

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

# 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 *Дослідження впливу температури, ступеня та швидкості деформації на напружено-деформований стан металевих зразків при розтягненні*

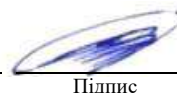
Шифр: КРТАМ 25. 24355.000. ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група МТВАм-24-1  
Курс, група виконавця  Дмитро ПРУС  
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 2025

# 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

Прусу Дмитру Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження впливу температури, ступеня та швидкості деформації на напружено-деформований стан металевих зразків при розтягненні»

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: джерела інформації щодо теми КР; матеріали переддипломної практики: вимоги до проведення випробувань на розтягування, властивості та склад сплаву АМгбМ.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік задач): *провести аналітичний огляд сучасних досліджень, присвячених впливу температури та швидкості деформації на механічні властивості металів; розробити методика експериментального дослідження розтягнення металевих зразків у різних температурних і швидкісних режимах, провести експериментальні дослідження механічних властивостей сплаву АМгбМ на розтягування в інтервалі температур гарячого деформування для виявлення закономірностей поведінки матеріалу та формування обґрунтованих рекомендацій щодо оптимальних режимів гарячого пресування; дослідити механізм стрибкоподібної деформації сплаву АМгбМ шляхом аналізу руйнування дисперсних включень другої фази, розробити розрахункову модель приростів пластичної деформації на основі гістограми їх розподілу та експериментально верифікувати адекватність побудованих діаграм зміни коефіцієнтів форми і кількості частинок залежно від рівня напружень.*

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 напрямку дослідження та узгодження тематики роботи з керівником</i>	<i>30.08.2025</i>	<i>виконано</i>
2	<i>Ознайомлення з предметною областю, формулювання мети та задач дослідження, визначення об'єкта та предмета дослідження</i>	<i>10.09.2025</i>	<i>виконано</i>
3	<i>Робота над розділом 1 – Характеристика предметної області та постановка задачі дослідження</i>	<i>20.09.2025</i>	<i>виконано</i>
4	<i>Робота над розділом 2 – Теоретичні основи</i>	<i>30.09.2025</i>	<i>виконано</i>
5	<i>Робота над розділом 3 – Методика експериментального дослідження</i>	<i>30.10.2025</i>	<i>виконано</i>
6	<i>Робота над розділом 4 – Результати досліджень та їх аналіз</i>	<i>15.11.2025</i>	<i>виконано</i>
7	<i>Оформлення пояснювальної записки згідно вимог</i>	<i>25.11.2025</i>	<i>виконано</i>
8	<i>Нормоконтроль пояснювальної записки</i>	<i>2.12.2025</i>	<i>виконано</i>
9	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>5.12.2025</i>	<i>виконано</i>

Студент



Підпис

*Дмитро ПРУС*

Ім'я, прізвище

Керівник



Підпис

*Ілона ДРАЧ*

Ім'я, прізвище

## РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи:

*Дослідження впливу температури,  
ступеня та швидкості деформації на  
напружено-деформований стан  
металевих зразків при розтягненні*

Виконавець кваліфікаційної роботи:

*студент групи МТВАм-24-1  
Прус Дмитро Володимирович*

Керівник кваліфікаційної роботи:

*д.т.н., професор кафедри ТАМ  
Драч Ілона Володимирівна*

Кваліфікаційна робота містить:

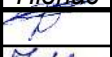



Пояснювальна записка				Кількість додатків
Сторінок	Рисунків	Таблиць	Джерел інформації	
80	14	7	49	1

Запропоновано удосконалені методики проведення випробувань та обробки їх результатів для визначення взаємозв'язку інтенсивності напружень від ступеня та швидкості деформації. Проаналізовано результати випробувань сплаву АМгбМ на розтягування за допомогою випробувальної установки в умовах нагрівання, що дозволило виробити рекомендації, необхідні для подальших досліджень режимів повільного гарячого деформування. Досліджено механізм стрибкоподібної деформації сплаву АМгбМ шляхом аналізу руйнування дисперсних включень другої фази, розроблено розрахункову модель приростів пластичної деформації на основі гістограми їх розподілу та експериментально верифіковано адекватність побудованих діаграм зміни коефіцієнтів форми і кількості частинок залежно від рівня напружень.

Ключові слова: випробування, розтяг, напруження, деформація, температура, алюмінієвий сплав системи Al–Mg.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Характеристика предметної області та постановка задачі дослідження.....	10
1.1 Загальні закономірності впливу температури й швидкості деформації на механічні властивості .....	10
1.2 Механізми мікроструктурних перетворень .....	13
1.3 Експериментальні підходи та діапазони швидкостей і температури .....	14
1.4 Конструктивні і емпіричні моделі опису поведінки матеріалів .....	15
1.5 Особливості для сучасних матеріалів і технологій .....	15
1.6 Особливості поведінки алюмінієвого сплаву АМг6М .....	17
1.7 Основні напрями досліджень .....	18
1.8 Завдання дослідження .....	19
Висновки розділу 1 .....	20
2 Теоретичні основи .....	22
2.1 Основні визначення .....	22
2.2 Термоактиваційна природа .....	24
2.3 Емпіричні моделі .....	26
2.3.1 Модифіковане рівняння Голломона .....	26
2.3.2 Модель Зериллі — Армстронга (Z–A модель) .....	27
2.3.3 Модель Джонсона – Кука (JC) .....	27
2.4 Аналіз впливу параметрів моделі.....	29
2.4.1 Вплив ступеня деформації ( $\epsilon$ ) .....	29
2.4.2 Вплив швидкості деформації ( $\dot{\epsilon}$ ) .....	31
2.4.3 Вплив температури (T) .....	32

					КРТАМ 25. 24355.000 ПЗ			
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Дослідження впливу температури, ступеня та швидкості деформації на напружено-деформований стан металевих зразків при розтягненні	Літ.	Арк.	Акрюшіє
Розроб.	Прус						5	
Перевір.	Драч							
Реценз.						ХНУ група МТВАм 24-1		
Н. Контр.	Бабак							
Затверд.	Диха							

2.5 Комбіновані ефекти .....	33
2.5.1 Параметр Zener–Hollomon (Z) як узагальнений критерій деформаційних умов .....	33
2.5.2 Карти пластичності (Processing Maps) для гарячого розтягування Al–Mg сплавів .....	34
2.5.3 Взаємодія параметрів $\epsilon - \dot{\epsilon} - T$ у гарячому розтягуванні Al-сплавів .....	35
2.6 Стрибкоподібна (переривчаста) деформація сплаву АМгбМ при розтягуванні .....	36
Висновки до розділу 2 .....	40
3 Методика експериментального дослідження.....	42
3.1 Мета та завдання експериментального дослідження .....	42
3.2 Матеріал і підготовка зразків .....	42
3.2.1 Хімічний склад матеріалу .....	43
3.2.2 Початковий стан матеріалу .....	43
3.2.3 Геометрія та типи зразків .....	43
3.2.4 Технологія виготовлення зразків .....	44
3.2.5 Контроль геометрії та дефектності .....	45
3.2.6 Підготовка зразків до високотемпературних випробувань .....	45
3.3 Обладнання та вимірювальні засоби .....	46
3.4. Методика проведення випробувань .....	52
Висновки до розділу 3 .....	57
4 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз .....	58
4.1 Застосування методики випробувань .....	58
4.2 Статистична обробка результатів вимірювань .....	61
4.3 Прогнозування ефекту Портевена-Ле Шательє в АМгбМ за розподілом дисперсних частинок .....	66

4.3.1	Результати експериментальних досліджень .....	67
4.3.2	Результати аналітичних досліджень .....	72
	Висновки до розділу 4 .....	76
	Висновки.....	78
	Перелік посилань .....	80
	Додаток.....	87

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		7

## ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудування, авіаційної, енергетичної та транспортної промисловості потребує матеріалів, здатних працювати в умовах високих навантажень, підвищених температур та динамічних змін зовнішніх факторів. Забезпечення надійності, довговічності та безпеки металевих конструкцій безпосередньо залежить від глибокого розуміння процесів, що відбуваються у матеріалі під час деформування.

Одним із найважливіших напрямів сучасної механіки матеріалів є дослідження напружено-деформованого стану металів при різних режимах навантаження. Під час розтягнення матеріалу значну роль відіграють температура, ступінь і швидкість деформації, оскільки саме ці параметри визначають характер пластичної текучості, умови виникнення зміцнення або руйнування та загальну поведінку матеріалу [1].

Актуальність теми.

Дослідження впливу температури, ступеня та швидкості деформації на напружено-деформований стан металів є надзвичайно актуальним у зв'язку з потребою підвищення ефективності технологічних процесів обробки металів тиском, удосконаленням методів термомеханічного зміцнення та розробкою нових конструкційних матеріалів. Отримані результати дозволяють не лише прогнозувати поведінку матеріалів у реальних умовах експлуатації, але й формувати наукову основу для створення математичних моделей деформування та руйнування металів.

Об'єкт дослідження.

Об'єктом дослідження є процес деформування металевих зразків при розтягненні.

Предмет дослідження.

Предметом дослідження є вплив температури, ступеня та швидкості деформації на напружено-деформований стан металевих зразків та закономірності зміни їхніх механічних характеристик.

										Арк.
										8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат						

КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ

Мета дослідження.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження впливу температури, ступеня та швидкості деформації на напружено-деформований стан металевих зразків при розтягненні та встановлення основних закономірностей зміни механічних властивостей металів у цих умовах.

Завдання дослідження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналітичний огляд сучасних досліджень, присвячених впливу температури та швидкості деформації на механічні властивості металів.
2. Розробити методику експериментального дослідження розтягнення металевих зразків у різних температурних і швидкісних режимах.
3. Провести експериментальні дослідження механічних властивостей сплаву АМгбМ на розтягування в інтервалі температур гарячого деформування з отриманням даних для виявлення закономірностей поведінки матеріалу та формування обґрунтованих рекомендацій щодо оптимальних режимів гарячого пресування (кування).
4. Дослідити механізм стрибкоподібної деформації сплаву АМгбМ шляхом аналізу руйнування дисперсних включень другої фази, розробити розрахункову модель приростів пластичної деформації на основі гістограми їх розподілу та експериментально верифікувати адекватність побудованих динамічних діаграм зміни коефіцієнтів форми і кількості частинок залежно від рівня напружень.

Практичне значення роботи.

Результати дослідження можуть бути використані при оптимізації процесів термомеханічної обробки, удосконаленні технологій формоутворення деталей, а також у розрахунках міцності конструкцій, що працюють у складних температурно-силових умовах.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		9

# 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Загальні закономірності впливу температури й швидкості деформації на механічні

Сучасні дослідження підтверджують, що механічна відповідь металів під навантаженням є вираженою функцією температури та швидкості деформації: зі збільшенням швидкості деформації зазвичай підвищується текуча міцність (strain-rate hardening), тоді як підвищення температури сприяє термолегкій деформації і динамічному пом'якшенню. Водночас існують складні перехідні режими, у яких підвищення температури за дуже високих швидкостей може призводити до неочікуваного зміцнення через активацію додаткових механізмів (наприклад, активація механізмів, що обмежують рух дислокацій) [2].

