плином часу. У реальних умовах експлуатації автомобільних деталей циклічне навантаження є одним із найпоширеніших режимів роботи, зокрема для елементів підвіски, трансмісії, кріпильних деталей, валів, шестерень тощо [1].

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		13

За циклічного навантаження в матеріалі відбувається поступове накопичення пошкоджень, яке може призвести до втомного руйнування навіть за напружень, значно менших за границю міцності. Якщо ж циклічне навантаження супроводжується пластичними деформаціями, процеси деградації матеріалу значно прискорюються [1].

Умовно розрізняють:

- низькоциклову втому (з великими пластичними деформаціями);
- високоциклову втому (переважно в області пружних деформацій).

У технологічних процесах багатопереходного холодного штампування має місце саме низькоциклове навантаження, при якому за кожний цикл накопичуються значні пластичні деформації [2].

Це призводить до появи таких ефектів [1]:

- циклічне зміцнення або розм'якшення матеріалу;
- ефект Баушингера;
- зменшення границі текучості при повторному навантаженні;
- накопичення мікропошкоджень і мікротріщин.

Всі ці явища суттєво ускладнюють математичний опис поведінки металів та потребують застосування спеціалізованих моделей пластичності.

1.3 Великі пластичні деформації та особливості їх урахування

Великі пластичні деформації характеризуються значними змінами форми та розмірів тіла, при яких геометричні співвідношення суттєво відрізняються від початкових. У таких умовах класичні лінійні залежності між напруженнями та деформаціями стають непридатними [1].

При великих деформаціях:

- змінюється орієнтація елементів матеріалу;
- виникають великі переміщення та обертання;
- істотно змінюється жорсткість матеріалу;

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		14

- напружено-деформований стан стає сильно нелінійним.

Для коректного опису таких процесів використовують [6]:

- тензорні міри деформацій;
- інкрементальні форми закону Гука;
- поточні (істинні) напруження та деформації.

У процесах холодного об'ємного штампування великі пластичні деформації є визначальним фактором, що формує властивості готового виробу. Тому при математичному моделюванні таких процесів обов'язковим є урахування геометричної та фізичної нелінійності.

1.4 Основні підходи до побудови моделей пластичності металів

Моделі пластичності є математичними залежностями, які описують зв'язок між напруженнями, деформаціями та історією навантаження матеріалу. Вони лежать в основі сучасних комп'ютерних систем інженерного аналізу [3-5, 7].

Найбільш поширеними є такі підходи:

1. Класичні ізотропні моделі [3].

До них належать:

- модель ідеально пластичного тіла;
- модель ізотропного зміцнення;
- модель з лінійним зміцненням.

Ці моделі добре описують одноразове монотонне навантаження, але не враховують складної історії деформування.

2. Моделі з урахуванням кінематичного зміцнення [2].

Такі моделі дозволяють описувати зміцнення поверхні текучості в просторі напружень та враховувати ефект Баушингера. Вони є більш придатними для задач циклічного навантаження.

3. Комбіновані моделі [4, 5, 7].

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		15

Поєднують ізотропне та кінематичне зміцнення, що дозволяє більш точно описувати поведінку матеріалу за повторних навантажень і великих деформацій.

1.5 Експериментальні методи дослідження пластичної поведінки металів

Для побудови адекватних моделей пластичності необхідно отримати достовірні експериментальні дані. До основних методів належать [8]:

- одноосьові випробування на розтяг і стиск;
- циклічні випробування при керуванні навантаженням або деформацією;
- випробування на кручення;
- комбіновані навантаження.

Під час циклічних випробувань визначають [9]:

- діаграми «напруження–деформація»;
- петлі гістерезису;
- коефіцієнти циклічного зміцнення та розм'якшення;
- накопичені пластичні деформації.

1.6 Математичне моделювання процесів холодного об'ємного штампування

Процеси холодного об'ємного штампування характеризуються:

- складним напруженим станом;
- контактною взаємодією заготовки та інструменту;
- значними деформаціями;
- тертям;
- зміцненням матеріалу.

Метод скінченних елементів є основним інструментом чисельного аналізу таких процесів. Його застосування дозволяє [5, 7]:

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		16

- визначати розподіл напружень і деформацій;
- прогнозувати заповнення штампу;
- оцінювати силові параметри процесу;
- визначати зони можливого руйнування.

1.7 Особливості багатоперехідного холодного об'ємного штампування

Багатоперехідне штампування передбачає послідовне деформування заготовки у кілька стадій. Кожна стадія формує окрему частину геометрії виробу та вносить внесок у загальний рівень деформації [10].

Основні особливості [11]:

- накопичення пластичних деформацій;
- складна історія навантаження;
- змінний напрям головних напружень;
- локалізація деформування.

Ці фактори значно ускладнюють математичне моделювання.

1.8 Роль моделей пластичності в атестації та вдосконаленні технологій штампування

Атестація технологій штампування передбачає підтвердження їх відповідності вимогам міцності, точності, якості поверхні та довговічності.

Моделі пластичності дозволяють [2]:

- прогнозувати дефекти;
- оптимізувати геометрію інструменту;
- підбирати режими деформування;
- зменшувати кількість експериментальних випробувань.

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		17

Висновки до розділу 1

Пластичне деформування за циклічного навантаження з великими деформаціями є складним фізико-механічним процесом.

Багатопереходне холодне об'ємне штампування належить до найскладніших технологічних процесів формоутворення.

Адекватне математичне моделювання можливе лише за умови використання спеціалізованих моделей пластичності.

Поєднання експериментальних досліджень та чисельного аналізу є необхідною умовою для вдосконалення технологій штампування.

У роботі передбачається розв'язання таких завдань:

- проаналізувати сучасні підходи до моделювання пластичної деформації металів;

- дослідити особливості циклічного деформування за великих деформацій;

- оцінити можливості застосування моделей пластичності в задачах відновлення автомобільних деталей;

- сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення їх ресурсу.

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		18

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ МЕТАЛІВ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

2.1 Поняття пластичної деформації та її фізична природа

Пластична деформація – це незворотна зміна форми та розмірів тіла під дією зовнішніх навантажень, що зберігається після їх зняття. На відміну від пружної деформації, пластична деформація супроводжується порушенням кристалічної ґратки металу та незворотними структурними змінами [12].

Основним носієм пластичної деформації в металах є дислокації – лінійні дефекти кристалічної будови. Під дією напружень дислокації переміщуються по площинах ковзання, що й забезпечує пластичну течію матеріалу. Зі зростанням деформації відбувається накопичення дислокацій, їх взаємне блокування та формування внутрішніх напружень, що призводить до зміцнення металу [12].

У процесах холодної обробки тиском пластична деформація досягає великих значень, що викликає [13]:

- різке зростання щільності дислокацій;
- зміну форми та орієнтації зерен;
- формування текстури деформації;
- появу деформаційної анізотропії.

2.2 Напружений і деформований стан твердого тіла

Для кількісного опису механічного стану матеріалу використовуються тензори напружень і деформацій [14].

Тензор напружень σ_{ij} характеризує внутрішні сили в матеріалі, що діють на елементарні площинки [14].

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		19

Для опису пластичних процесів особливе значення має тензор пластичних деформацій ε_{ij}^p і, зокрема, девіатор напружень [14]:

$$\varepsilon_{ij} = \sigma_{ij} - 1/3 \sigma_{kk} \delta_{ij},$$

який визначає зсувну складову напруженого стану та відповідає за розвиток пластичної деформації.

Тензор деформацій ε_{ij} описує зміну форми тіла. Для аналізу процесів пластичності застосовується інтенсивність деформації [14]:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p},$$

де ε_{ij}^p – тензор пластичних деформацій описує компоненту пластичної деформації у напрямку i внаслідок переміщення у напрямку j .

Для тривимірного тіла тензор пластичних деформацій має вигляд матриці 3×3 [14]:

$$\varepsilon_{ij}^p = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^p & \varepsilon_{xy}^p & \varepsilon_{xz}^p \\ \varepsilon_{yx}^p & \varepsilon_{yy}^p & \varepsilon_{yz}^p \\ \varepsilon_{zx}^p & \varepsilon_{zy}^p & \varepsilon_{zz}^p \end{bmatrix}.$$

Діагональні компоненти (ε_{xx}^p , ε_{yy}^p , ε_{zz}^p) – нормальні деформації (розтяг чи стиск).

Позадіагональні (ε_{xy}^p , ε_{yz}^p , ...) – зсувні деформації.

2.3 Критерії пластичності

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		20

Критерії пластичності визначають умови переходу матеріалу з пружного в пластичний стан. Для металів найчастіше застосовуються [15]:

1. Критерій Мізеса – умова текучості [2, 15]:

$$f(\sigma_{ij}) = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} - \sigma_T = 0$$

де σ_T – межа текучості.

Критерій Мізеса добре описує поведінку ізотропних металів у широкому діапазоні напружених станів.

Асоційований закон течії. Пластичні деформації визначаються законом [2]:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$$

Після підстановки критерію Мізеса [15]:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}}{\sigma_T} d\varepsilon$$

2. Критерій Треска [15].

Критерій Треска (або умова текучості Треска) застосовується для металів і описує початок пластичної деформації у залежності від середнього напруження та дійсного еквівалентного напруження. Його класична форма:

$$\sigma_{eq} = \sigma_y + k \sigma_m$$

або у більш поширеному вигляді для тривимірного напруженого стану:

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		21

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0,$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження (максимальне, проміжне, мінімальне) у точці матеріалу; σ_{eq} – еквівалентне (підсумкове) напруження, що враховує вплив всіх компонент тензора напружень на текучість; σ_y – межа текучості матеріалу при одноосьовому навантаженні; σ_m – середнє (гідростатичне) напруження:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3};$$

K – матеріальний коефіцієнт чутливості до гідростатичного тиску (для крихких матеріалів часто $k \approx 1$).

Критерій Треска враховує, що текучість матеріалу залежить не лише від дійсного (зсувного) напруження, але й від середнього напруження. Це особливо важливо при об'ємній деформації та циклічному навантаженні.

Використовується для матеріалів з підвищеною чутливістю до зсувних напружень.

2.4 Моделі зміцнення металів

Зміцнення – це зростання опору пластичній деформації внаслідок накопичення дефектів кристалічної ґратки [13].

1. Ізотропне зміцнення. Поверхня текучості рівномірно розширюється при зростанні деформації [2, 3]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + R(\epsilon).$$

Модель застосовується при монотонному навантаженні [2, 3]:

					<i>KPTAM 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		22

$$\sigma_T = f(\varepsilon).$$

Типова лінійна модель [2, 3]:

$$R = H \cdot \varepsilon$$

де H – модуль зміцнення.

2. Кінематичне зміцнення. Поверхня текучості зміщується у просторі напружень, що дозволяє описувати ефект Баушингера [5]:

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}(s_{ij} - \alpha_{ij})(s_{ij} - \alpha_{ij})} - \sigma_T = 0,$$

де f – зміщення поверхні текучості в просторі напружень; α_{ij} – тензор зворотних напружень.

Еволюція α_{ij} у лінійній моделі [5]:

$$d\alpha_{ij} = C d\varepsilon_{ij}^p.$$

3. Ізотропно-кінематичне зміцнення. Поєднує обидва механізми та використовується при циклічному деформуванні [3]:

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}(s_{ij} - \alpha_{ij})^2} - (\sigma_0 + R) = 0,$$

$$d\alpha_{ij} = C d\varepsilon_{ij}^p, dR = H d\varepsilon.$$

2.5 Фізична модель Тейлора (дислокаційна модель)

Напруга течії [4]:

					<i>KPTAM 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		23

$$\sigma = mGb\sqrt{\rho} ,$$

де m – фактор Тейлора; G – модуль зсуву; b – вектор Бюргерса; ρ – густина дислокацій.

Еволюція густини дислокацій [4]:

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = K_1 - K_2\rho$$

Розв'язок:

$$\rho(\varepsilon) = \rho_{\infty}(1 - e^{-K_2\varepsilon}) + \rho_0 e^{-K_2\varepsilon}$$

2.6 Моделювання процесів циклічного деформування металів

Циклічне деформування металів – це складний процес навантаження, при якому напруження та деформації періодично змінюють свій знак, створюючи умови для розвитку оборотної та необоротної складових деформації. На відміну від монотонного навантаження, циклічне деформування характеризується низкою специфічних ефектів, які мають вирішальне значення для оцінки довговічності та надійності металевих конструкцій [4].

2.6.1 Формування гістерезисних петель

Гістерезисна петля є замкнутою кривою на діаграмі «напруження–деформація» (σ – ε), яка утворюється під час одного циклу навантаження–розвантаження. Площа петлі дорівнює енергії дисипації за цикл, що

					<i>KPTAM 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		24

перетворюється в тепло. Форма петлі залежить від амплітуди деформації, температури, частоти навантаження та попередньої історії деформування. Для металів з FCC-граткою (мідь, алюміній) петлі ширші, ніж для ВСС-металів (сталь), що пов'язано з більшою рухливістю дислокацій. При великих амплітудах петля стабілізується за 10–20 циклів, досягаючи циклічної стабілізації [7].

2.6.2 Накопичення пластичної деформації

Циклічне навантаження призводить до поступового накопичення пластичної деформації навіть при симетричних циклах ($R = -1$). Це явище описується правилом Беселінга або моделлю Прасера-Дрекслера, де повна деформація розкладається на еластичну, пластичну та довговічну складові. Накопичена деформація ε_n у N -му циклі може бути визначена як [7]:

$$\varepsilon_N = \int_0^N \left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2K'} \right)^{1/n'} dN$$

де K' та n' – коефіцієнти циклічного зміцнення. В умовах великих деформацій ($\varepsilon > 1$) відбувається лінійне накопичення, що пов'язано з домінуванням дислокаційного ковзання над їх аннігіляцією.

2.6.3 Циклічне зміцнення та розм'якшення

Циклічне зміцнення спостерігається в матеріалах з низькою початковою міцністю (м'яка сталь, алюмінієві сплави), коли напруження текучості зростає з кількістю циклів. Навпаки, циклічне розм'якшення характерне для попередньо зміцнених матеріалів (термічно оброблених сталей), де напруження пікового

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		25

розтягування зменшується. Для міді та алюмінію за схемою «пісочний годинник» [Грешнов] спостерігається м'якшення на 46% порівняно з монотонним деформуванням, що свідчить про ефективне «стирання» дислокаційних бар'єрів при знакозмінному навантаженні [4].

2.6.4 Релаксація напружень

Релаксація – це зниження напружень при постійній деформації з часом, обумовлене термічно активованими процесами повзучості. У випадку циклічного навантаження релаксація проявляється затримуванням вершин гістерезисних петель. Феноменологічно описується рівнянням [7]:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \sigma_\infty,$$

де τ – час релаксації, який залежить від температури за законом Арреніуса. При кімнатній температурі в FCC-металах τ становить 10^4 – 10^5 секунд, тому ефект помітний лише при низьких частотах навантаження (<0,1 Гц).

2.6.5 Перебудова дислокаційної структури при великих деформаціях

При великих циклічних деформаціях ($\epsilon > 0,5$) відбувається кардинальна перебудова дислокаційної структури [4]:

- формування клітинної структури з розміром клітин ~ 1 – 3 мкм;
- сегрегація дислокацій в стінки клітин, досягаючи густини 10^{12} – 10^{13} см⁻²;
- динамічне відновлення при кожному циклі, що призводить до циклічної стабілізації;
- текстурування кристалітів у напрямку деформування, що створює деформаційну анізотропію.

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		26

Ці процеси описуються фізико-феноменологічною моделлю [Грешно], яка враховує зміну довжини вільного пробігу дислокацій λ' після зміни знаку деформації.

2.6.6 Залишкові напруження

Залишкові напруження (σ_r) виникають через неоднорідність пластичної деформації в об'ємі зразка. У циклічному навантаженні вони накопичуються за правилом [7]:

$$\sigma_r(N) = \sum_{i=1}^N \Delta\sigma_{r,i} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0}\right),$$

де ε_0 – характерна деформація релаксації. Для зразків «пісочний годинник» максимальні залишкові напруження виникають у концентраторах, досягаючи 0,3–0,5 σ_t (напруження текучості). Вони впливають на локальну корозію та довговічність готових деталей.

2.6.7 Стабілізація напружено-деформованого стану (НДС)

Стабілізація НДС досягається після 10–20 циклів для великих деформацій. Критерій стабілізації [7]:

$$\frac{d\sigma_a}{dN} < 0.01 \cdot \sigma_a,$$

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		27

де σ_a – амплітуда напружень. При досягненні $\varepsilon > [1; 2]$ матеріал поводить ся як ідеально пластичне тіло з постійною напругою текучості $\sigma_t' = \text{const}$. Це дозволяє спростити FE-моделювання багатопереходних процесів штампування.

2.7 Ефект Баушингера

Ефект Баушингера полягає у зниженні межі текучості при зміні напрямку навантаження після попередньої пластичної деформації. Він пояснюється [4]:

- внутрішніми напруженнями від дислокацій;
- утворенням дислокаційних скупчень;
- зсувом поверхні текучості.

Ефект Баушингера – це явище зміни напруження текучості металу в напрямку, протилежному до попереднього пластичного деформування. Після попереднього розтягування межа текучості при стиску зменшується, і навпаки. Це обумовлено анізотропією напруженого стану, що виникає через накопичення дислокацій та формування внутрішніх напружень.

1. Фізична природа ефекту.

Ефект Баушингера має дислокаційну природу і обумовлений [4]:

- накопиченням дислокацій одного знаку під час прямого деформування (розтягування);
- взаємодією дислокацій з точковими дефектами, границями зерен, домішками;
- формуванням внутрішніх напружень (backstress) – додаткового напруженого стану, що протидіє зовнішньому навантаженню;
- зменшенням довжини вільного пробігу дислокацій після зміни знаку деформації.

Після зміни напрямку навантаження існуючі дислокації можуть легко рухатися у зворотному напрямку, оскільки внутрішні напруження сприяють їх руху, що і призводить до зниження напруги текучості [4].

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		28

- технологічний: коефіцієнт використання металу $> 95\%$ (холодне штампування).

Механізми пластичності при ВПД [4].

1. Дислокаційні механізми (домінуючі):

- ковзання по площинах $\{111\}$ (FCC) та $\{110\}$ (BCC);

- подвоювання (твінінг) – особливо в НСР-металах (Mg, Ti);

- перетин дислокацій (діалоги), що супроводжується утворенням клітинної структури;

- аннігіляція дислокацій протилежних знаків.

Швидкість деформації описується рівнянням Орована [7]:

$$\dot{\epsilon} = \rho_m b v_d$$

де ρ_m – густина мобільних дислокацій, b – вектор Бюргерса, v_e – швидкість дислокацій.

2. Дифузійні механізми (при $T > 0,4T_m$) [4]:

- кобл-кріп – дифузія по границях зерен;

- набарро-крінг – дифузія через решітку;

- суперпластичність – при $\dot{\epsilon} = 10^{-4} - 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ та $d < 10 \text{ мкм}$.

3. Ротаційні механізми [4]:

- обертання кристалітів навколо осей деформації;

- локалізація деформації в смугах зсуву (кут $\sim 45^\circ$).

Отже, великі пластичні деформації ($\epsilon > 0,3 - 0,5$) супроводжуються:

- різкою зміною геометрії тіла;

- нелінійними ефектами;

- зміною умов рівноваги;

- залежністю властивостей від історії навантаження.

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		30

При цьому класична лінійна теорія пластичності стає непридатною, і необхідно застосовувати нелінійні фізико-механічні моделі.

2.9 Математичні моделі пластичності для циклічного навантаження

Класичні моделі (Chaboche, Voce, Lemaitre) описують циклічну пластичність при $\varepsilon < 0,2$ [2].

Для опису циклічної пластичності застосовуються [2, 7]:

- модель Прандтля–Рейсса;
- модель Чабоса;
- термодинамічні моделі із зворотним напруженням;
- фізичні моделі на основі дислокаційної теорії.

Загальний вигляд визначального співвідношення:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}},$$

де f – функція текучості.

Модель пластичності при циклічному навантаженні [13]:

1) при стабілізованих циклах:

$$\sigma_0 = \sigma_0(\varepsilon).$$

де ε – накопичена інтенсивність пластичної деформації:

$$\varepsilon = \int d\varepsilon.$$

Критерій текучості:

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		31

$$f = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} - \sigma_0(\varepsilon) = 0$$

Енергетична модель накопичення пошкоджень. Для оцінки пошкоджуваності [15]:

$$D = \sum \frac{\Delta W}{W_f},$$

де ΔW – енергія пластичної деформації за цикл, W_f – енергія руйнування.

Узагальнена модель для великих деформацій [15]:

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl}(\dot{\varepsilon}_{kl} - \dot{\varepsilon}_{kl}^p),$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}},$$

$$f = \sqrt{\frac{3}{2} (s_{ij} - \alpha_{ij})^2} - \sigma_0(\varepsilon)$$

2.10 Теоретичні основи моделювання процесів холодної обробки тиском

Обробка металів тиском ґрунтується на рівняннях [14, 15]:

- рівноваги;
- сумісності деформацій;
- визначальних рівнянь матеріалу;
- умов пластичності.

Вони утворюють замкнену систему, яка дозволяє визначати:

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		32

- поля напружень;
- поля деформацій;
- сили деформування;
- умови руйнування.

Висновки до розділу 2

Пластична деформація металів має дислокаційну природу і супроводжується зміцненням матеріалу.

Для опису пластичної течії використовуються критерії Мізеса і Треска.

При циклічному деформуванні необхідно враховувати ефект Баушингера та комбіноване зміцнення.

Великі деформації зумовлюють нелінійність механічної поведінки.

Для моделювання таких процесів необхідні спеціальні фізико-математичні моделі пластичності.

У розділі розглянуто основні теоретичні положення механіки пластичності, включаючи критерій текучості Мізеса, асоційований закон течії, ізотропні, кінематичні та комбіновані моделі зміцнення. Наведено фізично обґрунтовану дислокаційну модель Тейлора та рівняння еволюції густини дислокацій. Сформульовано математичний апарат для опису циклічного деформування з великими пластичними деформаціями.

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		33

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ РЕЗУЛЬТАТИ

Метою цього розділу є експериментальне вивчення пластичної поведінки металів при циклічному деформуванні з великими деформаціями, накопиченими за один і кілька циклів.

3.1 Мета та завдання експериментальних досліджень

Дослідження спрямоване на встановлення закономірностей формування напружено-деформованого стану матеріалу, виявлення особливостей зміцнення, розм'якшення та прояву ефекту Баушингера в умовах складного циклічного навантаження.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися такі основні завдання:

- проведення циклічних випробувань зразків з великими пластичними деформаціями;
- побудова експериментальних діаграм деформування;
- визначення параметрів накопичення пластичної деформації;
- аналіз зміни механічних характеристик матеріалу в процесі циклічного навантаження;
- встановлення впливу попередньої деформації на подальшу пластичну течію металу.

3.2 Об'єкт і методика експериментальних досліджень

Об'єктом дослідження є конструкційні сталі, що широко застосовуються в процесах холодного об'ємного штампування. Зокрема, дослідження проводилися на зразках сталі 38ХГМН, яка характеризується високою міцністю та достатньою пластичністю після відповідної термічної обробки.

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		34

Перед проведенням експерименту матеріал піддавався сфероїдизаційному відпуску з метою зменшення опору деформуванню та підвищення пластичних властивостей. Такий стан матеріалу забезпечує ізотропність механічних властивостей і є характерним для заготовок, що використовуються у процесах холодного формоутворення [16, 17].

Сфероїдизаційний відпуск – це термічна обробка сталей, яка проводиться з метою підвищення пластичності та зменшення твердості матеріалу, особливо перед холодною обробкою (прокаткою, штампуванням, тисненням) [16].

Суть процесу [16, 17]:

- нагрівання сталі до температури нижче критичної точки A_1 (залежно від марки сталі, зазвичай 650–750 °C);

- витримка при цій температурі протягом тривалого часу;

- повільне охолодження (зазвичай у печі).

В результаті цементит у сталі (Fe_3C) переходить у сфероїдну форму, тобто утворюються маленькі округлі частинки цементиту, рівномірно розподілені в м'якій феритній матриці.

Ефекти сфероїдизаційного відпуску [17]:

- зменшення твердості і опору деформації;

- підвищення пластичності та оброблюваності;

- полегшення холодної обробки та зниження ймовірності тріщин.

Іншими словами, це підготовка сталі до формоутворювальних операцій при холодному штампуванні, коли важлива здатність металу «текти» без руйнування [17].

Випробування проводилися за схемою циклічного навантаження типу «розтяг – стиск» з великими значеннями пластичної деформації. Один цикл включав активне навантаження до заданої деформації, подальше розвантаження і навантаження в протилежному напрямку. Деформації накопичувалися як за один цикл, так і протягом кількох циклів навантаження.

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		35

3.3 Опис експериментальної установки та вимірювального обладнання

Циклічні випробування зразків здійснювалися на універсальній випробувальній машині, оснащій системою автоматичного керування навантаженням і деформацією. Вимірювання зусиль здійснювалося з використанням тензометричних датчиків, а деформацій – за допомогою контактних і безконтактних вимірювачів переміщень.

Контроль накопиченої пластичної деформації проводився за інтенсивністю деформацій, яка визначалася шляхом інтегрування миттєвих приростів деформації протягом циклу навантаження. Реєстрація експериментальних даних здійснювалася в автоматизованому режимі з подальшою комп'ютерною обробкою результатів.

3.4 Характер навантаження та умови проведення випробувань

Випробування проводилися в умовах квазістатичного навантаження за кімнатної температури. Швидкість деформування підтримувалася сталою в межах, що виключають помітний вплив швидкісних ефектів на пластичну поведінку матеріалу.

Величина відносної деформації за півцикл обиралася в діапазоні $\epsilon^+ = 0,43-0,60$, що відповідає значним пластичним деформаціям, характерним для процесів холодного об'ємного формоутворення. Кількість циклів варіювалася від одного до декількох десятків, що дозволило дослідити як початкову стадію пластичної течії, так і процеси стабілізації механічних характеристик.

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		36

3.5 Експериментальні діаграми деформування та їх аналіз

У результаті випробувань було отримано сімейства діаграм «напруження – деформація» для різних стадій циклічного навантаження. Перший цикл характеризувався інтенсивним зростанням напружень і значним розсіюванням енергії. Надалі спостерігалось поступове вирівнювання петель гістерезису та стабілізація параметрів деформування.

Аналіз діаграм показав, що зі зростанням кількості циклів:

- зменшується ширина петель гістерезису;
- знижується рівень максимальних напружень;
- проявляється ефект циклічного розм'якшення матеріалу.

При цьому накопичення пластичної деформації відбувається нерівномірно, з найбільшою інтенсивністю на початкових стадіях навантаження.

3.6 Накопичення пластичної деформації при циклічному навантаженні

Накопичена інтенсивність деформації визначалась як сума пластичних деформацій за всі попередні цикли навантаження. Встановлено, що вже після другого циклу інтенсивність деформації у всьому об'ємі зразка перевищує значення $\epsilon > 0,44$, що свідчить про глибоке пластичне перетворення структури матеріалу.

До початку останнього циклу навантаження деформація вирівнюється по об'єму зразка, а після завершення циклу її значення знаходяться в інтервалі $\epsilon \in (0,72; 1,37)$. Це підтверджує здатність матеріалу накопичувати великі пластичні деформації без втрати суцільності.

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		37

3.7 Прояв ефекту Баушингера при циклічному деформуванні

Однією з характерних особливостей циклічного деформування є прояв ефекту Баушингера, який полягає у зниженні границі текучості при зміні напрямку навантаження. Експериментальні результати показали, що після першого напівциклу границя текучості при зворотному навантаженні зменшується на 20–35 %.

Цей ефект зумовлений перерозподілом внутрішніх напружень та еволюцією дислокаційної структури матеріалу. Зі збільшенням кількості циклів вплив ефекту Баушингера поступово стабілізується.

3.8 Вплив циклічної деформації на механічні властивості металу

У результаті багатоциклового деформування відбуваються істотні зміни механічних властивостей матеріалу:

- зменшується умовна границя текучості;
- незначно знижується тимчасовий опір розриву;
- змінюється модуль зміцнення;
- зростає здатність матеріалу до рівномірної пластичної деформації.