Вплив температури на механічні властивості металів.

1) Зміна міцнісних характеристик – зниження границі міцності та границі текучості: з підвищенням температури лінійно або нелінійно знижуються границі текучості ( $\sigma_t$ ) та міцності ( $\sigma_v$ ) більшості металів та сплавів. Це зумовлено активізацією термічно активованих процесів: зростанням амплітуди теплових коливань атомів, збільшенням концентрації вакансій, посиленням дифузійних процесів.

Ефект «м'якшення»: починаючи з температури  $\approx 0,3-0,4 T_{пл}$  ( $T_{пл}$  – температури плавлення), спостерігається різке зниження опору деформуванню [3].

2) Зміна пластичних властивостей – підвищення відносного подовження та пластичності: відносне подовження ( $\delta$ ) та звуження ( $\psi$ ) збільшуються з температурою завдяки активації додаткових слайдових систем та посиленню процесів динамічного відпуску. Діапазон однорідної пластичної деформації

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		10

розширюється, що проявляється у збільшенні довжини відрізка зміцнення на діаграмі розтягнення [4].

3) Зміна модуля пружності – модуль Юнга (E) знижується з температурою (на  $\approx 20-30\%$  при переході від кімнатної температури до  $600^\circ\text{C}$  для сталей) через послаблення міжатомного зв'язку [5]. Це призводить до зменшення похилості початкової ділянки діаграми напруження-деформація.

4) Температурні діапазони з особливими ефектами [6]:

- низькотемпературна крихкість ( $T < 0,2 T_{\text{пл}}$ ): зниження пластичності, підвищення границі текучості;

- синьовидна крихкість ( $0,2-0,3 T_{\text{пл}}$ ): нестача активних слайдових систем;

- діапазон високої пластичності ( $0,4-0,6 T_{\text{пл}}$ ): динамічна рекристалізація, надпластичність.

- діапазон в'язкої текучості ( $T > 0,6 T_{\text{пл}}$ ): дифузійна текучість, зміна механізму деформування.

Вплив швидкості деформації на механічні властивості.

1) Ефекти зміцнення – підвищення міцності зі швидкістю деформації:

- границя текучості та міцності зростають зі швидкістю деформування ( $\dot{\epsilon}$ ) за логарифмічним законом:  $\sigma = \sigma_0 + k \cdot \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)$  [7];

- механізм: обмежений час для релаксації напружень, активація додаткових дислокаційних джерел, пригнічення процесів відпуску та рекристалізації;

- ефект в'язкого зміцнення: при  $\dot{\epsilon} > 10^{-2} \text{ c}^{-1}$  зростає роль дисипативних процесів [7].

2) Зміна пластичності – зниження пластичних характеристик [3]:

- відносне подовження та звуження зменшуються зі швидкістю деформації через зменшення часу для розвитку пластичного потоку;

- тенденція до локалізації деформації: підвищення швидкості сприяє утворенню «ніжки» зразка та зменшенню рівномірності деформування.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		11

3) Зміна характеру діаграм: підвищення похилості ділянки зміцнення ( $d\sigma/d\varepsilon$ ) – матеріал стає «жорсткішим»; зміна форми верхньої точки діаграми: при високих швидкостях спостерігається більш різкий перехід до руйнування [8].

4) Критичні швидкості [9]:

- квазістатичні ( $10^{-5} - 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ): переважають термічно активовані процеси;

- середні швидкості ( $10^{-3} - 10^0 \text{ c}^{-1}$ ): збалансовані процеси;

- високі швидкості ( $10^0 - 10^3 \text{ c}^{-1}$ ): динамічні ефекти, адіабатичний нагрів;

- ударне навантаження ( $>10^3 \text{ c}^{-1}$ ): хвильові ефекти, зміна механізму руйнування.

Комбінований вплив температури та швидкості деформації.

1) Ефект еквівалентності – температурно-швидкісна компенсація: підвищення температури та зниження швидкості деформації мають еквівалентний ефект на опір деформуванню (аналогія з принципом тимчасової-температурної надмірності). Кількісно комбінований вплив описує параметр Зенера-Голломона [10]:

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp(Q/RT),$$

де  $Q$  – енергія активації деформування.

2) Діаграми «деформація-швидкість-температура» – діаграми деформованості визначають «вікна» оптимальних режимів обробки тиском.

Негативна швидкісна чутливість ( $m < 0$ , де  $m$  – показник швидкісної чутливості напруження текучості, який кількісно описує, як змінюється напруження плину матеріалу зі зміною швидкості деформації; інакше – параметр  $m$  характеризує здатність матеріалу протидіяти локалізації деформації) призводить до нестабільності пластичного потоку та локалізації деформації [10].

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		12

3) Адіабатичний нагрів – при високих швидкостях ( $\dot{\epsilon} > 1 \text{ c}^{-1}$ ) 95-90% роботи деформування перетворюється на теплоту, що не встигає відводитися. Місцевий нагрів може призвести до термічної локалізації (адіабатичні зсувні смуги), що спотворює загальну картину [11].

## 1.2 Механізми мікроструктурних перетворень

На мікрорівні зміни поведінки металів при різних температурах і швидкостях пояснюються переключенням домінуючих механізмів деформації: термально-активовані процеси (рух дислокацій, дифузія), динамічне відновлення і рекристалізація при високих температурах, а також дроблення і накопичення дислокацій, формування клітинних структур або деформаційних твинінгів при високих швидкостях. Дослідження показують, що характер структурних змін визначає і форму кривих напруження-деформації, і механізми руйнування [1].

Механізми, що лежать в основі впливу:

- дислокаційна теорія [12]: температура – полегшує подолання перешкод дислокаціями (пірування, крос-slip); швидкість – обмежує час для релаксації дислокаційних сплетень, підвищуючи густину дислокацій.

- процеси відновлення [13]: динамічний відпуск при  $T > 0,3 T_{пл}$  та помірних швидкостях ( $10^{-4} - 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ ) відбувається одночасно з деформуванням, що знижує напруження; динамічна рекристалізація при  $T > 0,4 T_{пл}$  та відносних деформаціях  $> 40\%$  призводить до плато на діаграмі та надпластичності.

- дифузійні механізми [14]: при високих температурах та низьких швидкостях дифузійна текучість (Coble, Nabarro-Herring) стає домінуючою; ефект навколишнього середовища: атмосфера (водень, кисень) впливає через поверхневу дифузію.

Закономірності впливу температури та швидкості деформації на механічні властивості металів подано в табл. 1.1.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		13



## 1.4 Конструктивні і емпіричні моделі опису поведінки матеріалів

У практиці та наукових роботах найпоширеніші підходи до опису комбінованого впливу температури, деформації й швидкості:

- мультипараметричні емпіричні закони (Johnson–Cook) – прості для використання в чисельних моделях, але з обмеженою фізичною обґрунтованістю в екстремальних режимах [16];

- термодинамічно обґрунтовані підходи з використанням активаційних енергій (Arrhenius-type) та strain-rate sensitivity параметрів [7]:

- рівняння Арреніуса для швидкості деформації:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp(-Q/RT),$$

- рівняння, що враховує швидкість:

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \cdot (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^m,$$

де  $m$  – показник швидкісної чутливості (0,01-0,1 для металів при кімнатній температурі, до 0,3-0,5 при високих  $T$ ),  $n$  – показник зміцнення;

- фізично орієнтовані моделі (Kocks-Mecking, dislocation dynamics) для зв'язку макроскопічної кривої з мікроструктурними процесами [3, 15, 17].

Порівняльні дослідження показують, що універсального «одного» рівняння для всіх режимів не існує — моделі потребують калібрування для конкретних сплавів і діапазонів температур/швидкостей [8].

## 1.5 Особливості для сучасних матеріалів і технологій

Останніми роками увага зосереджена також на [5]:

- швидкісній деформації високих міцностей сталей, надлегких сплавів (Al, Mg) та багатоелементних (HEAs) матеріалів;

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		15

-поведінці матеріалів, виготовлених адитивними технологіями (L-PBF), де мікроструктура та дефекти суттєво змінюють залежності від температури та strain rate;

- ролі термомеханічної обробки у формуванні властивостей перед випробуванням.

Ці напрями вимагають уточнення конститутивних моделей і додаткових експериментальних даних.

Практичні наслідки результатів досліджень впливу температурно-швидісних параметрів на механічні властивості матеріалів для виробництва [18]:

- гаряче деформування:  $T = 0,6-0,8 T_{ph}$ ,  $\dot{\epsilon} = 10^{-3} - 10^0 \text{ c}^{-1}$  – зниження енергозатрат;

- холодне деформування:  $T = 0,1-0,2 T_{ph}$ ,  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} - 10^{-2} \text{ c}^{-1}$  – підвищення міцності.

Практичні наслідки результатів досліджень впливу температурно-швидісних параметрів на механічні властивості матеріалів для експлуатації [19]:

- високошвидкісне навантаження потребує враховування підвищення границі текучості на 30-50%;

- високотемпературна повзучість: необхідно враховувати зниження довготривалої міцності.

Практичні наслідки результатів досліджень впливу температурно-швидісних параметрів на механічні властивості для діагностики: відновлення параметрів при збоях і аварійних ситуаціях – за змінами мікроструктури можна оцінити температурно-швидкісні умови руйнування.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		16

## 1.6 Особливості поведінки алюмінієвого сплаву АМг6М

АМг6М – алюмінієво-магнієвий деформівний сплав (Al-Mg-Mn системи) з підвищеною корозійною стійкістю та середньою міцністю. Використовується для зварних конструкцій у суднобудуванні, автомобілебудуванні та авіації [20].

На основі аналізу технологічних досліджень [21] отримано кількісні дані про граничну пластичність сплаву АМг6М при високошвидкісному деформуванні (пневмоударному витягуванні):

Граничний ступінь витягування [21]:

- при вільному витягуванні: 1,87 мм;
- з приєднувальною масою: 1,92–1,96 мм.

Коефіцієнт  $k_s$  для розрахунку деформацій в небезпечному перерізі залежно від відносної товщини заготовки ( $S/D_s$ ) [21]:

- при товщині 2,0–1,5%:  $k_s = 1,00–0,97$ ;
- при товщині 1,5–1,0%:  $k_s = 0,97–0,92$ ;
- при товщині 1,0–0,6%:  $k_s = 0,92–0,87$ .

Ці дані свідчать про високу пластичність сплаву навіть при ударних швидкостях деформування (10 м/с), що обумовлено низькою швидкісною чутливістю алюмінієвих сплавів.

Напружено-деформований стан при спеціальних режимах.

Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) АМг6М проведено переважно для зварних з'єднань при електродинамічній обробці [21]:

- при ударній взаємодії з електродами-інденторами (швидкість 10 м/с) спостерігається локалізація деформацій у приповерхневих шарах;
- залишкові напруження після зварювання можуть досягати 0,6–0,8  $\sigma_T$ , але електродинамічна обробка знижує їх на 40–60%.

Акустико-емісійні дослідження показали, що вже за невеликих напружень у межах пружної ділянки відбувається активізація джерел САЕ, що пов'язано з рухом дислокацій у Mg-насиченому  $\alpha$ -Al твердому розчині [22].

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		17

Вплив температури та швидкості на НДС.

Обмеженість даних: для АМгбМ систематичні дослідження впливу температури та швидкості деформації при чистому розтягуванні в літературі недостатньо представлені. Проте на основі загальних закономірностей для Al-Mg сплавів можна виділити [21, 22]:

- температурний діапазон гарячого деформування: 400–500°C (0,7–0,85  $T_{пл}$ ), де спостерігається динамічна рекристалізація та максимальна пластичність;

- низькотемпературна пластичність: при 20–200°C пластичність обмежена через низьку рухливість дислокацій у сплаві з високим вмістом Mg (6%);

- швидкісна чутливість: показник  $m \approx 0,02–0,05$  (нижче, ніж для сталей), що підтверджує високу стабільність пластичного потоку при ударних швидкостях.

### 1.7 Основні напрями досліджень

Аналіз сучасних публікацій дозволяє виділити ключові прогалини:

1) нестача даних у при-/пост-порогових режимах переходу між термально-активованою і кінетично-обмеженою деформацією для багатьох конструкційних сплавів;

2) обмежена узагальнюваність існуючих конститутивних законів при застосуванні до складних реальних термомеханічних циклів;

3) недостатній зв'язок між кількісною мікроструктурною еволюцією (характер та швидкість рекристалізації, твинінг) і макроскопічними кривими напруження-деформації для ряду сучасних сплавів;

4) потреба в стандартизованих експериментальних протоколах для порівняння результатів різних дослідних груп.

5) для отримання повної картини НДС сплаву АМгбМ необхідно:

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		18

- провести серію випробувань на розтягнення при температурах - 196...+430°C та швидкостях  $10^{-5}$ – $10^2$  с<sup>-1</sup>;
- дослідити мікроструктурні зміни (дислокаційна структура, утворення часток Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>) в залежності від T та  $\dot{\epsilon}$ ;
- побудувати діаграми деформованості для визначення оптимальних режимів обробки тиском.

### 1.8 Завдання дослідження

Удосконалити та впровадити методики проведення механічних випробувань і подальшого статистичного аналізу даних для встановлення кількісних закономірностей взаємозв'язку між інтенсивністю напружень та параметрами деформування (ступенем і швидкістю деформації) для магнієвого сплаву АМг6М.

1. Провести розривні випробування зразків сплаву АМг6М на розтягування в температурному інтервалі гарячого деформування.

2. Одержати експериментальні дані про механічні властивості матеріалу при різних температурах та швидкостях деформування.

3. Проаналізувати отримані результати для виявлення закономірностей поведінки матеріалу в умовах повільного гарячого деформування.

4. Сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимальних режимів подальших досліджень технологічних параметрів гарячого пресування/ковки сплаву АМг6М.

5. Обґрунтувати твердження щодо причинно-наслідкового зв'язку між руйнуванням дисперсних включень другої фази та стрибкоподібною деформацією сплаву АМг6М при статичному розтягуванні у м'якому режимі навантажування.

6. Розробити методику розрахунку приростів пластичної деформації на основі аналізу гістограми розподілу дисперсоїдів у матриці первинного сплаву.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		19

7. Побудувати динамічні діаграми зміни коефіцієнтів форми та кількості дисперсних частинок залежно від рівня напружень їх руйнування.

8. Експериментально верифікувати адекватність запропонованої розрахункової моделі для прогнозування стрибкоподібної деформації сплаву АМг6М.

### Висновки розділу 1

Температура та швидкість деформації є фундаментальними параметрами, що визначають механічну відповідь металів. Їх вплив має еквівалентний, але протилежний характер: підвищення  $T$  еквівалентне зниженню  $\dot{\epsilon}$ .

Механізми деформування змінюються з  $T$  та  $\dot{\epsilon}$ , що призводить до якісно нових ефектів (надпластичність, дифузійна текучість).

Комплексний аналіз за допомогою параметра Зенера-Голломона дозволяє кількісно описати поведінку матеріалу.

Практичне застосування цих закономірностей критично важливе для оптимізації технологій обробки тиском та оцінки працездатності конструкцій.

Для сплаву АМг6М характерна висока пластичність навіть при ударних швидкостях, але потребує додаткових систематичних досліджень при різних температурах та швидкостях розтягування для побудови повної моделі НДС.

При побудові експериментальної методики слід охопити достатній діапазон температур і швидкостей (від квазістатичних до високошвидкісних), аби виявити перехідні режими механізмів деформації.

Для інтерпретації результатів необхідно поєднувати макромеханічні характеристики з мікроструктурним аналізом (мікроскопія, EBSD, TEM) для встановлення причин зміни властивостей.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		20

Варто розглядати одночасне калібрування декількох конструктивних моделей (емпіричних і фізично-обґрунтованих) – це підвищить надійність прогнозів у чисельних розрахунках.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		21

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

### 2.1. Основні визначення

Інтенсивність напруження ( $\sigma$ ).

Інтенсивність напруження – це умовна скалярна величина, яка характеризує напружений стан у точці тіла при складному навантаженні [23]. Вона використовується для порівняння складного напруженого стану з простим одноосьовим розтягом.

Еквівалентне (інтенсивне) напруження визначають за теоріями міцності:

- за теорією Мізеса (енергетична теорія) [23]:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

де  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – головні напруження.

- за теорією Треска (максимальних дотичних напружень) [23]:

$$\sigma_{\text{екв}} = \frac{1}{2} (\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}})$$

Ці величини використовуються для оцінки межі текучості матеріалу при складному навантаженні.

Ступінь деформації ( $\epsilon$ ).

Ступінь деформації – це безрозмірна величина, що характеризує зміну форми або розміру тіла під дією навантаження [24].

Для великих (пластичних) деформацій використовується логарифмічна (істинна) деформація:

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		22

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0},$$

де  $l_0$  – початкова довжина зразка,  $l$  – поточна довжина після деформації.

Перевага логарифмічної форми в тому, що вона адитивна: сумарна деформація дорівнює сумі елементарних деформацій у процесі навантаження.

Швидкість деформації ( $\dot{\varepsilon}$ ).

Швидкість деформації – це зміна ступеня деформації з часом, тобто похідна деформації за часом [24]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}.$$

Одиниця вимірювання:  $s^{-1}$ .

Швидкість деформації є важливим параметром при дослідженні в'язкопластичних властивостей матеріалів, особливо при гарячій обробці тиском.

Підвищена температура.

Підвищена температура – це така температура, за якої починаються термічно активовані процеси у матеріалі (дифузія, рекристалізація, відновлення тощо), що впливають на його механічні властивості [25].

Зазвичай підвищеною температурою вважають:

$$T > (0.3 \div 0.5)T_{пл},$$

де  $T_{пл}$  – температура плавлення матеріалу (у абсолютних градусах, К).

Для алюмінію [26]:

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		23

$$T_{\text{шт}} \approx 660^{\circ}\text{C} \Rightarrow T > 150 \div 200^{\circ}\text{C}$$

Тобто при таких температурах у алюмінію помітно зменшується опір деформації, що враховується при гарячій обробці металів тиском.

## 2.2. Термоактиваційна природа

Пластична деформація металів має термоактиваційний характер, тобто швидкість деформації значною мірою визначається процесами, які залежать від температури та енергії активації руху дислокацій [12, 17, 27].

Суть процесу. Під час пластичної деформації рух дислокацій у кристалічній ґратці металу гальмується різними перешкодами – атомами домішок, іншими дислокаціями, точковими дефектами, межами зерен тощо [27].

Щоб дислокація могла подолати ці бар'єри, потрібна додаткова енергія, яка може надходити:

- від механічного навантаження (напруження  $\sigma$ ),
- від теплових коливань атомів (температури  $T$ ).

Таким чином, рух дислокацій – термічно активований процес, який описується статистичними законами кінетики.

Основне рівняння термоактиваційної теорії.

Швидкість пластичної деформації визначається експоненціальним законом [23]:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \cdot \exp\left[-\frac{Q(\sigma)}{kT}\right]$$

де  $\dot{\epsilon}$  – швидкість деформації,  $\text{с}^{-1}$ ,  $\dot{\epsilon}_0$  – передекспоненційний множник, який характеризує граничну швидкість руху дислокацій (залежить від густини

					<b>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		24

дислокацій, геометрії ковзання тощо),  $Q(\sigma)$  – ефективна енергія активації, що залежить від прикладеного напруження  $\sigma$  (при більших  $\sigma$  бар'єр зменшується),  $k$  – стала Больцмана,  $k=1.38 \times 10^{-23}$  Дж/К,  $T$  – абсолютна температура, К.

Фізичний зміст [23]:

- при низьких температурах або малих напруженнях енергія теплових коливань недостатня для подолання бар'єрів, тому матеріал виявляє високу міцність і низьку пластичність.

- при підвищенні температури або напруження зменшується ефективна енергія активації  $Q(\sigma)$ , дислокації легше рухаються, і пластичність зростає, а опір деформації зменшується.

Залежність енергії активації від напруження.

Зі збільшенням прикладеного напруження енергетичний бар'єр для руху дислокацій зменшується. Це можна виразити, наприклад, у спрощеній формі [23, 27]:

$$Q(\sigma) = Q_0 \left( 1 - \frac{\sigma}{\sigma_P} \right)^m,$$

Де  $Q_0$  – енергія активації без зовнішнього навантаження,  $\sigma_P$  – характеристичне (граничне) напруження, при якому бар'єр зникає,  $m$  – емпіричний показник (залежить від механізму ковзання).

Таким чином, пластична деформація металів при підвищених температурах визначається термоактиваційним рухом дислокацій, який описується експоненційною залежністю між швидкістю деформації, напруженням та температурою.

Це пояснює, чому при нагріванні метали легше деформуються і демонструють явища повзучості та релаксації напружень.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		25

## 2.3 Емпіричні моделі

Емпіричні (напівемпіричні) моделі описують зв'язок між напруженням, ступенем деформації, швидкістю деформації та температурою на основі експериментальних даних [27].

Такі рівняння широко застосовують для розрахунку процесів гарячої пластичної деформації металів – кування, прокатки, екструзії тощо.

Нижче наведено основні моделі, що описують поведінку металів при підвищених температурах.