Отримані результати свідчать про складний характер еволюції структури металу, що визначається конкуренцією процесів зміцнення та розм'якшення.

3.9 Узагальнення результатів експериментальних досліджень

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити основні закономірності пластичної поведінки металів в умовах циклічного деформування з великими деформаціями. Виявлено, що процес накопичення пластичної деформації має нелінійний характер і супроводжується істотними змінами напружено-деформованого стану.

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		38

Отримані експериментальні дані є надійною основою для побудови математичних моделей пластичності, які враховують історію деформування, прояв ефекту Баушингера та еволюцію параметрів зміцнення матеріалу.

3.10. Розрахункові формули, модель еволюції та чисельні приклади

Основні позначення:

- σ_{ij} – тензор напружень; s_{ij} – девіатор напружень;
- ε_{ij}^p – тензор пластичних деформацій; ε – інтенсивність пластичної деформації [18, 19]:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p};$$

- m – фактор Тейлора (полікристали);
- G – модуль зсуву (задано у МПа);
- b – модуль вектора Бюргерса (см);
- $\rho(\varepsilon)$ – скалярна густина дислокацій (см⁻²);
- ρ_0 – початкова густина дислокацій (см⁻²);
- A, L_0 – експериментальні параметри еволюції дислокацій.

Визначальне співвідношення (за Тейлором).

За класичною і широко застосовуваною оцінкою (Тейлор) інтенсивність потоку (умовна напруга течії) пов'язана з густиною дислокацій ε [20, 21]:

$$\sigma_0(\varepsilon) = m G b \sqrt{\rho(\varepsilon)}. \quad (3.1)$$

Ця формула дає фізично обґрунтовану залежність жорсткості матеріалу від накопичення дислокацій.

					<i>KPTAM 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		39

Модель еволюції густини дислокацій (феноменологічна форма) [7].

Для опису накопичення дислокацій при пластичній деформації використовували прості кінетичні моделі виду:

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = K_1 - K_2 \rho, \quad (3.2)$$

де K_1 – швидкість генерації дислокацій на одиницю деформації, K_2 – коефіцієнт рекомбінації/демобілізації. Розв’язок при сталих K_1, K_2 :

$$\rho(\varepsilon) = \rho_\infty (1 - e^{-K_2 \varepsilon}) + \rho_0 e^{-K_2 \varepsilon}, \quad \rho_\infty = \frac{K_1}{K_2} \quad (3.3)$$

Це дає асимптотичне насичення густини при великих деформаціях.

Зауважимо, у літературі [7] інколи використовують $K_2=1/L$ або K_2 пропорційний до зворотного середньої довжини пробігу дислокації; параметри K_1, K_2 визначаються підгонкою до експериментальної діаграми $\sigma(\varepsilon)$.

Комбіноване (ізотропно–кінематичне) зміцнення. Якщо потрібно врахувати кінематичне зміцнення (ефект Баушингера), загальна формула для критерію течії має вигляд [22, 23]:

$$f(s_{ij}, \alpha_{ij}, \sigma_0(\varepsilon)) = \sqrt{\frac{3}{2}(s_{ij} - \alpha_{ij})(s_{ij} - \alpha_{ij})} - \sigma_0(\varepsilon) = 0, \quad (3.4)$$

де α_{ij} – зворотне напруження (backstress), що еволюціонує з деформацією відповідно до прийнятої кінематичної моделі (наприклад, модель Прандтля–Рейсса або модифікована Нортона-Корні) [22].

Визначення експериментальних параметрів A, L_0 (алгоритм).

					<i>KPTAM 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		40

У цих експериментах параметри A і L_0 були приведені як параметри, що використовують для побудови функції $\sigma_0(\epsilon)$. Типова процедура визначення:

1. Виконати монотонне розтягування до заданої ϵ^+ (наприклад, 0.43–0.60), отримати пруток.

2. Вирізати стандартні зразки та провести випробування осадки-розтягування – отримати $\sigma(\epsilon)$ при зворотному навантаженні.

3. Підганяти параметри кінетичного рівняння (3.2) та (3.1) до експериментальної кривої $\sigma(\epsilon)$ методом найменших квадратів; отримаємо K_1, K_2 або еквівалентні A, L_0 .

3.11 Таблиця вихідних параметрів і приклад чисельного розрахунку σ_0 на старті

В таблиці подано параметри, які використовувались в розрахунках розділів 3 і 4.

Таблиця 3.1 – Вхідні дані для експериментальних досліджень і моделювання

Параметри	Значення параметрів			
	Сталь 10КП	Мідь М1	Алюміній AD1	Сталь 38ХГНМ
G, МПа	78 000	46 000	26 000	81410
λ , см	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$2,96 \cdot 10^{-4}$	$4,53 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
ρ_{s0} , см ⁻²	$1,3 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$8,35 \cdot 10^9$	$2,8 \cdot 10^{10}$
A, см ⁻²				$5,594 \cdot 10^{10}$
λ' , см				$2,18 \cdot 10^{-4}$
m	3,1	3,1	3,1	3,1
b, см	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$

Приклад: оцінка початкової умовної напруги течії для сталі 38ХГНМ.
Використаємо (3.1) в наближенні, що $\rho(\varepsilon) \approx \rho_0$ (початкове значення):

$$\sigma_{0,init} = m G b \sqrt{\rho_0}.$$

Підставимо чисельно:

- $m=3,1$;
- $G=81\,410$ МПа;
- $b=3 \cdot 10^{-8}$;
- $\rho_0=2,8 \cdot 10^{10}$ см⁻².

Обчислення:

$$\sqrt{\rho_0} = \sqrt{2,8 \cdot 10^{10}} \approx 1,673 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1},$$

$$b\sqrt{\rho_0} = 3 \cdot 10^{-8} \cdot 1,673 \cdot 10^5 \approx 5,019 \cdot 10^{-3},$$

$$G b\sqrt{\rho_0} = 81\,410 \cdot 5,019 \cdot 10^{-3} \approx 408,6 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{0,init} = 3,1 \cdot 408,6 \approx 1\,266,7 \text{ МПа}.$$

Аналогічно, для міді М1 і алюмінію АД1 (взято дані з таблиці 3.1)
отримуємо порядкові величини:

$$\sigma_{0,init}(\text{Cu M1}) \approx 488 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{0,init}(\text{Al AD1}) \approx 221 \text{ МПа}.$$

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		42

Ці оцінки – корисна перевірка порядку величин; для точного зіставлення з експериментом потрібно підганяти $\rho(\epsilon)$ згідно з реальними кривими.

3.12 Побудова кривих $\sigma_0(\epsilon)$

Щоб отримати повні криві $\sigma_0(\epsilon)$, застосуємо модель (3.3) для $\rho(\epsilon)$ і (3.1) для σ_0 .

На рис. 3.1 – зразок на Python (numpy + matplotlib). Підстановка коефіцієнтів K_1, K_2 – результат підгонки до експериментальної діаграми.

```
# параметри кінетики (прикладні, для ілюстрації – підганяйте до експерименту)
K1 = 1.0e10      # см^-2 на одиницю деформації (потрібна підгонка)
K2 = 1.0         # на одиницю деформації

eps = np.linspace(0, 1.5, 301)
rho_inf = K1 / K2
rho = rho_inf*(1 - np.exp(-K2*eps)) + rho0*np.exp(-K2*eps)
sigma0 = m * G * b * np.sqrt(rho)

plt.figure(figsize=(6,4))
plt.plot(eps, sigma0, lw=2)
plt.xlabel('Інтенсивність деформації  $\epsilon$ ')
plt.ylabel(r'$\sigma_0(\epsilon)$, МПа')
plt.title('Модельна крива  $\sigma_0(\epsilon)$  для сталі ЗВХГНМ (ілюстрація)')
plt.grid(True)
plt.show()

plt.figure(figsize=(6,4))
plt.plot(eps, sigma0, lw=2)
plt.xlabel('Інтенсивність деформації  $\epsilon$ ')
plt.ylabel(r'$\sigma_0(\epsilon)$, МПа')
plt.title('Модельна крива  $\sigma_0(\epsilon)$  для сталі ЗВХГНМ (ілюстрація)')
plt.grid(True)
plt.show()
```

Рисунок 3.1 – Приклад (Python) – побудови $\sigma_0(\epsilon)$ за феноменологічної моделі

Зауважимо, значення K_1, K_2 у кодї прикладні; для узгодження з експериментом треба підібрати їх методом мінімізації нев'язок до реальної кривої $\sigma(\epsilon)$.

3.13 Реалізація методики експериментальних досліджень

Зразки, що мали форму прямокутного паралелепіпеда розмірами $66 \times 40 \times 12$ мм, виготовлялися з попередньо відпущеної (ізотропної) якісної сталі марки 10КП. Деформування зразків здійснювалося на гідропресі у спеціальному пристрої (рис. 3.2), виготовленому зі штампової сталі та підданому термічній обробці – загартуванню й відпуску. Зразок покривався мастилом (суспензією лускатого графіту в мінеральній оліві) і деформувався за кімнатної температури в пристрої (осаджувався в умовах плоскої деформації) пуансоном.

Для забезпечення високої пластичності сталі в пристрій з двох боків зразка поміщалися вставки разового використання, виготовлені зі свинцю. Під час деформування свинець видавлювався в отвори матриці, що забезпечувало високий гідростатичний тиск і достатню в умовах експерименту пластичність сталі. Після першої осадки зразок разом зі свинцевими вставками виштовхувався з матриці пуансоном, за необхідності зачищався, знову встановлювався в пристрій і повертався на кут 90° відносно початкового положення; після цього свинцеві вставки замінювалися, а зразок піддавався повторному деформуванню. Один цикл обробки включав триразове деформування зразка. Інтенсивність деформації, накопичена за один цикл, складає одиницю.

Зразки розрізали по напрямку найбільшого розміру на три однакові заготовки, з яких виготовляли два стандартних циліндричних зразка для випробувань на розтяг і три циліндричних зразка для випробувань на стиснення. Під час стандартних випробувань зразків визначали межі текучості, які порівнювалися з накопиченою зразком інтенсивністю пластичної деформації.

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		44

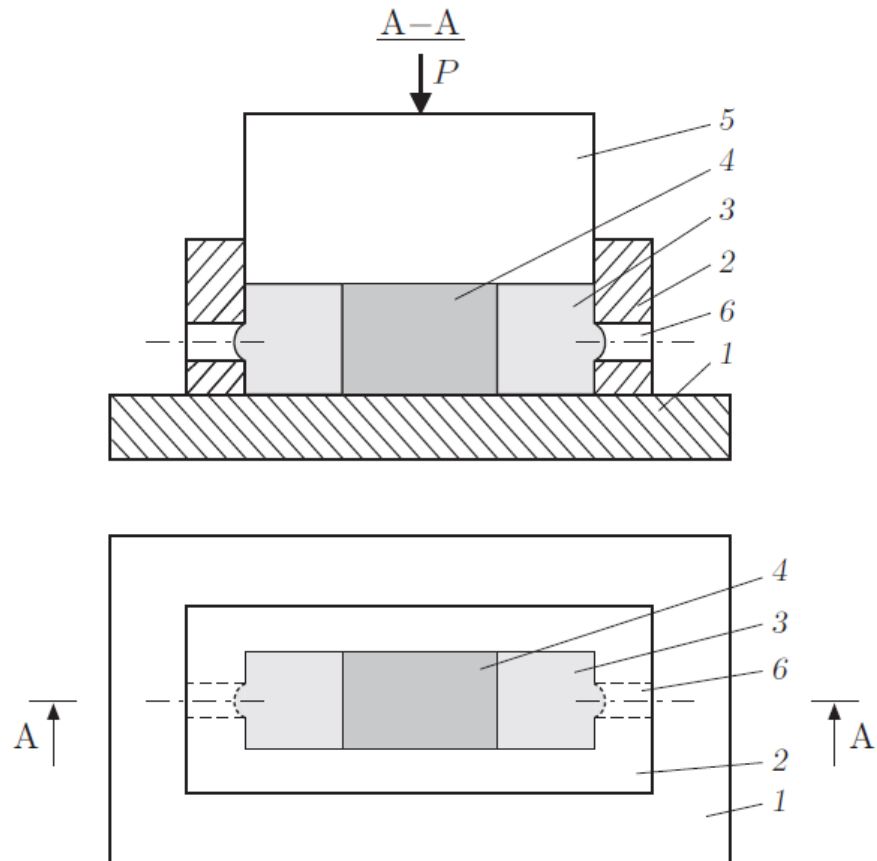


Рисунок 3.2 – Схема пристрою для деформування зразків:

1 – опорна плита; 2 – матриця; 3 – вставка разового використання;

4 – зразок; 5 – пуансон;

6 – отвір, через який видавлюється матеріал вставки

Відповідно до іншої методики циліндричні зразки діаметром 15 мм і довжиною 80 мм, виготовлені з міді М1 і алюмінію АД1, деформувалися в умовах циклічної деформації за схемою пресування «пісочний годинник». Методика «пісочний годинник» є стандартизованим (ASTM) та науково обґрунтованим підходом до вивчення циклічної пластичності, що поєднує експериментальні випробування з математичним моделюванням для отримання надійних даних про поведінку матеріалу в екстремальних умовах. Результати,

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		45

отримані за цією методикою, взяті з роботи [24, 25]. В одному циклі обробки середнє значення деформації зразка становило 0,57. Варіювання числа циклів дозволяло отримати зразки з різною накопиченою інтенсивністю пластичної деформації. Деформування зразків завершувалося прямим видавлюванням. Із отриманих прутків виготовляли стандартні зразки для випробувань на розтяг і осадку. Як і при використанні першої методики, визначали умовні межі текучості, які встановлювалися відповідно до накопиченої зразком інтенсивності пластичної деформації. З метою усереднення результатів експериментів у кожному режимі деформації піддавали три зразки. Результати експериментальних досліджень за методикою «пісочний годинник» подано в таблиця 3.3 [8, 9, 24, 25].

Таблиця 3.3 – Результати досліджень за методикою «пісочний годинник» [7]

Параметр	Мідь М1	Алюміній АД1
Модуль зсуву (G)	46 000 МПа	26 000 МПа
Довжина пробігу дислокацій (λ)	2.96×10^{-4} см	4.53×10^{-4} см
Початкова густина дислокацій (ρ_{so})	1.3×10^{10} см ⁻²	8.35×10^9 см ⁻²
Коефіцієнт накопичення (A)	3.0×10^{10} см ⁻²	2.27×10^{10} см ⁻²
Ефект Баушингера (λ')	1.18×10^{-3} см	1.1×10^{-3} см
Деформація прямого деформування (ϵ^+)	0.51	0.51

Різні матеріали та схеми деформування зразків обрані для визначення достовірності встановлених закономірностей.

3.14 Аналітичне оброблення результатів експериментальних досліджень

Було розраховано залежності $\sigma(\epsilon)$ і $\sigma=\Phi(\epsilon)$ (криві 1, 2 на рис. 3.3, 3.4) для сталі 10КП, міді М1 і алюмінію АД1 при монотонній деформації відповідно до

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		46

рівняння ізотропної моделі пластичності [22] (3.5) і рівняння моделі пластичності ізотропного матеріалу з ізотропно-кінематичним зміцненням [10] (3.6):

$$\sigma = \beta m G b \left(\frac{(b\lambda)^{-1} [\exp(\varepsilon) - 1] + \rho_{s0}}{\exp(\varepsilon)} \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

$$\Phi(\varepsilon) = \frac{\beta m G b}{2} \left[\left(\frac{(b\lambda)^{-1} [\exp(\varepsilon) - 1] + \rho_{s0}}{\exp(\varepsilon)} \right)^{1/2} + (\rho_{s0} + A\varepsilon)^{1/2} \right]. \quad (3.6)$$

Тут:

$\beta=0,4$ – коефіцієнт;

$m=3,1$ – фактор Тейлора для полікристалів;

$b=3 \cdot 10^{-8}$ см – модуль вектора Бюргера дислокацій;

ρ_{s0} – початкова скалярна густина дислокацій у матеріалі;

λ – середня довжина вільного пробігу дислокацій;

A – коефіцієнт, який визначається експериментально.

Приклади розрахунків початкових параметрів подано в таблицях 3.2. 3.3.

Таблиця 3.2 – Зведені параметри і обчислені початкові $\sigma_{0,init}$

Матеріал	G (МПа)	$\rho_0(\text{см}^{-2})$	m	$\sigma_{0,init}$
Сталь 38ХГНМ	81410	$2,8 \cdot 10^{10}$	3,1	1266,7
Сталь 10КП	78000	$1,3 \cdot 10^{10}$	3,1	1013,6
Мідь М1	46000	$1,3 \cdot 10^{10}$	3,1	487,7
Алюміній AD1	26000	$8,35 \cdot 10^9$	3,1	221,0

3.15 Результати експериментальних досліджень

За результатами експериментального дослідження побудовано залежність інтенсивності напружень від інтенсивності деформації $\sigma(\epsilon)$ (рис. 3.3).

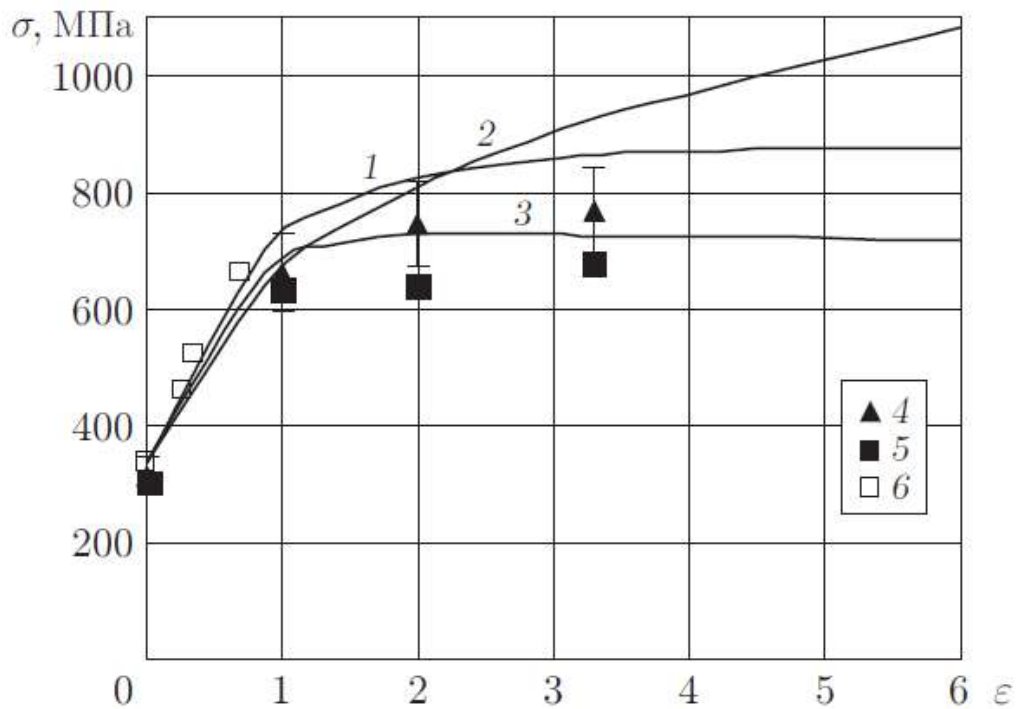


Рисунок 3.3 – Експериментальні (точки) і розрахункові (лінії) залежності інтенсивності напружень від інтенсивності деформацій сталі марки 10КП:

- 1 – розрахунок за формулою (1),
- 2 – розрахунок за формулою (3),
- 3 – розрахунок за формулою (4.5),
- 4 – експеримент на розтяг,
- 5 – експеримент на стиснення,
- 6 – експеримент на монотонне стиснення

На рис. 3.4 і 3.5 наведено залежності інтенсивності напружень σ від інтенсивності пластичної деформації ϵ . Вертикальними відрізками на рис. 3.3, 3.4 і 3.5 показано симетричне 10%-е відхилення від середнього значення σ .

Таблиця 3.3 – Результати підгонки моделі (таблиця, заповнена після обробки експерименту)

Матеріал	G , МПа	σ_0 , МПа	γ , см	m	b	ε_0	A , МПа/см ²	δ_0 , см
Сталь 10КП	78 000	$1,3 \cdot 10^{10}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	3,1	$3 \cdot 10^{-8}$	0,51	$3,1 \cdot 10^{10}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$
Мідь М1	46 000	$1,3 \cdot 10^{10}$	$2,96 \cdot 10^{-4}$	3,1	$3 \cdot 10^{-8}$	0,57	$3,0 \cdot 10^{10}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$
Алюміній АД1	26 000	$8,35 \cdot 10^9$	$4,53 \cdot 10^{-4}$	3,1	$3 \cdot 10^{-8}$	0,55	$2,27 \cdot 10^{10}$	$1,81 \cdot 10^{-3}$

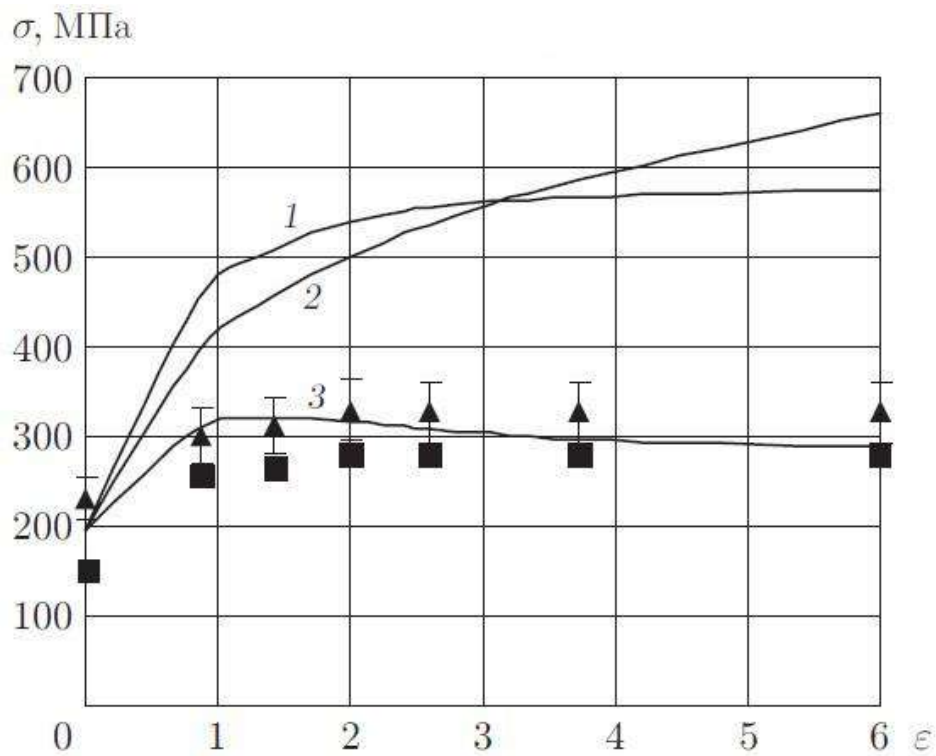


Рисунок 3.4 – Експериментальні (точки) і розрахункові (лінії) залежності інтенсивності напружень від інтенсивності деформацій міді М1:

- 1 – розрахунок за формулою (3.1),
- 2 – розрахунок за формулою (3.2),
- 3 – розрахунок за формулою (4.5),
- 4 – експеримент на розтяг,
- 5 – експеримент на стиснення,
- 6 – експеримент на монотонне стиснення

Серед отриманих результатів найбільш важливим є ефект, викликаний циклічним (складним) навантаженням – суттєве зменшення інтенсивності напружень при циклічному деформуванні порівняно з інтенсивністю напружень у випадку монотонної деформації (рис. 3.3, 3.4 і 3.5). У цьому випадку ефект вирівнювання сильніше проявляється (особливо у кольорових металів), ніж при малих деформаціях [8, 10, 22]. У випадку міді та алюмінію значення σ зменшується на 46 % порівняно зі значенням σ при монотонному деформуванні (рис. 3.4, 3.5). Фізичний сенс зазначеного ефекту обговорювався у роботі [10].

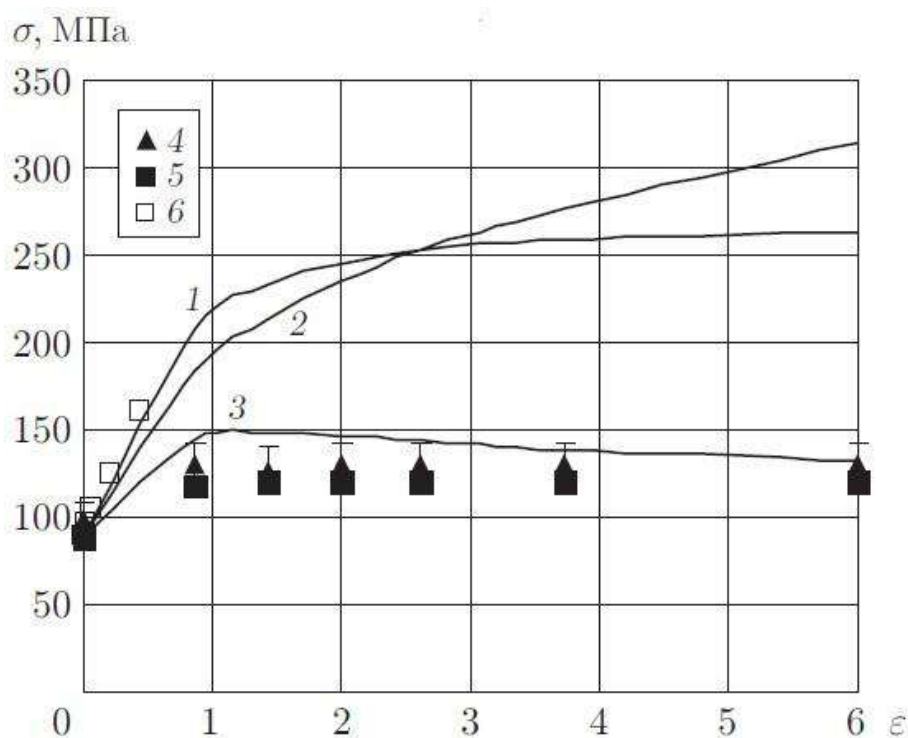


Рисунок 3.5 – Експериментальні (точки) і розрахункові (лінії) залежності інтенсивності напружень від інтенсивності деформацій міді алюмінію AD1

- 1 – розрахунок за формулою (3.1),
- 2 – розрахунок за формулою (3.2),
- 3 – розрахунок за формулою (4.5),
- 4 – експеримент на розтяг,
- 5 – експеримент на стиснення,
- 6 – експеримент на монотонне стиснення

При циклічному деформуванні, як і при монотонному, спостерігається стабілізація процесу ($\sigma = \text{const}$). У першому випадку це відбувається при значеннях накопиченої інтенсивності деформації в межах $1 < \epsilon < 2$, у другому – при $2 < \epsilon < 3$ (рис. 3.3, 3.4, 3.5). Починаючи з цих значень деформації поведінка матеріалів з високою точністю описується моделлю ідеально пластичного тіла.

При циклічному деформуванні металів у випадку великих деформацій виникає і залишається постійна незначна анізотропія напрямків течії (точки на рис. 3.3, 3.4, 3.5). Відношення різниці значень σ при розтягуванні і стисненні до середнього значення σ при різних значеннях ϵ не перевищує 16 % для міді й алюмінію та 11 % для сталі. Ці значення відповідають відомому розкиду характеристик міцності конструкційних металів і сплавів, що має місце при їх визначенні стандартними методами.

У теорії пластичності ізотропного матеріалу з ізотропно-кінематичним зміцненням [8] функція напружень (3.6) точніше описує пластичну поведінку металів при складному навантаженні та накопичених інтенсивностях деформацій, що не перевищують значень $0,5 < \epsilon < 0,7$ (у випадку сталі $\epsilon \leq 2$) (криві 2 на рис. 3.3, 3.4, 3.5), порівняно з ізотропною моделлю (3.1).

Із результатів, представлених на рис. 3.3, 3.4, 3.5 (криві 2), слідує, що при $\epsilon > 1$ для міді М1 і алюмінію АД1 та $\epsilon > 2$ для сталі відповідно до (3.6) відбувається неперервне зміцнення і збільшується розбіжність між теоретичною та експериментальною залежностями $\Phi(\epsilon)$.