### 2.3.1 Модифіковане рівняння Голломона

При підвищених температурах класичне рівняння Голломона (для холодної деформації) [27]:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n.$$

розширюється з урахуванням впливу швидкості деформації та температури, набуваючи вигляду [27]:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right),$$

де  $\sigma$  – миттєве напруження, МПа;  $K$  – матеріальна стала (залежить від температури);  $\varepsilon$  – ступінь деформації;  $n$  – показник зміцнення (характеризує здатність матеріалу до наклепу);  $\dot{\varepsilon}$  – швидкість деформації,  $s^{-1}$ ;  $m$  – показник чутливості до швидкості деформації;  $Q$  – енергія активації процесу деформації, Дж/моль;  $R$  – газова стала (8.314 Дж/(моль · К));  $T$  – абсолютна температура, К.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		26

Фізичний зміст: зі збільшенням температури експоненційний множник зменшує значення  $\sigma$ ; зі зростанням швидкості деформації або наклепу ( $\epsilon^n$ ) – напруження зростає.

Модель добре описує поведінку металів у широкому діапазоні температур і швидкостей, особливо при гарячій деформації.

### 2.3.2 Модель Зериллі — Армстронга (Z–A модель)

Ця модель створена для опису поведінки високотемпературних граткових структур (ВТГС), зокрема ГЦК- та ОЦК-металів (кубічно-гранцеваних і кубічно-об’ємноцентрованих) [12, 15].

$$\sigma = C_0 + C_1 \cdot \exp [-(C_2 + C_3 \ln \dot{\epsilon}) \cdot T] + C_4 \cdot \epsilon^n$$

де  $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, n$  – емпіричні константи, визначені з експерименту;  $\dot{\epsilon}$  – швидкість деформації,  $s^{-1}$ ;  $T$  – абсолютна температура, К.

Фізичний зміст елементів моделі:

- перша експоненційна складова описує термоактиваційний вплив швидкості деформації та температури;
- останній доданок ( $C_4 \cdot \epsilon^n$ ) враховує зміцнення матеріалу при зростанні ступеня деформації.

Модель Z–A добре підходить для аналізу гарячої деформації алюмінієвих сплавів, титанів, сталей та інших металів з вираженими термозалежними механічними властивостями [27].

### 2.3.3 Модель Джонсона – Кука (Johnson–Cook, JC)

Найпоширеніша універсальна модель, що застосовується для опису пластичної поведінки металів при великих деформаціях, високих швидкостях і

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		27

підвищених температурах, зокрема в чисельних розрахунках (метод скінченних елементів) [15, 16].

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \cdot [1 - (T^*)^m]$$

де  $\sigma$  – еквівалентне напруження, МПа;  $A$  – межа текучості при кімнатній температурі та базовій швидкості деформації;  $B$  – коефіцієнт зміцнення;  $n$  – показник зміцнення;  $C$  – коефіцієнт чутливості до швидкості деформації;  $m$  – показник термічного розм'якшення;  $\dot{\varepsilon}$  – поточна швидкість деформації,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\dot{\varepsilon}_0$  – базова швидкість деформації (зазвичай  $1 \text{ с}^{-1}$ );  $T^*$  – безрозмірна температура, що визначається як:

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_{\text{пл}} - T_0}$$

де  $T_0$  – початкова (базова) температура,  $T_{\text{пл}}$  – температура плавлення матеріалу.

Таблиця 2.1 – Типові параметри для сплаву АМгбМ (алюмінієвий сплав Al–Mg–Mn) [20]

Константа	Фізичний зміст	Типові значення
A	межа текучості, МПа	280–320
B	коефіцієнт зміцнення, МПа	400–500
n	показник зміцнення	0.3–0.4
C	чутливість до швидкості деформації	0.02–0.04
m	показник термічного розм'якшення	1.2–1.5
$\dot{\varepsilon}_0$	базова швидкість деформації	$1 \text{ с}^{-1}$

Фізичний зміст елементів моделі [16]:

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		28

- $(A+B\varepsilon^n)$  – механічне зміцнення при деформації;
- $(1+C \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0))$  – вплив швидкості деформації;
- $[1-(T^*)^m]$  – зниження міцності з ростом температури.

Переваги моделі Johnson–Cook [15]:

- простота використання та параметризації;
- адекватне описання поведінки матеріалу в широкому діапазоні умов;
- сумісність із більшістю програм для чисельного моделювання (ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA тощо).

## 2.4 Аналіз впливу параметрів моделі

Механічна поведінка металів і сплавів при пластичній деформації залежить від ступеня деформації ( $\varepsilon$ ), швидкості деформації ( $\dot{\varepsilon}$ ) та температури ( $T$ ). Вплив кожного з цих параметрів відображається у зміні напруження текучості  $\sigma$ , що визначає опір матеріалу пластичній деформації [16].

### 2.4.1 Вплив ступеня деформації ( $\varepsilon$ )

Зі збільшенням ступеня деформації в матеріалі накопичується густина дислокацій, що приводить до ефекту зміцнення (Work Hardening) – поступового зростання напруження текучості [28].

Процес зміцнення умовно поділяють на три стадії (таблиця 2.2).

Вплив температури на зміцнення. При підвищених температурах ( $T > 250$  °C для Al-сплавів):

- знижується показник зміцнення  $n$  з  $\approx 0.35$  до  $\approx 0.15$ ;
- пік напруження  $\sigma_{\max}$  досягається раніше – при  $\varepsilon \approx 0.10$ – $0.15$  (порівняно з  $\varepsilon \approx 0.20$ – $0.25$  при кімнатній температурі);
- активується динамічне відпалювання, що сприяє зменшенню опору деформації.

					<i>KPTAM 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		29

Таблиця 2.2 – Опис процесу поступового зростання напруження текучості металу [29]

Стадія	Характер процесу	Залежність	Опис
I стадія	Початкове зміцнення (легке)	Напруження $\sigma$ зростає пропорційно $\epsilon^{0.5}$	Відповідає початковому інтенсивному зміцненню металу. Пов'язана із ростом густини дислокацій. Дислокації рухаються незалежно, зіштовхуються з окремими перешкодами
II стадія	Основна (лінійна) стадія	Напруження $\sigma$ зростає пропорційно $\epsilon^{0.25-0.35}$	Відбувається інтенсивне накопичення і взаємодія дислокацій
III стадія	Динамічне відпалювання	$\sigma \rightarrow \sigma_{\max} \rightarrow$ $\downarrow$	Починається часткове відновлення структури (ангіляція дислокацій, рекристалізація) Однак, у одноосному розтягуванні Al-сплавів: <ul style="list-style-type: none"> <li>• III стадія може початися майже одразу після II,</li> <li>• або взагалі бути відсутньою, якщо температура висока (<math>T &gt; 300</math> °C).</li> </ul>

Отже зі збільшенням деформації матеріал спочатку зміцнюється, але при високих температурах починає розм'якшуватися через термоактивовані процеси відновлення.

## 2.4 2 Вплив швидкості деформації ( $\dot{\epsilon}$ )

Швидкість деформації визначає, наскільки швидко прикладене навантаження викликає зміну форми матеріалу [23, 24].

При постійній температурі вплив швидкості виражається через коефіцієнт чутливості до швидкості ( $\lambda$ ):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = \lambda$$

Загальна тенденція (табл. 2.3): при збільшенні швидкості деформації ( $\dot{\epsilon} \uparrow$ ) – напруження текучості  $\sigma$  зростає. Це пов'язано з тим, що дислокації не встигають релаксувати та накопичується більша густина дефектів.

Таблиця 2.3 – Характерні режими деформації [30]

Діапазон швидкості деформації	Механізм деформації	Особливості
$\dot{\epsilon} < 10^{-3} \text{ c}^{-1}$	Повзучість (сгреер)	Повільна пластична текучість, домінує дифузійне ковзання
$10^{-3} < \dot{\epsilon} < 10^2 \text{ c}^{-1}$	Термічно активована пластичність	Баланс між дислокаційним рухом і релаксацією
$\dot{\epsilon} > 10^2 \text{ c}^{-1}$	Адіабатичне нагрівання, інерційні ефекти	Можливе локальне перегрівання, зниження $\sigma$ через термічне розм'якшення

Для сплаву АМг6М при  $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$  [20]:

$$\lambda \approx 15\text{--}20 \text{ МПа на десятиковий інтервал } \dot{\epsilon}$$

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		31

Таким чином, збільшення швидкості деформації підвищує опір текучості, однак при надвисоких швидкостях можливе адіабатичне нагрівання, що частково компенсує ефект зміцнення.

### 2.4.3 Вплив температури (Т)

Підвищення температури призводить до зниження опору деформації внаслідок активації термозалежних процесів – ковзання, дифузії, рекристалізації, відновлення тощо [2, 3, 31].

Основна залежність описується експоненціальним законом [32]:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

де  $\sigma_0$  – базове напруження при кімнатній температурі;  $Q$  – енергія активації процесу деформації (для Al-сплавів  $Q \approx 140-180$  кДж/моль);  $R$  – газова стала;  $T$  – абсолютна температура, К.

Температурна чутливість для Al-сплавів (зокрема АМг6М) [33]:

- при  $T > 0.5 T_{пл}$  (близько 330–350 °С) активуються механізми ковзання зерен, що призводить до різкого зменшення  $\sigma$ ;
- динамічне відпалювання (відновлення структури) починається вже при  $T > 200$  °С;
- кожне підвищення температури на  $\approx 50$  °С зменшує  $\sigma$  приблизно на 15–25 % (при незмінній  $\epsilon$ );
- при  $T > 350$  °С спостерігається втрата міцності на 50–60 % відносно кімнатного рівня.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		32

Отже температура – найсильніший фактор, що зменшує опір деформації. При високих  $T$  активуються механізми відновлення, що робить матеріал більш пластичним, але менш міцним.

## 2.5 Комбіновані ефекти

Поведінка алюмінієвих сплавів при гарячому розтягуванні визначається одночасним впливом температури, швидкості та ступеня деформації. У цих умовах деформаційні механізми взаємодіють між собою, формуючи складні залежності напруження течії та пластичності. Нижче наведено комбіновані ефекти, релевантні саме для одноосного гарячого розтягування алюмінієвих сплавів, зокрема системи Al–Mg (AMг6M) [33].

2.5.1 Параметр Zener–Hollomon ( $Z$ ) як узагальнений критерій деформаційних умов

Для опису одночасного впливу температури та швидкості деформації застосовується параметр Zener–Hollomon [34]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right),$$

де  $\dot{\epsilon}$  – швидкість деформації;  $Q$  – активаційна енергія гарячої деформації (для Al–Mg: 140–180 кДж/моль);  $T$  – абсолютна температура;  $R$  – газова стала.

Фізичний зміст параметра  $Z$  для Al-сплавів [32, 35].

На відміну від сталей та титанових сплавів, де високий  $Z$  часто супроводжується крихким руйнуванням, алюмінієві сплави зберігають в'язку поведінку навіть при значних швидкостях деформації. Це пов'язано з їх [35]:

- високою дифузійною рухливістю дислокацій,

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		33

- здатністю до динамічного відновлення,
- низькою енергією зв'язку зернограничних структур.