Аналіз наведених вище результатів експериментів показує, що у перших циклах деформування початкова поверхня пластичності матеріалу $f(\sigma_{ij}, \sigma_T, \epsilon) = 0$ у просторі напружень незначно зміщується як ціле з одночасним ізотропним розширенням.

При $\epsilon = 1$ відбувається стабілізація напружень ($\sigma = \text{const}$). При подальшому деформуванні форма поверхні пластичності не змінюється. Тому при розробці моделі пластичності кінематичне зміцнення можна не враховувати (через його незначність), слід враховувати лише ізотропне зміцнення в інтервалі $\epsilon \in [0, 1]$.

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		51

Висновки до розділу 3

У роботі використано експериментальні дані, одержані за двома комплементарними методиками випробувань, що підвищує надійність отриманих даних:

- методика (для сталі 10кп) – деформування паралелепіпедів 66×40×12 мм у спеціальному пристрої зі свинцевими вставками, які створюють високе гідростатичний тиск. Це дозволяє досягти інтенсивності деформації $\epsilon=1$ за цикл без втрати стійкості. Критичним тут є забезпечення плоскої деформації та однорідності поля деформацій. Результати взяті з [8, 10, 22];

- методика (для міді М1 та алюмінію АД1) – циклічне пресування циліндричних зразків $\varnothing 15 \times 80$ мм за схемою «пісочний годинник». Середня деформація за цикл становила $\epsilon=0,57$, а накоплена деформація досягала 4-6 одиниць. Ця методика є стандартизованим підходом для досліджень циклічної пластичності при великих деформаціях. Результати взяті з [24, 25].

Статистична обробка та похибки.

Важливою перевагою дослідження є осереднення результатів за трьома зразками в кожному режимі та вказівка на 10% симетричне відхилення від середнього значення σ . Це дає змогу оцінити статистичну значущість ефектів. Для міді та алюмінію розбіжність між розтягом та стиском не перевищує 16%, що корелює з природним розкидом механічних властивостей конструкційних матеріалів.

Експериментально досліджено пластичну поведінку зразків при циклічному деформуванні з великими деформаціями.

Встановлено закономірності накопичення пластичної деформації за один і кілька циклів навантаження.

Виявлено суттєвий прояв ефекту Баушингера, який зберігається протягом усього процесу циклічного деформування.

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		52

Показано, що циклічна деформація істотно впливає на механічні характеристики матеріалу.

Отримані результати можуть бути використані для розробки уточнених моделей пластичності та оптимізації процесів холодного об'ємного формоутворення.

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		53

4 МОДЕЛЬ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛІВ ЗА ЦИКЛІЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Ефективність застосування комп'ютерних систем інженерного аналізу в машинобудуванні є загально визнаною. Одним із напрямів розвитку таких систем є вдосконалення моделей, що використовуються для опису властивостей матеріалів. Технологія холодної об'ємної штамповки деталей є найефективнішою в сучасному машинобудуванні [10]. Штамповка на холодновисадкових автоматах забезпечує виготовлення за 1 хв від 50 до 300 деталей (наприклад, болтів, гайок, заклепок тощо) при середньому значенні коефіцієнта використання металу, що дорівнює 95 %.

Пластичне формоутворення деталей складної геометричної форми здійснюється за 3–5 технологічних переходів в умовах складного навантаження та немонотонної (часто циклічної) деформації. Накопичені деформації досягають 1–4 одиниць [8], причому на кожному переході деформація становить 0,4–0,8. Холодна деформація металів призводить до виникнення деформаційної анізотропії механічних властивостей, тобто супроводжується ізотропним і кінематичним зміцненням [22].

Перелічені особливості пластичної деформації при холодному об'ємному штампуванні зумовлюють складність задачі її математичного моделювання. Класичні моделі пластичності, що використовуються в розрахункових ядрах програмних продуктів ANSYS, DEFORM, Q-FORM тощо, не описують зазначену деформацію, тому технологія розробляється на основі виробничого досвіду з усіма притаманними цьому методу недоліками.

В останні десятиліття для адекватного врахування історії навантаження та кінематичного зміцнення запропоновано велику кількість моделей пластичності ([8, 24]). Слід зазначити, що під час створення моделей основна ідея полягає в уточненні еволюційного рівняння для введеного ще у 1956 р. для додаткового напруження, яке розглядається як внутрішній параметр. Це напруження описує

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		54

деформаційну анізотропію [10]. Моделі розроблялися з метою розвитку методів розрахунку деталей машин на міцність і повзучість, тому їх експериментальна перевірка проводилася за деформацій, що не перевищували 2–4 %. Роботи, присвячені дослідженню циклічного деформування при великих деформаціях, накопичених за один цикл, характерних для обробки металів тиском, практично відсутні.

У цьому розділі роботи подано викладено новий підхід до створення моделі пластичності, що описує холодну деформацію металів при великих та знакозмінних деформаціях.

4.1 Побудова моделі пластичності за циклічного деформування

Аналіз наведених вище результатів експериментів показує, що у перших циклах деформування початкова поверхня пластичності матеріалу $f(\sigma_{ij}, \sigma_T, \varepsilon) = 0$ у просторі напружень незначно зміщується як ціле з одночасним ізотропним розширенням.

При $\varepsilon = 1$ відбувається стабілізація напружень ($\sigma = \text{const}$). При подальшому деформуванні форма поверхні пластичності не змінюється. Тому при розробці моделі пластичності кінематичне зміцнення можна не враховувати (через його незначність), слід враховувати лише ізотропне зміцнення в інтервалі $\varepsilon \in [0, 1]$.

Отже, можна записати ізотропні визначальні співвідношення, аналогічні співвідношенням теорії течії ізотропного матеріалу [10] (4.1):

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon}{\Phi'(\varepsilon)} s_{ij}. \quad (4.1)$$

Тут $d\varepsilon_{ij}$ – тензор приросту пластичних деформацій (приймається умова нестисливості $d\varepsilon_{jj} = 0$; $d\varepsilon$ – інтенсивність приросту пластичних деформацій; $\Phi'(\varepsilon)$

					<i>KPTAM 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		55

– функція напружень при циклічному деформуванні з великими деформаціями;
 s_{ij} – девіатор напружень.

Девіатор напружень – це складова тензора напружень, яка відповідає за змінну (зсувну) частину напружень, що не пов’язана з об’ємними змінами матеріалу (тобто не впливає на його об’ємне стиснення чи розширення).

Інакше, повний тензор напружень σ_{ij} можна розкласти на дві частини:

- гідростатичну (об’ємну): відповідає за об’ємне стиснення або розширення;

- девіаторну (зсувну): відповідає за деформації форми, тобто зсуви без зміни об’єму.

Формально девіатор напружень визначається як:

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}$$

де σ_{kk} – слід тензора напружень (сума нормальних напружень), δ_{ij} – символ Кронекера.

Його використовують у теорії пластичності та механіці деформівного тіла для опису зсувних процесів, зокрема при формуванні та циклічних навантаженнях металів.

З урахуванням результатів, отриманих у розділі 3, приймаємо наступну гіпотезу, в деякому сенсі аналогічну гіпотезі єдиної кривої. При циклічному та близькому до нього (складному навантаженні по ламаних траєкторіях) деформуванні металів, що характеризується великими інтенсивностями пластичної деформації в півциклі ($\epsilon > [0,1; 0,2]$) та накопиченими деформаціями $\int d\epsilon > [1; 2]$, інтенсивність напружень течії визначається функцією інтенсивності накопиченої пластичної деформації (параметра Удквіста [26, 27]), яка не

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		56

залежить від характеристик циклу (амплітуди, симетрії тощо) і виду напруженого стану.

Відповідно до цієї гіпотези, у якості функції напружень $\Phi'(\varepsilon)$ у (4.1) можна прийняти усереднені за результатами випробувань зразків на розтяг і стиснення залежності $\sigma(\varepsilon)$ (рис. 3.3, 3.4, 3.5).

Для отримання аналітичного опису залежностей $\sigma(\varepsilon) \equiv \Phi'(\varepsilon)$ розглянемо фізико-феноменологічну модель пластичності, що враховує ефект Баушингера [9]:

$$\sigma = \beta m G b \left(\frac{\exp(\varepsilon) - 1}{\lambda' b \exp(\varepsilon)} + \frac{\rho_{s0} + A \varepsilon^+}{\exp(\varepsilon)} \right)^{1/2}. \quad (4.2)$$

Тут σ , ε – напруження і деформація при зворотньому деформуванні після прямого деформування, при якому досягається деформація ε^+ ; λ' – довжина вільного пробігу дислокацій після зміни знака деформації.

Для визначення коефіцієнта A і λ' рекомендується така послідовність експериментів:

- деформування циліндричного зразка за схемою простого розтягування (волочінням або прямим видавлюванням) зі значенням деформації $0,43 < \varepsilon^+ < 0,60$;
- нарізка з отриманого прутка трьох (для усереднення результатів) стандартних зразків для випробувань на осадку;
- випробування зразків на осадку та побудова діаграми деформування $\sigma(\varepsilon)$.

Значення A і λ' визначаються із використанням отриманої діаграми $\sigma(\varepsilon)$ за формулами:

$$A = [(\sigma_{02}^{exp})^2 (\beta m G b)^{-2} - \rho_{s0}] / \varepsilon^+; \quad (4.3)$$

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		57

$$\lambda' = \frac{b(\beta m G)^2 [\exp(\varepsilon) - 1]}{\sigma^2 \exp(\varepsilon) - (\beta m G b)^2 (\rho_{s0} + A\varepsilon^+)} \quad (4.4)$$

де σ^{exp}_{02} – експериментально визначена межа текучості матеріалу на стиснення $\varepsilon \in (0,3; 0,5)$.

Рівняння (4.3), (4.4) отримані з (4.2), при цьому рівняння (4.3) – за умови $\varepsilon=0$, коли $\sigma = \sigma^{\text{exp}}_{02}$.

Скалярне рівняння, що описує пластичну деформацію металів в умовах досліджуваного циклічного деформування, отримуємо з моделі, що враховує ефект Баушингера (4.2), заміною ε^+ на поточне значення ε :

$$\Phi'(\varepsilon) \equiv \sigma = \beta m G b \left(\frac{(\lambda' b)^{-1} [\exp(\varepsilon) - 1] + \rho_{s0} + A\varepsilon}{\exp(\varepsilon)} \right)^{1/2} \quad (4.5)$$

З метою перевірки адекватності моделі (4.5) виконані розрахунки для сталі 10КП, міді М1 та алюмінію АД1 (криві 3 на рис. 3.2, 3.3, 3.4). Із рис. 3.3, 3.4, 3.5 слідує, що теоретичні та експериментальні залежності задовільно узгоджуються.

Розрахунки проведені для значень параметрів матеріалів, поданих в таблиці 4.1.

Аналіз розрахункових кривих 3 на рис. 3.3, 3.4, 3.5 показує, що в деяких випадках рівняння (4.5) описує діаграми $\Phi'(\varepsilon)$ із розміщенням (спадні діаграми), тобто при $\varepsilon > 1$ $d\Phi'(\varepsilon)/d\varepsilon < 0$. Використання цієї діаграми може викликати відомі труднощі при визначенні напружено-деформованого стану заготовок, що виникає при обробці металів тиском.

Як зазначено вище, при $\varepsilon > 1$ пластична поведінка матеріалів з прийнятною для технологічних розрахунків точністю описується моделлю ідеально пластичного тіла.

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		58

Таблиця 4.1 – Вхідні дані і вихідні дані моделювання

Параметри	Значення параметрів		
	Сталь 10КП	Мідь М1	Алюміній АД1
G, МПа	78 000	46 000	26 000
λ , см	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$2,96 \cdot 10^{-4}$	$4,53 \cdot 10^{-4}$
ρs_0 , см ⁻²	$1,3 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$8,35 \cdot 10^9$
A, см ⁻²	$3,1 \cdot 10^{10}$	$3,0 \cdot 10^{10}$	$2,27 \cdot 10^{10}$
λ' , см	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$1,81 \cdot 10^{-3}$
m	3,1	3,1	3,1

Тому доцільно при постановці і розв'язанні крайових задач пластичності на першій стадії деформування, що характеризується зміцненням (рис. 3.3, 3.4, 3.5), використовувати визначені співвідношення (4.1), (4.5), а на другій стадії ($\Phi'(\varepsilon)=\text{const}$) застосовувати формулювання крайової задачі в рамках теорії ідеальної пластичності з використанням умов пластичності:

$$\left(\frac{3}{2}s_{ij}s_{ij}\right)^{1/2} = \sigma'_T \quad (4.6)$$

($\sigma'_T = \Phi'(\varepsilon) = \text{const}$) і визначальних співвідношень виду [10]:

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon}{\sigma'_T} s_{ij}. \quad (4.7)$$

При цьому тривалість першої стадії і значення σ'_T визначаються за залежністю $\Phi'(\varepsilon)$, побудованою для досліджуваного матеріалу за рівнянням (4.5).

Таким чином, відповідно до сформульованої вище гіпотези, поведінка металів при циклічному деформуванні з великими деформаціями в півциклах і

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		59

накопиченими за декілька циклів деформаціями в координатах інтенсивності напружень – інтенсивності накопичених деформацій може відповідати поведінці деякого абстрактного ізотропного матеріалу при простому навантаженні і монотонній деформації, діаграма деформування якого $\Phi'(\epsilon)$ визначається з урахуванням ряду параметрів циклічного деформування реального металу.

Як відомо, рівняння теорії течії (4.1) і теорії ідеальної пластичності (4.6), (4.7) дозволяють отримати задовільні результати при визначенні напружено-деформованого стану заготовок у процесі обробки металів тиском в умовах простого навантаження і монотонної деформації.

Рівняння (4.5) задовільно описує експериментальні залежності $\sigma(\epsilon)$ (криві 3 на рис. 3.3, 3.4, 3.5), тому цієї залежності достатньо для математичного моделювання технологічних процесів обробки металів тиском.

Технологія штампування деталі «гайка» зі сталі 38ХГНМ включає ряд операцій. Було поставлено завдання атестації технології методом математичного моделювання з використанням розробленої моделі пластичності.

Відповідно до технології підготовки матеріалу для холодного об'ємного штампування, високоякісні сталі, зокрема сталь 38ХГНМ, для підвищення пластичності та зменшення опору деформації піддаються сфероїдизаційному відпуску.

Тому в початковому стані сталь є ізотропною.

Згідно з методикою, викладеною у розділі 3, побудовані експериментальні діаграми деформування сталі (рис. 4.1) і визначені параметри моделі:

- $G=81\,410$ МПа,
- $\rho_{s0}=2,8 \cdot 10^{10}$ см⁻²,
- $\lambda=2,1 \cdot 10^{-4}$ см,
- $\beta=0,4$,
- $m=3,1$,
- $b=3 \cdot 10^{-8}$ см,

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		60

- $\varepsilon^+=0,51$,
- $A=5,594 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$,
- $\lambda' = 2,18 \cdot 10^{-4} \text{ см}$.

Розрахована за рівнянням (4.5) залежність $\Phi'(\varepsilon)$ для сталі 38ХГНМ (рис. 4.2) і рівняння (4.1) використовувалися при обчисленні деяких характеристик напружено-деформованого стану заготовки на технологічних переходах штампування за допомогою комп'ютерної системи інженерного аналізу – спеціалізованого модуля для симуляції деформування.

4.2 Чисельний аналіз моделі

Крайова задача визначення характеристик напружено-деформованого стану заготовки на технологічних переходах штампування з урахуванням симетрії деталі ставилася як осесиметрична. Система рівнянь складалася з диференціальних рівнянь рівноваги, кінематичних співвідношень [2, 8] і визначальних співвідношень (4.1), (4.5).

Як приклад на рис. 4.3 показана розрахункова схема деформування в момент завершення формоутворення заготовки у другому переході штампування, що є типовим для інших переходів. З урахуванням осесиметричності задачі характеристики напружено-деформованого стану визначалися в половині меридіального перерізу заготовки.

У першому переході виконується калібрування циліндричної заготовки, відрізаної від прутка. Після цього заготовка поміщається в формоутворюючу матрицю, виштовхувач і пуансон порожнини штампування, що використовується у другому переході (на рис. 4.3 виділена трихвильова лінія). Пуансон, переміщуючись вниз, деформує заготовку, в результаті чого вона заповнює порожнину штампування.

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		61

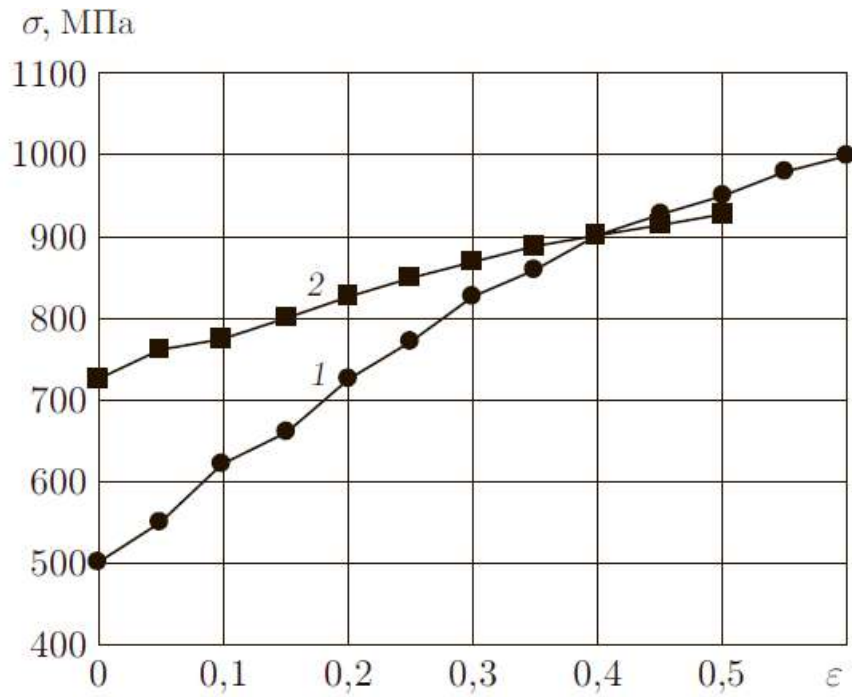


Рисунок 4.1 – Експериментальні діаграми деформування сталі 38ХГНМ:
 1 – початковий стан;
 2 – осадження після попереднього деформування за схемою простого розтягування при $\varepsilon^+=0,51$ (волочіння прутка)

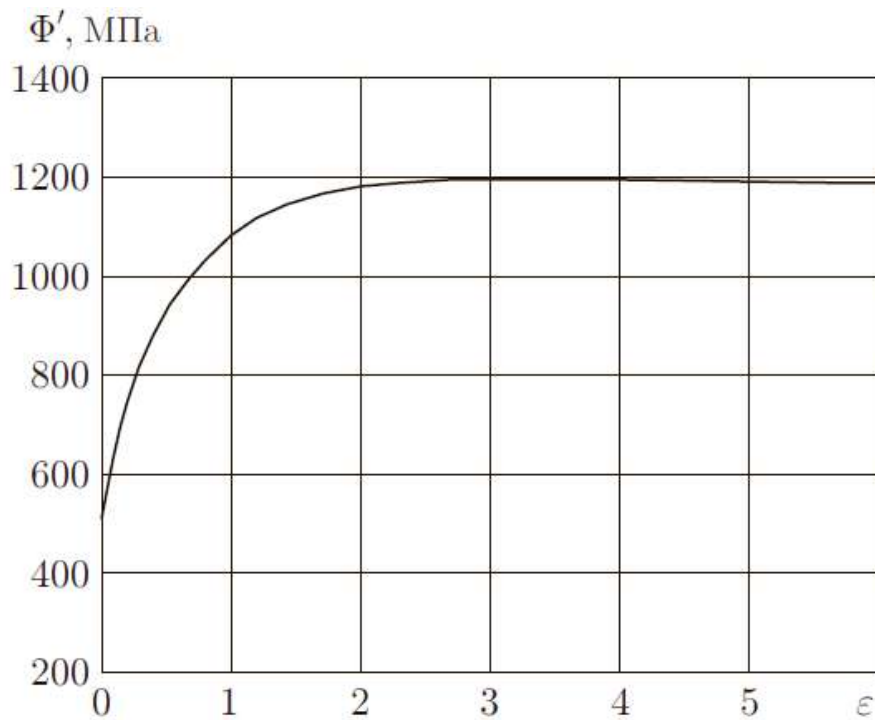


Рисунок 4.2 – Залежність $\Phi'(\varepsilon)$ для сталі 38ХГНМ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ

Арк.

62

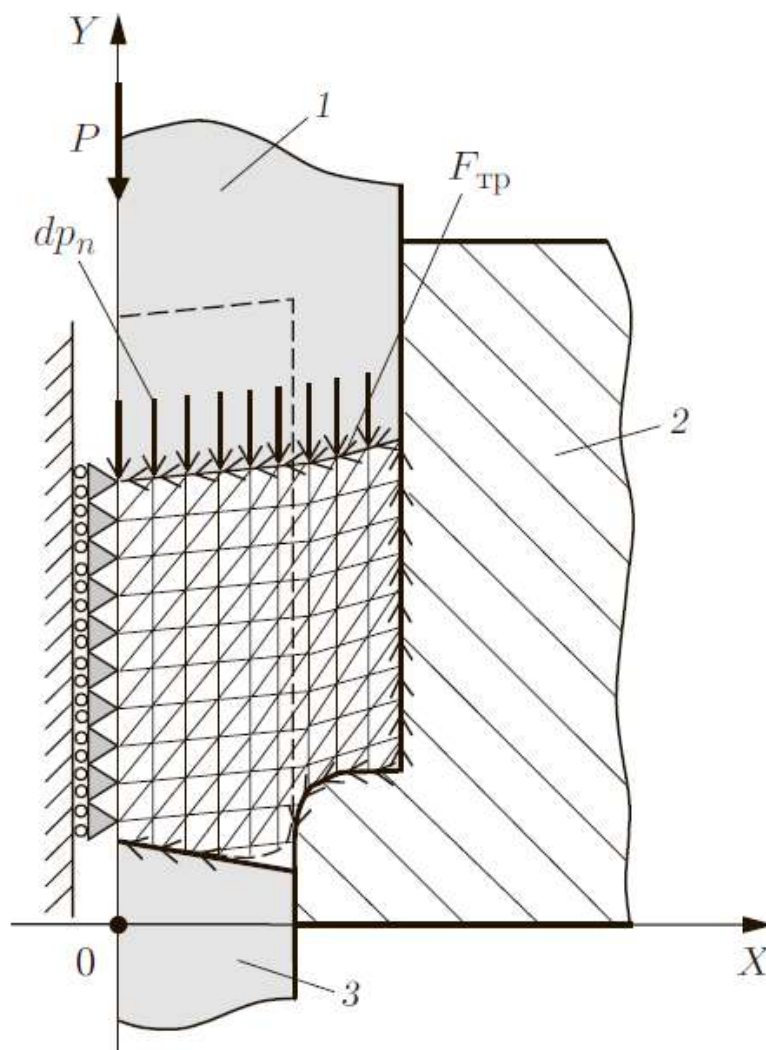


Рисунок 4.3 – Розрахункова скінченно-елементна схема деформування заготовки у другому технологічному переході штампування: 1 – пуансон; 2 – матриця; 3 – виштовхувач

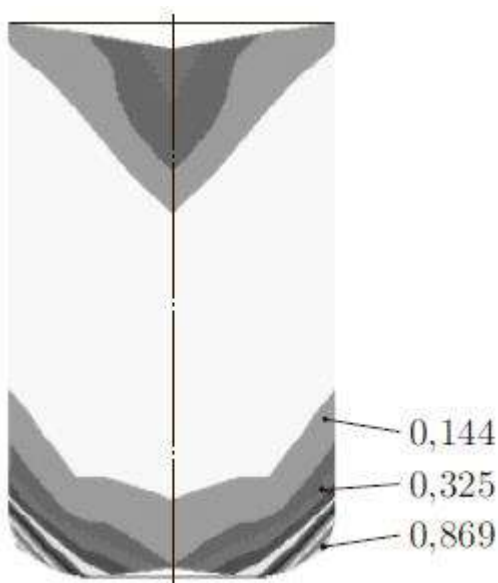
Тертя на контактних поверхнях заготовки і виштовхувача, стінок матриці і торця пуансона враховувалося за формулою Цібеля: $F_{тр} = \mu \sigma$, де $\mu = 0,12 = \text{const}$.

Визначалися поле накопиченої інтенсивності деформації в об'ємі заготовки та питомі сили штампування на технологічних переходах:

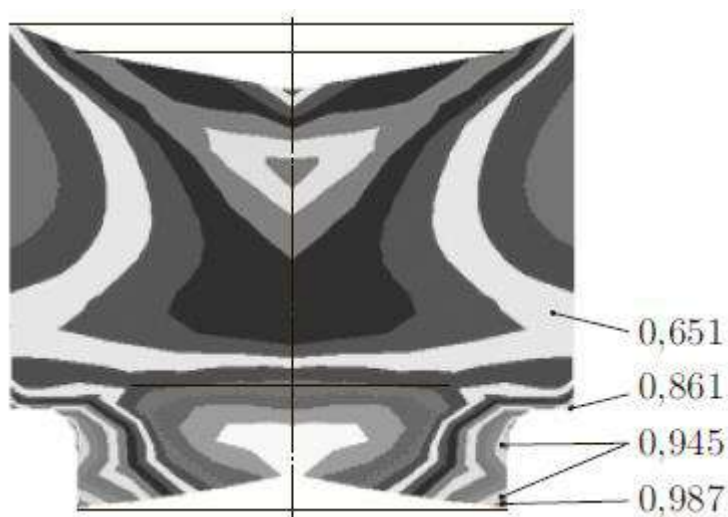
$$p = P/F,$$

де P – сила штампування в момент завершення заповнення порожнини штампування; F – площа проекції заготовки на горизонтальну площину.

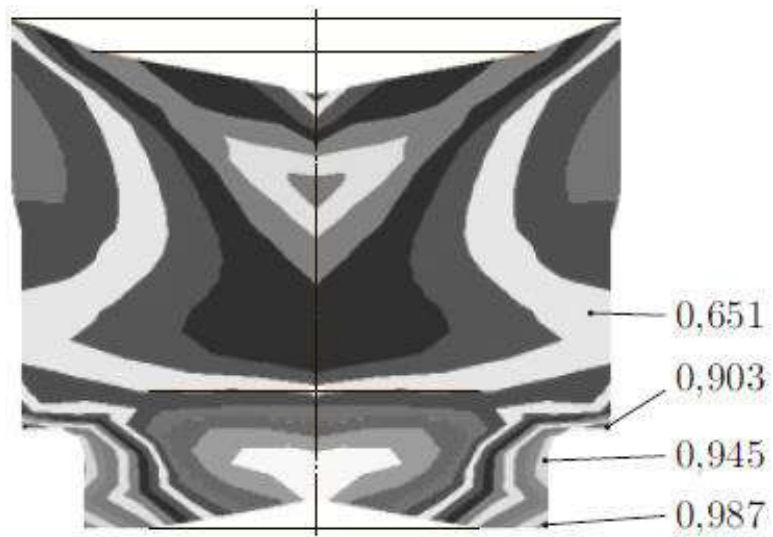
На рис. 4.4 показані поля накопиченої інтенсивності деформації та питомі сили штампування за всіма п'ятьма формоутворювальними переходами.