Тенденції для гарячого розтягування Al-сплавів [32, 35]:

- високий  $Z$  (висока  $\dot{\epsilon}$  або низька  $T$ )  $\rightarrow$  високий опір деформації  $\sigma$ , інтенсивне зміцнення, але руйнування в'язке (шийкоутворення).

- низький  $Z$  (низька  $\dot{\epsilon}$  або висока  $T$ )  $\rightarrow$  низьке  $\sigma$ , активне термічне відновлення, зростання пластичності.

Таким чином, параметр  $Z$  дозволяє об'єднати вплив  $\dot{\epsilon}$  і  $T$  та визначити ефективні режими гарячого розтягування.

### 2.5.2 Карти пластичності (Processing Maps) для гарячого розтягування Al-Mg сплавів

Карти пластичності для одноосного розтягування відрізняються від карт, що використовуються для процесів прокатки чи екструзії. У випадку розтягування існує одновісний стан напруження, тому відсутні ефекти, характерні для зсувних або тривісних режимів [36].

Ключові особливості карт пластичності для AlMg6M [36]:

1. Область максимальної пластичності (оптимальна зона):

$$T = 250\text{--}320 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\dot{\epsilon} = 10^{-3}\text{--}10^0 \text{ c}^{-1}.$$

У цій області протікає динамічне відновлення, яке знижує густину дислокацій і підвищує пластичність. Напруження текучості порівняно низьке, necking настає пізніше, ресурс рівномірної деформації найбільший.

2. Зона помірної пластичності:

$$T = 180\text{--}250 \text{ }^\circ\text{C};$$

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		34

$$\dot{\epsilon} = 10^0 - 10^1 \text{ c}^{-1}.$$

Спостерігається конкуренція між наклепом та термічно активованим відновленням. Матеріал зміцнюється, але зберігає помірну пластичність.

3. Зона зниженої пластичності (тепле розтягування):

$$T < 150 \text{ }^\circ\text{C} \text{ або } \dot{\epsilon} > 10^1 - 10^2 \text{ c}^{-1}.$$

У цій зоні домінує наклеп, динамічне відновлення майже неактивне. Пік напруження  $\sigma_{\max}$  досягається раніше, necking може виникати на  $\epsilon < 0.1 - 0.15$ .

4. Зона розм'якшення (високотемпературна):

$$T > 350 - 400 \text{ }^\circ\text{C}.$$

У цій області виникає інтенсивне динамічне відновлення і часткова рекристалізація, що різко знижує напруження. Пластичність висока, але матеріал уже не здатний нести значні навантаження.

Важливе зауваження щодо Al-сплавів: у розтягуванні не спостерігається міжзерне крихке руйнування, характерне для сталей при високому Z. Al-Mg сплави формують шийку й руйнуються в'язко навіть при високих швидкостях деформації.

### 2.5.3 Взаємодія параметрів $\epsilon - \dot{\epsilon} - T$ у гарячому розтягуванні Al-сплавів

1. Взаємний вплив  $\dot{\epsilon}$  та  $T$ .

Зміна одного параметра може компенсувати дію іншого:

- підвищення  $T$  зменшує  $\sigma$ ;
- збільшення  $\dot{\epsilon}$  підвищує  $\sigma$ .

Це пояснюється термоактиваційною залежністю руху дислокацій [23]:

					<i>KPTAM 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		35

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp \left[ -\frac{Q(\sigma)}{kT} \right]$$

2. Взаємодія  $\epsilon$  та температурного розм'якшення.

Показник зміцнення  $n$  суттєво падає при підвищенні температури [36]:

- $n \approx 0.3-0.4$  при  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- $n \approx 0.15$  при  $250-300\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- $n \rightarrow 0.05-0.1$  при  $T > 350\text{ }^\circ\text{C}$ .

Це означає, що робоче зміцнення обмежується термічним відновленням.

3. Положення та величина  $\sigma_{\max}$  на кривій  $\sigma-\epsilon$ .

При підвищенні  $T$  пік напруження зміщується в область малих деформацій ( $\epsilon \approx 0.1-0.15$ ), а при високих  $\epsilon$  – у більшу.

Це відображає конкуренцію наклепу і відновлення.

2.6 Стрибкоподібна (переривчаста) деформація сплаву АМг6М при розтягуванні

Стрибкоподібна деформація (інші назви: переривчаста пластична деформація, ефект Портевена-Ле Шательє, ступінчаста текучість) – це явище нестабільної пластичної текучості, що проявляється у вигляді сходинок на кривих навантаження при розтягуванні з постійною швидкістю деформації [4].

Для сплаву АМг6 (Al-Mg-Mn системи з  $\sim 6\%$  Mg) це явище є характерним і добре вивченим, особливо у відпаленому стані [4].

На діаграмах напруження-деформація спостерігаються періодичні скиди напруження ( $\Delta\sigma$ ) та стрибки пластичної деформації, що супроводжуються зародженням і розповсюдженням смуг деформації [4].

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		36

Основний механізм виникнення – динамічне деформаційне старіння (DSA), що полягає у взаємодії рухомих дислокацій з атомами легуючих елементів (переважно магнію) [37]:

1) Закріплення дислокацій: атоми Mg в твердому розчині дифундують до дислокацій та закріплюють їх.

2) Розкріплення: при досягненні критичного напруження дислокації вириваються з атомів домішок.

3) Повторний цикл: процес повторюється, що призводить до періодичних змін напруження.

Для розвитку дислокаційної лавини, що викликає стрибок деформації, необхідні достатньо сильні бар'єри руху дислокацій та велика довжина «вільного пробігу» дислокацій [37].

Розглянемо умови прояву ефекту.

1) Температурний діапазон.

Ефект спостерігається в широкому температурному діапазоні:

- кімнатна температура (20°C): явно виражений ефект стрибкоподібної деформації [38, 39];

- низькі температури: дослідження в діапазоні від -100°C до +150°C показали залежність критичної деформації від температури [40];

- підвищені температури: при температурах вище 150°C ефект послаблюється через прискорення дифузії та зменшення концентрації Mg в твердому розчині [38].

2) Швидкість деформації.

- критичний діапазон: ефект спостерігається при  $\dot{\epsilon} = 10^{-5} - 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  [38];

- високі швидкості ( $\dot{\epsilon} > 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ): періодична форма переривчастої деформації з повторюваними зонами (смугами) Людерса [41];

- низькі швидкості: спостерігаються «розкріплюючи» сходинки з негативною залежністю критичної деформації від швидкості [41].

3) Ступінь попередньої деформації.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		37

Дослідження показали, що холодне обжаття на 20% відпаленого листа АМг6 повністю подавляє переривисту деформацію до стадії передруйнування [4]. Це пояснюється: збільшенням густини дислокацій; зменшенням довжини вільного пробігу дислокацій; інгібуванням розвитку великих дислокаційних лавин.

#### 4) Структурні прояви: смуги деформації.

Стрибки на діаграмах супроводжуються зародженням і розповсюдженням смуг макролокалізованої деформації [4]:

- напрямок: кожна смуга Людерса зароджується в тій самій ділянці зразка і поширюється в одному напрямку [41];

- градієнт деформації: створюється градієнт деформації вздовж зразка, який лінійно зростає зі збільшенням загальної деформації [41];

- технологічний брак: деформаційні смуги створюють технологічний брак листового прокату, що використовується в авіа- та автомобілебудуванні, викликаючи передчасну корозію та руйнування [37].

#### 5) Характеристики напружено-деформованого стану.

Критична деформація ( $\epsilon_c$ ), при якій починається переривиста течія, залежить від:

- вмісту Mg: збільшується з підвищенням концентрації Mg (від 2,86% до 9,41%) [38];

- температури: має складну залежність з максимумом в певному діапазоні [38];

- швидкості деформації: при низьких швидкостях спостерігається негативна залежність  $\epsilon_c$  від швидкості [41].

Амплітуда скидання напруження ( $\Delta\sigma$ ) пропорційна вмісту Mg: збільшується з ростом концентрації магнію в твердому розчині [41], залежить від деформації: спочатку зростає, потім стабілізується [41].

Механізм: чим більше атомів Mg, тим сильніше закріплення дислокацій і більший стрибок напруження при розкріпленні [41].

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		38

Форма діаграм напруження-деформація.

У відпаленому стані діаграми мають:

- високу початкову лінійну ділянку (пружна деформація);
- розвинену лінійну ділянку зміцнення;
- зигзагоподібний характер в області пластичної деформації [41].

Тип серацій залежить від вмісту Mg: тип С для сплавів з 4,23–9,41% Mg, тип В+С для 2,86% Mg [41].

б) Заходи для усунення стрибкоподібної деформації.

- холодна пластична деформація – найефективніший метод: холодне обжаття на 20% повністю усуває переривчасту деформацію до стадії передруйнування [4].

Механізм: підвищення густини дислокацій на порядок; зменшення довжини вільного пробігу дислокацій; подрібнення структури.

- теплова обробка. Стабілізаційний відпуск при 140°C протягом 3 годин після холодного обжаття дозволяє: зняти залишкові напруження; зберегти ефект усунення переривчастої деформації; досягти підвищення міцності на 15-20% [4].

- зміна хімічного складу. Зменшення вмісту Mg до <4% знижує вираженість ефекту Мікролегування елементами, що зв'язують Mg (наприклад, Ti, Zr) для створення дисперсних часток.

7) Практичні наслідки для АМгб.

При виробництві виникає проблема: деформаційні смуги є технологічним браком при прокаті листів АМгб. Технологічним рішенням є: застосування холодного обжаття чи термомеханічної обробки для усунення ефекту. Контроль: вибір оптимальних швидкостей деформування (уникнення діапазону  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  с<sup>-1</sup>) [4].

При експлуатації існує ризик: наявність смуг деформації знижує корозійну стійкість та довговічність деталей. Проводиться діагностика: акустико-емісійні методи дозволяють виявити джерела стрибкоподібної

									Арк.
									39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат					

КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ

деформації вже при напруженнях у межах пружної ділянки, що пов'язано з рухом дислокацій у Mg-насиченому  $\alpha$ -Al твердому розчині [41].

Математичне моделювання. Для опису критичної деформації використовується рівняння Хема-Джеффри:

- активаційна енергія для Al-Mg-Si сплавів: 0,64 еВ [41].;

- показник деформації: 1,6;

- для чистого АМгб параметри можуть відрізнятися залежно від вмісту Mg та термообробки.

## Висновки до розділу 2

Поведінка алюмінієвих сплавів при гарячому розтягуванні визначається одночасним впливом трьох параметрів: ступеня деформації, швидкості деформації та температури. Саме їх взаємодія формує напружено-деформований стан та характер зміцнення чи розм'якшення.

Емпіричні моделі (Голломона, Зериллі–Армстронга, Джонсона–Кука) забезпечують кількісне описання зв'язків між  $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $\dot{\epsilon}$  та  $T$  й дозволяють прогнозувати напруження течії для широкого діапазону режимів гарячого розтягування.

Підвищення температури викликає активний розвиток динамічного відновлення, що зменшує опір деформації та знижує показник зміцнення  $n$ . Для Al–Mg сплавів відновлення стає істотним уже при  $T > 200$  °С.

Швидкість деформації визначає рівень напруження через обмеження часу для релаксації дислокацій: з ростом  $\dot{\epsilon}$  зростає. Проте навіть при високих  $\dot{\epsilon}$  алюмінієві сплави демонструють в'язке руйнування.

Ступінь деформації визначає еволюцію зміцнення: при малих  $\epsilon$  спостерігається інтенсивний наклеп (I–II стадії), а при підвищених температурах – ранній перехід до термічного розм'якшення.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		40

Параметр Zener–Hollomon є ефективним способом об'єднання впливів  $T$  і  $\dot{\epsilon}$ . Для Al–Mg сплавів високий  $Z$  означає підвищення  $\sigma$ , але не приводить до крихкості, на відміну від сталей.

Карти пластичності для гарячого розтягування алюмінію демонструють оптимальну область деформації при  $T = 250\text{--}320\text{ }^\circ\text{C}$  та  $\dot{\epsilon} = 10^{-3}\text{--}1\text{ c}^{-1}$ , де забезпечуються мінімальні напруження й максимальна пластичність.

Сукупність взаємодії  $\sigma - \dot{\epsilon} - T$  описує термоактиваційний характер деформації, характерний для алюмінієвих сплавів, та визначає режими гарячого розтягування, за яких забезпечуються потрібні механічні властивості та контрольоване руйнування.

Стрибкоподібна деформація AMg6M – це прояв динамічного деформаційного старіння, що характерний для відпалених станів сплаву з високим вмістом Mg.

Ключові фактори: вміст Mg (6%), температура (20–150°C), швидкість деформації ( $10^{-5}\text{--}10^{-3}\text{ c}^{-1}$ ), стан матеріалу (відпалений).

Механізм: взаємодія дислокацій з атмосферами атомів Mg призводить до закріплення, розкріплення і повторення циклу.

Структурний прояв: смуги Людерса, що створюють градієнт деформації та технологічний брак.

Керування: холодне обжаття 20% або стабілізаційний відпуск ефективно усувають ефект.

Практичне значення: критично важливо для якості прокату та довговічності конструкцій у авіа- та автомобілебудуванні.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		41

### 3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1 Мета та завдання експериментального дослідження

Метою експериментальної частини дослідження є встановлення закономірностей зміни напружено-деформованого стану металевих зразків при розтягненні залежно від температури, ступеня та швидкості деформації.

Для досягнення поставленої мети передбачалося:

Провести випробування зразків при різних температурах у межах від низьких до підвищених (від кімнатної до 450 °С).

Дослідити вплив швидкості деформації в діапазоні  $10^{-4}$  –  $10^{-1}$  с<sup>-1</sup> на механічну поведінку матеріалу.

Визначити характерні параметри кривих «напруження – деформація» (границя текучості, міцність, відносне подовження).

Побудувати аналітичні залежності та графіки зміни механічних властивостей від температури й швидкості деформації.

#### 3.2 Матеріал і підготовка зразків

Для проведення експериментальних досліджень було використано деформівний алюмінієвий сплав системи Al–Mg – АМг6М (за EN 573-3:2019) [43]. Цей сплав належить до групи термічно незміцнюваних матеріалів, у яких механічні властивості визначаються хімічним складом, станом наклепу та мікроструктурою, сформованою в процесі попередньої обробки тиском. Сплав АМг6М відзначається доброю корозійною стійкістю, високою пластичністю при підвищених температурах та здатністю до інтенсивного динамічного відновлення, що робить його перспективним матеріалом для процесів гарячого деформування, зокрема гарячого розтягування.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		42

### 3.2.1 Хімічний склад матеріалу

Сплав АМгбМ містить 5.5–6.8 % Mg, а також легуючі добавки Mn, Ti, Fe та Si у кількостях, регламентованих стандартом (91.1с93 % Al; 0.5–0.8 % Mn; 0.4 % Si; 0.4 % Fe; 0.1 % Cu; 0.2 % Zn; 5.8–6.8 % Mg.) [43]. Основний зміцнювальний елемент – магній – утворює твердий розчин заміщення, підвищує зміцнення за рахунок твердорозчинного механізму, а також забезпечує добру пластичність під час гарячої деформації. Мікродобавки Mn і Ti сприяють дисперсійному зміцненню, утворюючи стабільні фази на основі  $Al_6Mn$  або  $Al_3Ti$ , які стабілізують структуру при нагріванні.

### 3.2.2 Початковий стан матеріалу

Для виготовлення зразків використовували прокат товщиною 2–3 мм отриманий методом гарячої прокатки. Вихідний стан матеріалу відповідав умовному стану «М» (деформований без термічної обробки), що забезпечувало наявність підвищеної густини дислокацій і субзернистої структури (вихідна структура: зерна алюмінію з  $\beta$ -фазою ( $Al_3Mg_2$ ) в міжзеренних межах (рис. 3.1)), стабільної при температурах 20–150 °С, але схильної до динамічного відновлення при  $T > 200$  °С [42, 43].

Перед подальшою механічною обробкою заготовки були очищені від оксидної плівки та поверхневих дефектів шляхом механічного шліфування з видаленням верхнього шару 0.2–0.3 мм.

### 3.2.3 Геометрія та типи зразків

Зразки для випробувань на розтягування виготовляли відповідно до вимог ДСТУ EN 10002-1 / ISO 6892-1 [44], з урахуванням особливостей випробувань при підвищених температурах [45]. Було використано два типи зразків:

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		43

Плоскі зразки із робочою частиною:

- довжина робочої частини – 50 мм

- ширина – 10–12 мм

- товщина – 2–3 мм

Круглі зразки з діаметром робочої частини 5–6 мм та довжиною 25 мм.

Вибір геометрії залежав від можливостей захватів випробувальної машини, стабільності температурного поля та необхідної точності вимірювання подовження. Плоскі зразки забезпечували рівномірніший нагрів та надійну фіксацію термопар, тоді як круглі – більш рівномірний розподіл напружень.

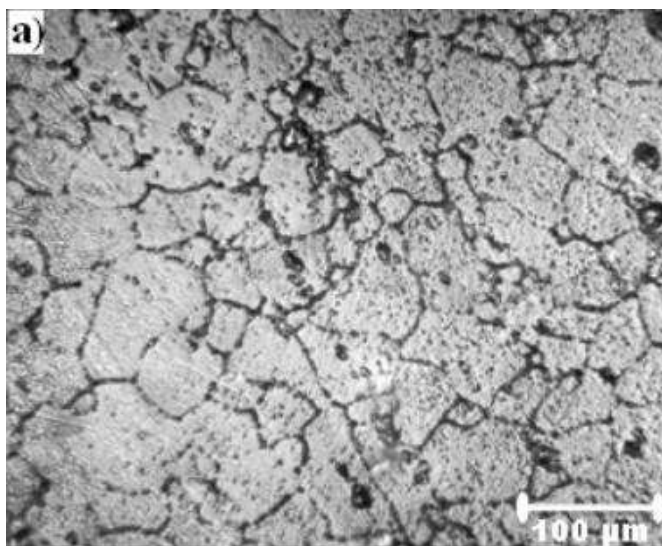


Рисунок 3.1 – Мікроструктура алюмінієвого сплаву АМг6М у вихідному стані

### 3.2.4 Технологія виготовлення зразків

Заготовки вирізали механічним різанням у напрямку прокатки для забезпечення однорідності структури та уникнення анізотропії. Після цього проводили:

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		44

Механічне фрезерування контурів з точністю  $\pm 0.1$  мм.

Фінішне шліфування робочої поверхні до шорсткості  $Ra < 0.8$  мкм для мінімізації концентраторів напружень.

Зняття фасок у зоні переходу до головок для запобігання передчасного руйнування.

Зразки не піддавали термічній обробці перед випробуванням, аби зберегти вихідний дислокаційний стан та провести аналіз впливу температури та швидкості деформації на природну мікроструктуру матеріалу.

### 3.2.5 Контроль геометрії та дефектності

Перед випробуваннями виконували такі операції контролю:

- вимірювання геометричних параметрів штангенциркулем та мікрометром;

- візуальний огляд на наявність подряпин, залишкової оксидної плівки та локальних перегрівів від різання;

- капілярний контроль (за необхідності) для виявлення мікротріщин;

- перевірка прямолінійності робочої частини зразка.

Допуски за геометрією не перевищували ті, що визначені ISO 6892-1 [44].

Перед початком випробування на розтяг на зразку через 5 або 10 мм наносилися поперечні ризики та вимірювалися початкові розміри поперечних перерізів уздовж кожної ризики.

### 3.2.6 Підготовка зразків до високотемпературних випробувань

Оскільки випробування проводили у діапазоні температур до  $450$  °C, була виконана спеціальна підготовка:

- нанесення термостійкого маркування зони початкової базової довжини;

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		45

- встановлення термопари на середину робочої частини за допомогою високотемпературного керамічного клею;

- антиокисний захист поверхні (борна суспензія або силікатні покриття), щоб виключити пригар та окиснення під час нагрівання.

Перед кожним випробуванням зразки витримували у печі 2–5 хвилин після досягнення встановленої температури для стабілізації температурного поля по перерізу.

### 3.3 Обладнання та вимірювальні засоби

Експериментальні дослідження проводилися на універсальній розривній машині INSTRON 5982 [46] (рис. 3.2), оснащених системою реєстрації навантаження та подовження.



Рисунок 3.2 – Універсальна розривна машина Instron 5982 (загальний вигляд)

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		46

INSTRON 5982 – це універсальна статична випробувальна машина підлогового типу з двоколонною конструкцією , призначена для:

- розтягувальних випробувань;
- стиснення;
- вигину (3-/4-точковий);
- відривних випробувань (peel);
- визначення коефіцієнта тертя.

Ключові характеристики [46] (рис. 3.4):

- максимальне навантаження: 100 кН.
- діапазон переміщення поперечини: до 1830 мм.
- датчики навантаження: 1 кН, 10 кН, 100 кН.
- відео екстензометр (AVE2) для вимірювання деформацій.
- кліматична камера: від -70°C до 350°C.

Тип керування: електронна система контролю навантаження та переміщення [46] (рис. 3.3).

Діапазон швидкостей переміщення активного захвата: 0.001–500 мм/хв, що відповідає швидкостям деформації  $\dot{\epsilon}=10^{-4}\dots 10^{-1} \text{ с}^{-1}$  [46].

Похибка вимірювання навантаження: не більше  $\pm 1 \%$ .

Жорсткість системи: достатня для мінімізації деформації захватів і рами.

Машина дозволяла проводити випробування як у режимі контролю зусилля, так і у режимі контролю переміщення, що є критично важливим при дослідженні кривої “напруження–деформація” до моменту necking.