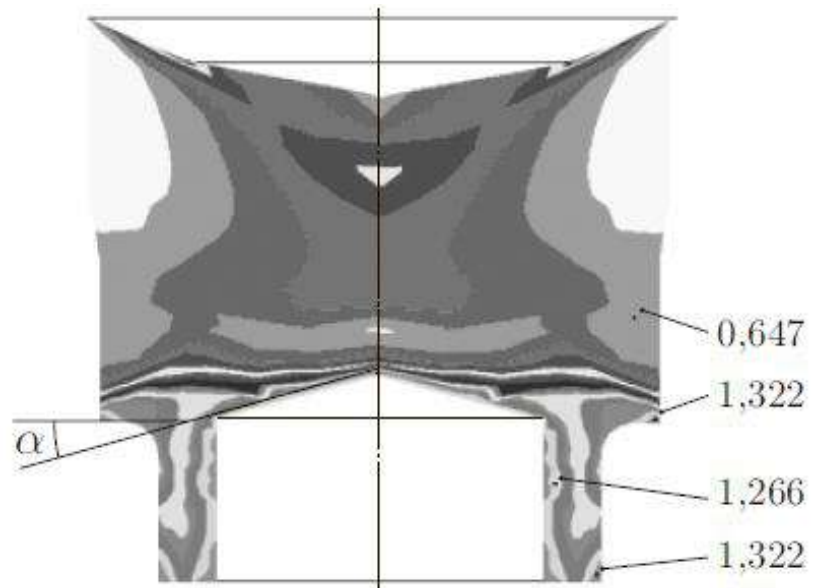
а)



б)



в)



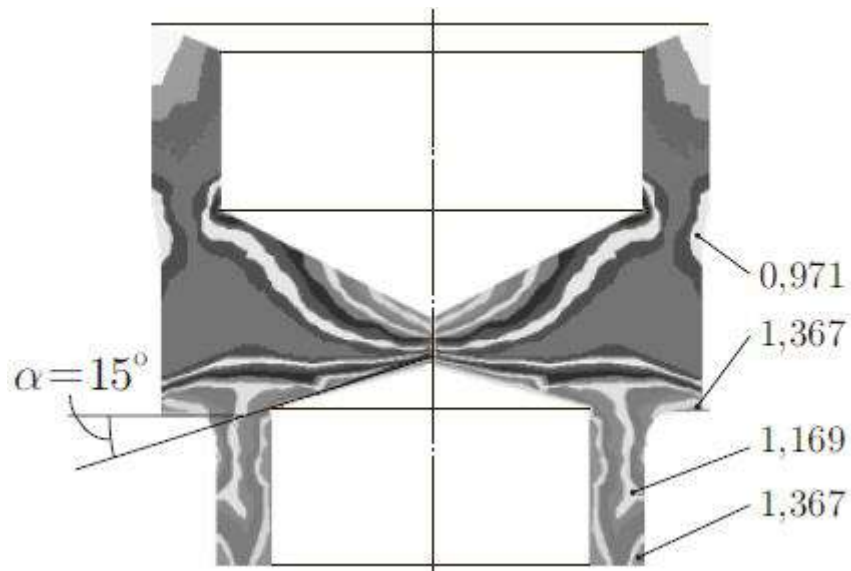
г)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ

Арк.

65



д)

Рисунок 4.4 – Поля накопиченої інтенсивності деформації ($\epsilon = \int d\epsilon$)

в об'ємі заготовки:

а – $p=699,3$ МПа;

б – $p=994$ МПа;

в – $p=1416$ МПа;

г – $p=1466,8$ МПа;

д – $p=1597$ МПа

З рис. 4.4 видно, що деформації на переходах досягають значних значень. Уже після другого переходу інтенсивність деформації $\epsilon \geq 0,44$ у всьому об'ємі заготовки (рис. 4.4, б). На момент початку останнього переходу штампування деформація дещо вирівнюється по об'єму заготовки і після його завершення знаходиться в інтервалі $\epsilon \in (0,723; 1,367)$ (рис. 4.4, д).

При холодному об'ємному штампуванні допустимим вважається навантаження на інструмент (пуансони і матриці) $p < 2000$ МПа. При $p \geq 2000$ МПа різко знижується стійкість дорогого інструменту. Максимальне значення $p=1597$ спостерігається на п'ятому технологічному переході (рис. 4.4, г).

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		66

4.3 Удосконалення технології штампування деталі «гайка»

Викладені результати атестації заданої технології штампування дозволяють зробити висновок про те, що:

- 1) технологія може застосовуватися, оскільки її параметри не досягають критичних значень;
- 2) існує можливість удосконалення технології.

Аналіз картин течії на четвертому і п'ятому переходах (рис. 4.4, в, г) показує, що ці переходи можна поєднати. При цьому формування верхньої порожнини в деталі зворотним видавлюванням буде здійснюватися за рахунок реакції сили деформування, під дією якої відбувається формування прямим видавлюванням нижньої порожнини деталі, тобто поєднання переходів не призведе до збільшення сили, необхідної для деформування.

Крім того, цю силу можна зменшити, збільшивши кут α з 15° до 20° , що приведе до підвищення стійкості штампів.

У результаті математичного моделювання формоутворення в новому «поєднаному» переході встановлено, що порожнина струмка штампа заповнюється без дефектів (зажимів і складок), а питома сила штампування зменшується з 1597 до 1498 МПа (рис. 4.5).

Таким чином, у випадку складного, у тому числі циклічного, навантаження при великих деформаціях запропонована модель пластичності більш точно описує пластичну поведінку металів порівняно з класичними ізотропною та ізотропно-трансляційною теоріями течії.

Висновки до розділу 4

Сформульовано задачу математичного моделювання однієї з ефективних технологій пластичного формоутворення металів – багатопереходного холодного об'ємного штампування.

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		67

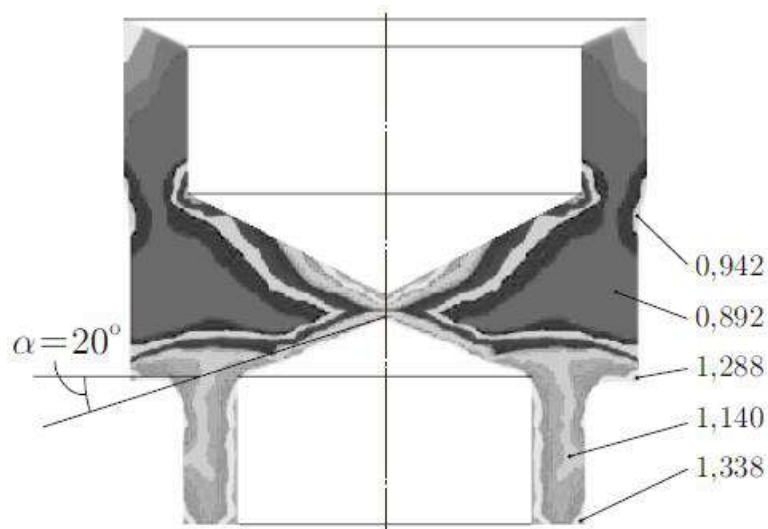


Рисунок 4.5 – Поля накопиченої інтенсивності деформації на останньому переході при використанні удосконаленої технології штампування ($p=1498$ МПа).

На основі отриманих експериментальних даних про пластичну поведінку металів в умовах циклічного навантаження за великих деформацій, накопичених за один цикл сформульовано модель пластичності та показано ефективність її використання при атестації та вдосконаленні технології штампування деталі «гайка» за допомогою комп'ютерної системи інженерного аналізу.

ВИСНОВКИ

Сучасні інженерні конструкції та елементи машин дедалі частіше працюють в умовах інтенсивних циклічних навантажень, що супроводжуються значними пластичними деформаціями. Такі умови експлуатації є характерними для авіаційної, машинобудівної, енергетичної та транспортної галузей, де надійність і довговічність матеріалів відіграють вирішальну роль. У цих умовах метали зазнають складних процесів накопичення пошкоджень, зміцнення, розм'якшення та втрати несучої здатності.

Адекватний опис поведінки металів за циклічного навантаження з великими деформаціями є складною науковою проблемою, що потребує використання розвинених математичних моделей пластичності. Такі моделі дають змогу прогнозувати напружено-деформований стан матеріалу, оцінювати залишкові деформації, циклічну стабільність та ресурс роботи конструкцій.

У зв'язку з цим дослідження моделей пластичності металів за умов циклічного навантаження з великими деформаціями є актуальним завданням сучасної механіки деформівного твердого тіла. Розробка та вдосконалення таких моделей сприяє підвищенню точності інженерних розрахунків, оптимізації конструкцій та забезпеченню їх безпечної експлуатації.

У роботі використано експериментальні дані, одержані за двома комплементарними методиками випробувань, що підвищує надійність отриманих даних:

- методика (для сталі 10кп) – деформування паралелепіпедів $66 \times 40 \times 12$ мм у спеціальному пристрої зі свинцевими вставками, які створюють високе гідростатичний тиск. Це дозволяє досягти інтенсивності деформації $\epsilon=1$ за цикл без втрати стійкості. Критичним тут є забезпечення плоскої деформації та однорідності поля деформацій. Результати взяті з [8, 10, 22];

- методика (для міді М1 та алюмінію АД1) – циклічне пресування циліндричних зразків $\varnothing 15 \times 80$ мм за схемою «пісочний годинник». Середня

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		69

деформація за цикл становила $\epsilon=0,57$, а накоплена деформація досягала 4–6 одиниць. Ця методика є стандартизованим підходом для досліджень циклічної пластичності при великих деформаціях. Результати взяті з [24, 25].

На основі експериментальних даних сформована головна гіпотеза: при $\epsilon>0,1-0,2$ у напівциклі та накоплених деформаціях $\epsilon>1-2$, форма поверхні пластичності стабілізується. Кінематичне зміцнення стає незначним, і домінує ізотропне зміцнення у діапазоні $\epsilon \in [0,1]$. Це дозволяє спростити модель, відмовившись від складних еволюційних рівнянь для додаткових напружень, як у класичних моделях Чабоке чи Вояджіса.

Подано аналітичний розв'язок з урахуванням ефекту Баушингера.

Використане рівняння (4.5) є модифікованим фізико-феноменологічним рівнянням, що поєднує:

- дислокаційну теорію (через густину дислокацій ρ_0 та довжину пробігу λ);

- ефект Баушингера (через параметр λ' – довжину вільного пробігу після зміни знаку деформації);

- накопичення деформації (через параметр A). Параметр A визначається з експерименту та характеризує швидкість накопичення дислокацій. Для міді М1 $A=3,0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, для алюмінію АД1 $A=2,27 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, що відповідає більшій схильності міді до зміцнення.

Визначено переваги досліджуваної моделі:

- модель описує розміцнення при $\epsilon>1$, що спостерігається в експерименті;
- використовує фізично обґрунтовані параметри (G , b , ρ_0), що можна визначити незалежно;

- дозволяє передбачати поведінку матеріалу при циклічному навантаженні з будь-якою амплітудою.

Недоліки досліджуваної моделі:

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		70

- рівняння (4.5) дає $d\Phi'/d\varepsilon < 0$ при $\varepsilon > 1$, що може викликати труднощі в FE-моделюванні (локальна нестабільність);

- параметри λ' та A визначаються емпірично і потребують калібрування;

- модель не враховує розвиток мікротріщин та пошкодження, що критично при $\varepsilon > 2$.

Модель інтегрована в CAE-систему через користувацькі підпрограми (user subroutines). Розрахункова схема відображає реальний технологічний процес пресування гайки зі сталі 38ХГНМ у 5 переходів.

Результати комп'ютерного моделювання:

- максимальна накопичена деформація після 5-го переходу: $\varepsilon \in (0,723; 1,36)$;

- питома сила штампування досягає $p = 1597$ МПа у 5-му переході;

- розподіл деформацій є неоднорідним, з локальними концентраціями.

На основі моделювання запропоновано принципову оптимізацію:

- скорочення переходів з 5 до 4 (об'єднання 4-го та 5-го);

- збільшення кута α з 15° до 20° для підвищення стійкості штампів.

Прогнозоване зниження сили з 1597 до 1498 МПа.

Розрахункові поля деформацій підтверджують, що порожнина заповнюється без дефектів (замків, складок), що доводить адекватність моделі для технологічних розрахунків.

Критична оцінка валідації.

Позитивним є:

- пряме порівняння теоретичних кривих з експериментальними точками показує задовільну кореляцію;

- прогноз зниження сили на 99 МПа (6,2%) є реалістичним для технологічної оптимізації.

Проблемні аспекти:

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		71

- відсутність експериментальної верифікації оптимізованої технології (лише розрахункові дані);
- у моделюванні використано спрощену модель тертя ($\mu=0,12=\text{const}$), що не враховує зміну μ при великих тисках та температурі;
- не наведено порівняння з класичними моделями (Chaboche, Voce) у тих самих умовах.

Практична значущість роботи:

Для промисловості: модель дозволяє зменшити витрати на експериментальну налагодження технологій холодної штамповки (замість 10-15 випробовувань достатньо 2-3 для калібрування параметрів A, λ').

Для CAE-систем: інтеграція в симуляційні пакети демонструє готовність до впровадження у реальні інженерні практики. Модель може бути адаптована до інших пакетів.

					<i>КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		72

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 Chaboche J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories // International Journal of Plasticity. 2008. Vol.24. P.1642-1693.

2 Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity. Oxford University Press, 1998. 362 p.

3 Mróz Z., Maciejewski J. Constitutive modeling of cyclic deformation of metals under complex loading paths // International Journal of Applied Mechanics. 2020. Vol.12. No.1. P.1-25. DOI: 10.1142/S1758825120500063

4 Schäfer B.J., Hartmaier A. Micromechanical modeling of cyclic deformation in martensitic steels // Materials Science and Engineering: A. 2023. Vol.865. 145678. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145678

5 Roters F. et al. Crystal Plasticity Finite Element Methods. Wiley-VCH, 2010. 258 p.

6 Han, J.; Cheng, Q.; Hu, P.; Xing, H.; Li, S.; Ge, S.; Hua, X.; Hu, B.; Zhang, W.; Wang, K. Finite Element Analysis of Large Plastic Deformation Process of Pure Molybdenum Plate during Hot Rolling. Metals 2023, 13, 101. <https://doi.org/10.3390/met13010101>

7 Kang G., Kan Q. Phenomenological Modelling of Cyclic Plasticity // Intechopen. 2012. DOI: 10.5772/48691

8 Liu G., Li J., Li Y., Li Q., Zhang H. In situ investigation of local large plastic deformation by digital image correlation // Materials. – 2023. – Vol. 16, № 3. – P. 1128. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16031128>

9 Kumar M., Basu S., Rao A. G., Gupta N. K. High strain rate mechanical response of 316L stainless steel // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 20. – P. 2389-2401. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.076>

10 Kim, J., Lee, H., Park, S. and Cho, D., 2023. Multi-stage cold forging process optimization for high-strength fasteners. Materials, 16(15), p.5329. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155329>

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		73

11 Weber, M., Müller, T. and Schmidt, J., 2024. Investigation of material flow and defect formation in multi-stage cold forging of complex components. Journal of Manufacturing Processes, 100, pp.456-469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.02.045>

12 Greer, J.R. and De Hosson, J.T.M., 2018. The physics of plastic deformation. Annual Review of Materials Research, 48, pp.217-243. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070317-124422

13 Tvergaard, V. and Needleman, A., 2019. Mechanics of materials. Cambridge University Press.

14 Malvern, L.E. and Rivlin, R.S., 2020. Continuum mechanics of solids. Cambridge University Press.

15 Simo, J.C. and Hughes, T.J.R., 2019. A unified framework for stress and strain measures in large deformation analysis. International Journal of Solids and Structures, 163, pp.1-18. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2018.11.008

16 Lin, Y.-C., Kao, C.-H., & Lin, H.-W. (2022). Microstructure evolution and mechanical properties of high-carbon steel during spheroidizing annealing. Materials, 15(16), 5468. <https://doi.org/10.3390/ma15165468>

17 Kumar, R., Singh, S., & Sharma, A. (2021). Effect of spheroidizing heat treatment on machinability and microstructure of AISI 52100 bearing steel. Metals, 11(12), 1877. <https://doi.org/10.3390/met11121877>

18 Daehn, G.S. and Mills, M.J., 2020. Polycrystal plasticity - multiple slip. [pdf] Carnegie Mellon University. Available at: https://www.cmu.edu/lectures/Polycrystal_plasticity-Aniso3-11Feb20.pdf [Accessed 11 Dec. 2025].