Для проведення експериментальних досліджень процесу гарячого розтягування алюмінієвих сплавів було використано комплекс випробувального та вимірювального обладнання, що забезпечує контроль основних параметрів деформаційного процесу: навантаження, подовження, швидкість деформації та температура зразка (рис. 3.5). Нижче наведено детальний опис апаратури та її функціональних можливостей.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		47



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.3 – Складові універсальної розривної машини Instron 5982:  
 а – частина установки для стиску або навантаження по осі; б – силовий датчик (load cell) або адаптер; в – металева закрита камера з прозорими захисними вікнами; г –внутрішня частина випробувальної камери;  
 д – пульт керування випробувальної машини Instron; е – комп'ютерна станція для керування та збору даних випробувальної системи Instron



Рисунок 3.4 – Паспортна табличка випробувальної машини Instron модель 5982

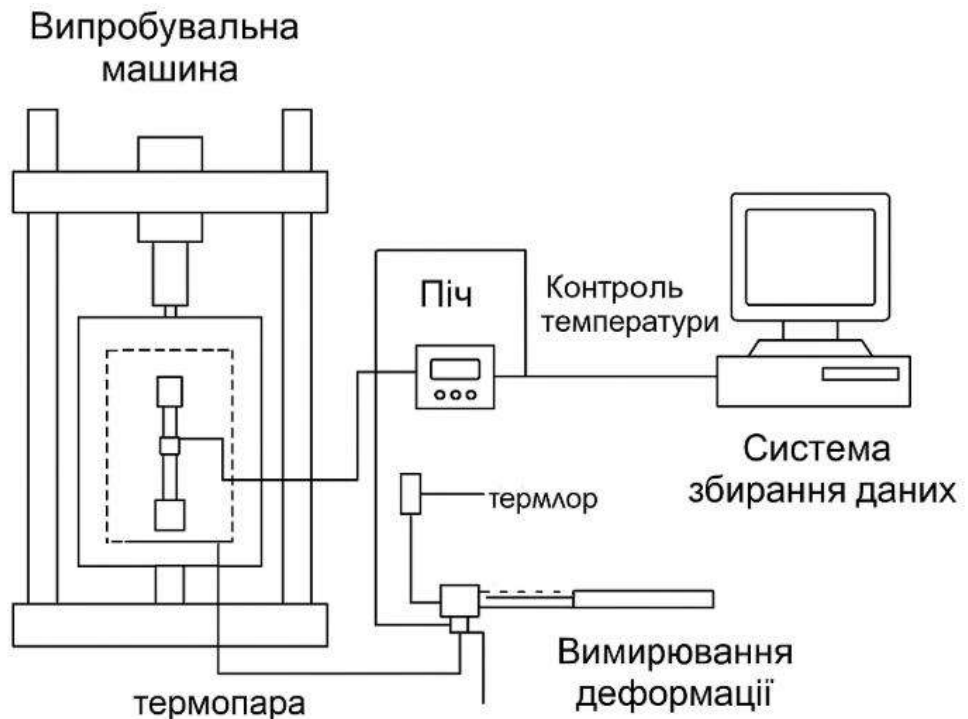


Рисунок 3.5 – Схема експериментального стенда: комплекс випробувального та вимірювального обладнання

Піч та система нагрівання зразка.

Для проведення випробувань при підвищених температурах використовувалась високотемпературна електрична піч камерного типу, інтегрована у робочу зону випробувальної машини.

Основні характеристики печі:

- діапазон робочих температур: 100–600 °С.
- точність стабілізації:  $\pm 2$  °С.
- тип нагрівачів: карбідкремнієві або ніхромові елементи.
- час виходу на температуру: 3–5 хв.
- теплова екранованість: мінімізація втрат тепла через стінки печі.

Зразок розташовувався всередині печі таким чином, щоб забезпечити максимально рівномірне температурне поле по робочій частині.

Для уникнення теплових градієнтів застосовувалися:

- допоміжні теплозахисні екрани;
- керамічні ізолятори у зоні захватів;
- витримування зразка у робочій температурі протягом 2–5 хв перед початком випробування.

Система вимірювання температури.

Контроль температури здійснювався контактними термопарами типу К (хромель–алюмель) з діапазоном вимірювання 0–1000 °С.

Особливості застосування:

- термопара кріпилася безпосередньо до робочої частини зразка керамічним термостійким клеєм;
- сигнал від термопари реєструвався цифровим температурним контролером;
- точність вимірювання температури становила  $\pm 1-2$  °С;
- проводилася перевірка калібрування термопар та контролера перед серією випробувань.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		50

У випадку дослідів вище 350 °С наносилися антиоксидні покриття, щоб зменшити помилки через окиснення.

Система вимірювання деформації.

Для реєстрації подовження зразка були використані два методи:

1. Високотемпературний екстензометр (спеціальний контактний датчик).

Характеристики:

- робоча температура: до 300–900 °С (залежно від моделі);
- точність:  $\pm 0,5$  %;
- базова довжина: 10–25 мм.

Екстензометр встановлювався у центрі робочої частини зразка і дозволяв отримувати істинні значення деформації до моменту локального звуження.

У випробуваннях алюмінієвих сплавів цей метод особливо важливий через низький модуль пружності та раннє necking.

2. Оптична система («відеоекстензометр»).

У разі неможливості використання контактного датчика застосовувалась безконтактна система вимірювання деформації, що базується на відеозахопленні та цифровому відстеженні маркерів на зразку [47].

Переваги:

- відсутність механічного впливу;
- можливість роботи з температурою до 1000 °С;
- висока точність вимірювання локальних деформацій.

Система реєстрації навантаження.

Контроль та реєстрацію сили здійснював тензодатчик (load cell), інтегрований в конструкцію випробувальної машини.

Основні параметри:

- клас точності: 0.5 або 1.0;
- механічне перевантаження: до 150 %;

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		51

- частота реєстрації: 10–1000 Гц (залежно від режиму).

Тензодатчик проходив регулярно калібрування згідно з методикою ДСТУ ISO 7500-1 [48].

Система збору та обробки даних.

Усі сигнали від датчиків (навантаження, переміщення, температура, деформація) надходили до комп'ютерної системи DAQ, що керувала випробуванням через спеціалізоване програмне забезпечення.

Функціонал системи дозволяв:

- будувати криві “ $\sigma$ – $\epsilon$ ” у реальному часі;
- контролювати режим деформації;
- швидкість деформації регулювалася зміною швидкості переміщення захоплювачів машини в межах від 0,001 до 10 мм/с;
- параметри навантаження та деформації автоматично реєструвалися комп'ютерною системою із частотою зчитування 10 Гц;
- проводити подальшу обробку: фільтрацію, обчислення істинних величин, визначення  $\sigma_{\max}$ ,  $n$ ,  $m$  та інших параметрів.

### 3.4. Методика проведення випробувань

Методика проведення випробувань була розроблена з урахуванням вимог стандартів ISO 6892-2 (випробування на розтягання при підвищених температурах) [45], а також особливостей деформування алюмінієвих сплавів у гарячому стані. Вона передбачає послідовність операцій, що забезпечують відтворюваність результатів і точний контроль параметрів: температури, швидкості деформації, навантаження та подовження.

#### 1. Підготовка обладнання

Перед початком випробувань виконували:

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		52

- перевірку вузлів розривної машини, калібрування тензодатчика та системи переміщення.

- огляд і перевірку справності печі, визначення часу виходу на робочу температуру.

Калібрування термопари і перевірку термоконтролера:

- фіксація базової довжини екстензометра відповідно до геометрії зразка.

- після цього проводилось пробне розтягування для перевірки коректності запису даних.

## 2. Монтаж та фіксація зразка.

Зразок встановлювали у захвати машини у холодному стані:

Захвати вирівнювали таким чином, щоб уникнути ексцентриситету.

Зразок центрували відносно вертикальної осі машини.

Термопару фіксували до середини робочої частини зразка термостійким керамічним клеєм.

За наявності – встановлювали високотемпературний екстензометр (на плоский зразок – з обох боків).

Уникнення перекосу та початкових напружень є критично важливим для алюмінію, через його низький модуль та чутливість до локальних напружень.

## 3. Нагрівання зразка.

Після фіксації зразка навколо нього закривали камеру печі та вмикали нагрів.

Процедура нагріву:

Температура підвищувалася зі швидкістю 10–20 °С/хв до цільового значення.

При досягненні заданої температури (200–450 °С) здійснювали ізотермічну витримку протягом 2–5 хв, щоб вирівняти температурне поле.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		53

Покази термопари контролювали постійно; відхилення не повинно перевищувати  $\pm 2$  °С.

Реєстрацію температури включали одночасно із включенням системи збору даних.

Такі умови дозволяють запобігти температурним градієнтам, які у алюмінієвих сплавах особливо критичні через високу теплопровідність.

#### 4. Встановлення режиму деформації.

Випробування проводили у режимах:

- низьких швидкостей деформації:

$$\dot{\epsilon} = 10^{-3} \dots 10^{-2} \text{ c}^{-1};$$

- середніх швидкостей:

$$\dot{\epsilon} = 10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ c}^{-1};$$

- високих швидкостей:

$$\dot{\epsilon} = 10^{-1} \dots 1 \text{ c}^{-1};$$

Вибір швидкості обумовлений необхідністю визначення параметрів моделей Гольломона, Джонсона-Кука та Zener-Hollomon.

Швидкість задавали через програму керування машиною або шляхом фіксації швидкості руху поперечини.

Важливо забезпечити сталу швидкість деформування протягом усього дослідження, до появи necking.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		54

## 5. Проведення деформування.

Після стабілізації температури та налаштування всіх датчиків розпочинали розтягування.

Параметри, які реєстрували в реальному часі:

- сила  $F(t)$ ;
- деформація  $\epsilon(t)$ ;
- переміщення поперечини;
- температура  $T(t)$ ;
- істинні  $\sigma$  та  $\epsilon$  (у розрахунковому режимі).

Деформування проводили до локального звуження (necking) або руйнування зразка.

Усі дані записувались у цифровому вигляді з частотою 50 Гц.

## 6. Завершення випробування та охолодження.

Після руйнування зразка:

- машину вимикали та обережно відкривали піч.
- охолодження здійснювали природним шляхом (без примусового повітря).

- видаляли термопару та очищали робочу зону.

Витягували залишки зразка та оцінювали характер руйнування:

- тип necking,
- кут зрізу,
- локальні потовщення або раковини.

Особлива увага приділялась оцінці в'язкого або квазів'язкого характеру зламу, типового для Al-Mg сплавів.

## 7. Обробка результатів.

Постобробка включала:

- обчислення умовних та істинних напружень:

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		55

$$\sigma = \frac{F}{A_0},$$

$$\sigma_{\text{іст}} = \sigma(1 + \varepsilon),$$

- обчислення умовних та істинних деформацій:

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}, \quad \varepsilon_{\text{іст}} = \ln(1 + \varepsilon),$$

де  $F$  – миттєве навантаження, Н;  $A_0$  – початкова площа поперечного перерізу зразка, мм<sup>2</sup>;  $\Delta l$  — подовження зразка, мм;  $l_0$  – початкова робоча довжина зразка, мм.