19 Altheeb, M.K.Y.M., 2020. Crystal plasticity analysis of severe plastic deformation (PhD Thesis). Middle East Technical University. Available at: <https://open.metu.edu.tr/bitstream/handle/11511/109187/thesis.pdf> [Accessed 11 Dec. 2025].

					<i>KPTAM 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		74

20 Daehn, G. S., & Mills, M. J. (2020). Polycrystal plasticity - multiple slip [Lecture slides]. Carnegie Mellon University. https://www.cmu.edu/lectures/Polycrystal_plasticity-Aniso3-11Feb20.pdf

21 Altheeb, M. K. Y. M. (2020). Crystal plasticity analysis of severe plastic deformation (PhD Thesis). Middle East Technical University. <https://open.metu.edu.tr/bitstream/handle/11511/109187/thesis.pdf>

22 Chaboche, J. L., & Khan, R. (2020). A combined isotropic-kinematic hardening model for cyclic plasticity. International Journal of Plasticity, 131, 102730. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2020.102730>

23 Hughes, T. J. R., & Simo, J. C. (2021). A unified plasticity model with combined hardening for metal forming simulations. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 378, 113734. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.113734>

24 Kang, G., Kan, Q. and Liu, Y., 2020. Strain-controlled cyclic testing of metals at large plastic strains. International Journal of Fatigue, 137, p.105714. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105714

25 Davis, R. B., Bartsch, M. R. and Kenzie, J. R., 2024. Digital image correlation for cyclic plasticity under non-proportional loading. Journal of Applied Mechanics, 91(3), p.031008. DOI: 10.1115/1.4061234

25 de Jesus, A. M. G., & Correia, J. A. F. O. (2021). Cyclic plasticity and low cycle fatigue of AISI 316L. International Journal of Fatigue, 143, 105949. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.105949>

26 Hughes, T. J. R., & Simo, J. C. (2022). On the computation of accumulated plastic strain in crystal plasticity. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 391, 114548. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.114548>

27 Voyiadjis, G. Z., & Abu Al-Rub, R. K. (2023). Thermodynamic framework for accumulated plastic strain in cyclic viscoplasticity. Journal of Applied Mechanics, 90(11), 111001. <https://doi.org/10.1115/1.4061234>

					<i>KPTAM 25 24362. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		75

Додаток

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		76

ДОДАТОК А

Презентаційний матеріал

КАФЕДРА ТРИБОЛОГІЇ, АВТОМОБІЛІВ І МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

МОДЕЛІ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛІВ ЗА ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ З ВЕЛИКИМИ ДЕФОРМАЦІЯМИ

Виконав студент 2 курсу, групи МТВАм-24-1 Юрій ХАЛАМАН
Керівник д.т.н., професор кафедри ТАМ Ілона ДРАЧ

2025

1

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ :
процеси пластичного деформування металів за умов циклічного навантаження при багатопереходному холодному об'ємному штампуванні

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ :
моделі пластичності металів при великих деформаціях та закономірності їх застосування для математичного моделювання процесів формоутворення

МЕТА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ :
формулювання та дослідження моделі пластичності металів за умов циклічного навантаження з великими деформаціями на основі експериментальних даних, а також оцінювання ефективності її використання для атестації та вдосконалення технології багатоперехідного холодного об'ємного штампування деталі типу «гайка» із застосуванням комп'ютерних систем інженерного аналізу

2

ЗАВДАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ :

1. Проаналізувати сучасні підходи до моделювання пластичної деформації металів;
2. Дослідити особливості пластичної поведінки металів за умов циклічного навантаження з великими деформаціями;
3. Виконати експериментальні дослідження з метою отримання характеристик матеріалу для побудови моделі пластичності;
4. Сформулювати математичну модель пластичності з урахуванням накопичених деформацій;
5. Реалізувати модель у програмному середовищі комп'ютерного інженерного аналізу;
6. Оцінити ефективність запропонованої моделі для оптимізації параметрів процесу холодного об'ємного штампування.

3

					КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		77

АКТУАЛЬНІСТЬ

> Циклічне навантаження з великими деформаціями ($\epsilon > 1$) є ключовим у сучасних технологіях холодного штампування, але існуючі методики розраховані на малі деформації та не враховують ефект розм'якшення. Застосування сучасних експериментальних методів (DIC, SHPB) та фізико-обґрунтованих моделей дозволяє в 5-10 разів скоротити кількість фізичних випробувань, прогнозувати локалізацію деформацій і дефекти, що забезпечує економію до 80% витрат на атестацію технологій.

4

Характеристика предметної області та постановка задачі дослідження

- 1 Пластичне деформування металів**
Дислокаційні механізми ковзання, накопичення деформацій, перебудова структури
- 2 Циклічне навантаження**
Гістерезисні петлі, ефект Баушингера, циклічне зміцнення/розм'якшення, релаксація
- 3 Великі пластичні деформації ($\epsilon > 1$)**
Локалізація деформацій, смуги зсуву, динамічне відновлення, особливості моделювання
- 4 Моделі пластичності**
Феноменологічні (Чабоке), кристалопластичні (CPFЕ), фізико-обґрунтовані (Грешнова-Пучкової)
- 5 Математичне моделювання**
FE-моделювання (DEFORM-3D, Abaqus), інтеграція моделей у CAE-системи
- 7 Багатоперехідне холодне об'ємне штампування**
Накопичення деформацій за переходами, передача НДС, оптимізація геометрії преформ
- 8 Роль моделей в атестації технологій**
Прогнозування дефектів (замків, складок), зменшення браку на 70-80%, економія на прототипах

5

Теоретичні основи моделювання пластичної деформації металів при циклічному навантаженні

- 1 Фундаментальні механізми пластичності при ВПД**
 - Дислокаційна динаміка: ковзання по системах {111} (FCC), формування клітинних структур ($d = 0,5-1$ мкм при $\epsilon > 1$)
 - Накопичення густини дислокацій: $\rho_s = \rho_{s0} + A \cdot \epsilon$, досягає $10^{12}-10^{14}$ см⁻²
 - Ефект Баушингера: зниження напруги текучості після зміни знаку на 30-50% через внутрішні напруження (backstress)
 - Динамічне відновлення: аннігіляція дислокацій при $T > 0,3T_m$, критично для гарячого штампування
- 2 Циклічне навантаження: особливості при $\epsilon > 1$**
 - Гістерезисні петлі: стабілізація після 10-20 циклів, площа петлі = енергія дисипації
 - Циклічне розм'якшення: для міді та алюмінію σ_f на 46% (Грешнов, 2010), для сталі ~15%
 - Накопичена деформація: $\epsilon_{cum} = \sum \Delta \epsilon_i$, контролює мікроструктуру та властивості
 - Релаксація напружень: важлива при низьких частотах ($f < 0,1$ Гц), описується $\sigma = -E \epsilon \cdot p$
- 3 Великі пластичні деформації: критерії та моделі**
 - Геометричний критерій: $\epsilon > 1$ (скорочення перерізу $> 80\%$)
 - Кінематика: розклад $\dot{\gamma}^n = \dot{\gamma}_0 (\tau^n / \tau_c^n)^n$ зв'язує $F = R \cdot U$, тензор швидкості деформацій $D = \frac{1}{2}(\dot{\gamma} + L)$
 - Кристалопластичні моделі (CPFЕ): , враховують орієнтацію кожного зерна

6

Експериментальні дослідження та їх результати

- Експериментальні методи дослідження ВПД**
- Цифрова кореляція зображень (DIC):**
in-situ вимірювання локальних деформацій ($\pm 0,1\%$ точність), роздільна здатність 1 мкм
 - Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB):**
динамічне навантаження ($\dot{\epsilon} = 10^3-10^4$ с⁻¹), великі деформації за мікросекунди
 - Випробування на циклічну пластичність:**
контроль за деформацією ($\Delta \epsilon = 0,5-2\%$), частота 0,1-10 Гц, дотримання ASTM E606
 - Мікροструктурний аналіз:**
EBSD (текстура, орієнтація), TEM (структура дислокацій), XRD (залишкові напруження)

Використано експериментальні дані, одержані за:
- методикою (для сталі 10кп) – деформування паралелепіпедів 66×40×12 мм у спеціальному пристрої зі свинцевими вставками, які створюють високе гідростатичний тиск. Це дозволяє досягти інтенсивності деформації $\epsilon=1$ за цикл без втрати стійкості. Критичним тут є забезпечення плоскої деформації та однорідності поля деформацій;
- методикою (для міді М1 та алюмінію АД1) – циклічне пресування циліндричних зразків $\varnothing 15 \times 80$ мм за схемою «пісочний годинник». Середня деформація за цикл становила $\epsilon=0,57$, а накоплена деформація досягла 4-6 одиниць. Ця методика є стандартизованим підходом для досліджень циклічної пластичності при великих деформаціях.

7

									Арк.
									78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат					

КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ

Модель пластичності металів за циклічного деформування

$$\Phi'(\varepsilon) \equiv \sigma = \beta m G b \left(\frac{(\lambda' b)^{-1} [\exp(\varepsilon) - 1] + \rho_{s0} + A \varepsilon}{\exp(\varepsilon)} \right)^{1/2}$$

модифікована фізико-феноменологічна модель, що поєднує:

- дислокаційну теорію (через густину дислокацій ρ_{s0} та довжину пробігу λ');
- ефект Баушингера (через параметр λ' – довжину вільного пробігу після зміни знаку деформації);
- накопичення деформації (через параметр A). Параметр A визначається з експерименту та характеризує швидкість накопичення дислокацій. Для міді M1 $A=3,0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, для алюмінію AD1 $A=2,27 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, що відповідає більшій схильності міді до зміцнення.

8

Модель пластичності металів за циклічного деформування

Чисельне моделювання

Розрахункова схема відображає реальний технологічний процес пресування гайки зі сталі 38ХГНМ у 5 переходів.

Результати комп'ютерного моделювання:

- максимальна накопичена деформація після 5-го переходу: $\varepsilon \in (0,723; 1,36)$;
- питома сила штампування досягає $p=1597$ МПа у 5-му переході;
- розподіл деформацій є неоднорідним, з локальними концентраціями.

На основі моделювання запропоновано принципову оптимізацію:

- скорочення переходів з 5 до 4 (об'єднання 4-го та 5-го);
- збільшення кута α з 15° до 20° для підвищення стійкості штампів;
- прогнозоване зниження сили з 1597 до 1498 МПа;
- розрахункові поля деформацій підтверджують, що порожнина заповнюється без дефектів (замків, складок), що доводить адекватність моделі для технологічних розрахунків.

9

Модель пластичності металів за циклічного деформування

Переваги моделі:

- модель описує розміщення при $\varepsilon > 1$, що спостерігається в експерименті;
- використовує фізично обґрунтовані параметри (G , b , ρ_{s0}), що можна визначити незалежно;
- дозволяє передбачати поведінку матеріалу при циклічному навантаженні з будь-якою амплітудою.

Недоліки моделі:

- рівняння дає $d\Phi'/d\varepsilon < 0$ при $\varepsilon > 1$, що може викликати труднощі в FE-моделюванні (локальна нестабільність);
- параметри λ' та A визначаються емпірично і потребують калібрування;
- модель не враховує розвиток мікротріщин та пошкодження, що критично при $\varepsilon > 2$.

10

ВИСНОВКИ

- 1 Експериментальна валідація: Дворізнена методика (гіпростатичне пресування сталі 10кп та циклічне пресування зразків «пісочний годинник» для міді M1/алюмінію AD1) підтвердила, що форма поверхні пластичності стабілізується при $\varepsilon > 0,1-0,2$ у напівциклі та накопичених деформаціях $\varepsilon > 1-2$, з домінуванням ізотропного зміцнення.
- 2 Адекватність моделі: Розроблена фізико-феноменологічна модель (рівняння 4.5) успішно описує розм'якшення (48% зниження напруг для міді/алюмінію), використовує незалежно визначувані параметри (G , b , ρ_{s0}) та дозволяє прогнозувати поведінку матеріалу при будь-якій амплітуді циклічного навантаження.
- 3 Обмеження моделі: Рівняння дає $d\Phi'/d\varepsilon < 0$ при $\varepsilon > 1$ (локальна нестабільність у FE), параметри λ' та A вимагають емпіричного калібрування, а модель не враховує розвиток мікротріщин при $\varepsilon > 2$, що обмежує її застосування для прогнозування довговічності. Інтеграція в CAE: Модель інтегрована у комп'ютерні пакети, що дозволило змоделювати 5-перехідне пресування гайки з $\varepsilon \in (0,723; 1,36)$ і $p=1597$ МПа, підтвердивши адекватність для технологічних розрахунків.
- 4 Практична значущість: Застосування моделі зменшує кількість експериментальних випробувань з 10–15 до 2–3, забезпечує економію до 80% витрат на налагодження технологій холодної штамповки та готова до впровадження в інженерну практику через сучасні CAE-системи.

11

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

КРТАМ 25 24362. 000 ПЗ

Арк.

79