Побудову кривих:

-  $\sigma$ – $\varepsilon$ : у процесі навантаження безперервно реєстрували навантаження  $P$  та подовження  $\Delta l$ , за якими будували криву  $\sigma$  –  $\varepsilon$ ;

-  $\sigma_{\text{іст}}$ – $\varepsilon_{\text{іст}}$ , які дозволяли оцінити межу текучості, границю міцності та характер пластичного зміцнення;

- залежності  $\sigma_{\text{max}}(T)$ ,  $\sigma_{\text{max}}(\varepsilon)$ ;

Визначення параметрів моделей:

-  $n$ ,  $K$  – рівняння Гольломона;

-  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$ ,  $m$  – модель Johnson-Cook;

-  $\ln Z$  – для аналізу комбінованих ефектів.

Аналіз характеру руйнування та necking.

Усі результати експортувались у таблиці та графічні формати для подальшого порівняння.

Отримані експериментальні криві  $\sigma$ – $\varepsilon$  для кожного температурно-швидкісного режиму згладжували методом найменших квадратів.

За результатами побудовано залежності:

-  $\sigma_{0.2} = f(T)$ ;

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		56

-  $\sigma_B = f(\varepsilon)$ ;

-  $\delta = f(T, \varepsilon)$ .

Для визначення впливу температури та швидкості деформації застосовувалася апроксимація експериментальних даних за рівнянням типу Johnson–Cook. Параметри моделі визначали шляхом нелінійної регресії з використанням програмного забезпечення MATLAB.

Оцінки похибок вимірювання: похибка вимірювання навантаження становила не більше  $\pm 1\%$ , температури –  $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ , деформації –  $\pm 0,5\%$ .

Для кожної серії випробувань обчислювали середнє значення характеристик та середньоквадратичне відхилення, що дозволяло оцінити надійність отриманих даних.

### Висновки до розділу 3

Розділ 3 описує комплекс обладнання, який забезпечує:

- точний контроль температури,
- стабільну реалізацію заданої швидкості деформації,
- вимірювання навантаження й подовження,
- реєстрацію даних протягом усього випробування.

Такий інструментальний комплекс дозволяє отримувати достовірні та повторювані результати, необхідні для побудови напружено-деформаційних кривих та визначення параметрів моделей гарячої деформації алюмінієвих сплавів.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		57

## 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

### 4.1 Застосування методики випробувань

Випробування на розтяг зразків в'язкопластичного деформування з підвищеною температурою нагріву регламентується ISO 6892-2:2018 [44] «Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 2. Метод випробування за підвищених температур», при використанні якого визначають основні механічні та пластичні властивості металу: межа плинності фізична, межа плинності умовний, тимчасовий опір розриву, відносне звуження поперечного перерізу після розриву. Зокрема, рекомендується визначати механічні та пластичні характеристики досліджуваного металу поетапно при швидкостях деформації  $\dot{\epsilon}=\xi$  в діапазоні значень  $2,5 \cdot 10^{-4} \dots 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  та однакової швидкості деформування. Таким чином, при розтягуванні зразка досліджуються його механічні властивості без урахування впливу в'язкої складової матеріалу та не встановлюється залежність інтенсивності напруги від ступеня та швидкості деформації при фіксованих високих температурах нагріву.

Для визначення залежності інтенсивності напруги від ступеня та швидкості деформації металу при випробуванні зразка на розтяг з підвищеною температурою нагріву, що враховує як пластичну, так і в'язку складову механічних властивостей матеріалу, необхідно проводити розтяг зразків при однаковій температурі нагріву, але різних швидкостях деформування. Відповідно до вимог ISO 783:1989 [49] були виготовлені зразки на розтяг з алюмінієвого сплаву АМг6М.

Зразок закріплювався у захватних пристроях випробувальної машини INSTRON 5982 усередині нагрівального пристрою. До поверхні зразка на ділянці його робочої довжини підводилися термопари, які безперервно контактували із зразком у процесі розтягування. Після нагріву та витримки при

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		58

температурі нагріву 410°C включалася випробувальна машина та проводилося розтягування зразка при постійних швидкостях переміщення захватного пристрою  $v_1=1$  мм/хв.;  $v_2 = 5$  мм/хв. і  $v_3 = 10$  мм/хв. із записом діаграм «навантаження-переміщення». Після розтягування до руйнування із записом діаграм «навантаження-переміщення» у місцях нанесення поперечних рисок в області рівномірних деформацій вимірювалися кінцеві розміри за товщиною та шириною, розраховувалися логарифмічні деформації та площа поперечних перерізів. Отримані діаграми навантаження-переміщення розбивали на інтервали. На кожному інтервалі визначали навантаження і розраховували деформацію подовження в області поперечного перерізу, що розглядається. Результати вимірювань та розрахунків наведено в табл. 4.1-4.3.

Таблиця 4.1 – Результати обробки діаграм «навантаження-переміщення» при розтягуванні зразка 1 з алюмінієвого сплаву АМГ6М (кут вирізки 90°) за температури нагріву 410 °С при швидкості деформації  $\dot{\epsilon}=\xi=3,231 \cdot 10^{-4}$ , за швидкості переміщення захватних органів випробувальної машини  $v=1$  мм/хв.

№ перерізу	№ етапу	Площа I, мм <sup>2</sup>	Площа I, мм <sup>2</sup>	Переміщення на графіку	Деформація		Напруження, Н/мм <sup>2</sup>		Навантаження, кН
					Переріз1	Переріз2	Переріз1	Переріз2	
1	0	8,9951	9,0056	0					
	1	7.8622	7.9980	42	0.1346	0.1187	10.43	10.25	82.0
	2	6.9460	7.1587	86	0.2585	0.2295	10.36	10.05	71.94
	3	6.2509	6.5069	128	0.3640	0.3250	10.16	9.76	63.48
	4	5.6820	5.9640	170	0.4594	0.4121	9.50	9.05	53.96
	5	5.1977	5.4946	213	0.5485	0.4941	8.04	7.61	41.79
2	6	4.7808	5.0850	257	0.6321	0.5715	6.86	6.45	32.80
	7	4.4333	4.7398	300	0.7075	0.6419	3.94	3.68	17.46
	8	4.1414	4.4479	342	0.7761	0.7061	3.19	2.97	13.23

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		59

Таблиця 4.2 – Результати обробки діаграм «навантаження-переміщення» при розтягуванні зразка 2 з алюмінієвого сплаву АМГ6М (кут вирізки 90°) за температури нагріву 410°С при швидкості деформації  $\dot{\epsilon}=\xi=1,445 \cdot 10^{-3}$ , за швидкості переміщення захватних органів випробувальної машини  $v_2=5$  мм/хв.

№ перерізу	№ етапу	Площа I, мм <sup>2</sup>	Площа I, мм <sup>2</sup>	Переміщення на графіку	Деформація		Напруження, Н/мм <sup>2</sup>		Навантаження, кН
					Переріз2	Переріз3	Переріз2	Переріз3	
2	0	8,9344	8,9453						
	1	8,0244	8,3883	54	0,1074	0,0643	20,19	19,31	162
	2	7,2952	7,9050	107	0,2027	0,1236	19,99	18,44	145,8
	3	6,6874	7,4743	160	0,2897	0,1797	18,57	16,62	124,2
	4	6,1642	7,0815	214	0,3714	0,2337	16,99	14,79	104,76
3	5	5,7169	6,7278	268	0,4465	0,2849	14,36	12,20	82,08
	6	5,3155	6,4021	322	0,5165	0,3337	9,34	7,76	49,68

Таблиця 4.3 – Результати обробки діаграм «навантаження-переміщення» при розтягуванні зразка 3 з алюмінієвого сплаву АМГ6М (кут вирізки 90°) за температури нагріву 410 °С при швидкості деформації  $\dot{\epsilon}=\xi=2,118 \cdot 10^{-3}$ , за швидкості переміщення захватних органів випробувальної машини  $v_3=10$  мм/хв.

№ перерізу	№ етапу	Площа I, мм <sup>2</sup>	Площа I, мм <sup>2</sup>	Переміщення на графіку	Деформація		Напруження, Н/мм <sup>2</sup>		Навантаження, кН
					Переріз1	Переріз2	Переріз1	Переріз2	
1	0	8,9362	8,9344						
	1	8,361	8,0230	80	0,0665	0,1076	23,92	24,93	200
	2	7,8491	7,2720	161	0,1297	0,2059	22,59	24,38	177,30
	3	7,4018	6,6565	241	0,1884	0,2943	20,54	22,83	152
	4	6,9983	6,1312	322	0,2445	0,3765	16,76	19,13	117,3
2	5	6,7735	5,8554	371	0,2769	0,4231	13,18	15,25	89,3

## 4.2 Статистична обробка результатів вимірювань

За результатами випробувань та розрахунків була проведена статистична обробка й отримані рівняння регресії відповідно для швидкостей переміщення  $v_1=1$  мм/хв.;  $v_2 = 5$  мм/хв. і  $v_3 = 10$  мм/хв.:

$$\begin{aligned}\sigma_i &= -023.4121 \cdot \varepsilon^2 + 08.5171 \cdot \varepsilon + 09.6492; \\ \sigma_i &= -086.9887 \cdot \varepsilon^2 + 29.4982 \cdot \varepsilon + 17.8017; \\ \sigma_i &= -138.0796 \cdot \varepsilon^2 + 44.2662 \cdot \varepsilon + 21.5843;\end{aligned}\tag{4.1}$$

де  $\sigma_i$  та  $\varepsilon$  – відповідно інтенсивність напружень та деформації при заданих швидкостях переміщення захватного пристрою випробувальної машини.

Для визначення залежності інтенсивності напружень від швидкості деформації або швидкості переміщення захватного пристрою випробувальної машини проводилися розрахунки визначення інтенсивності напружень при фіксованих значеннях ступенів деформацій.

Таким чином, встановлювався вплив швидкості деформації або швидкості переміщення захватного пристрою випробувальної машини на величину інтенсивності деформації.

Для зниження трудомісткості випробувань на розтяг зразків при підвищених температурах досліджувалась можливість визначення інтенсивності напружень від інтенсивності деформацій залежно від швидкості деформації за випробуваннями одного зразка.

Для цього зразки з алюмінієвого сплаву АМг6М нагріті до 410°C розтягували не зі сталою швидкістю переміщення, а з циклічною зміною швидкості переміщення захватного пристрою випробувальної машини  $v_1=1$  мм/хв.;  $v_2 = 5$  мм/хв. і  $v_3 = 10$  мм/хв. в інтервалі подовження 5...10 % від загального подовження.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		61

Була отримана зигзагоподібна діаграма «навантаження-переміщення» (рис. 4.1) з числом циклів шість.

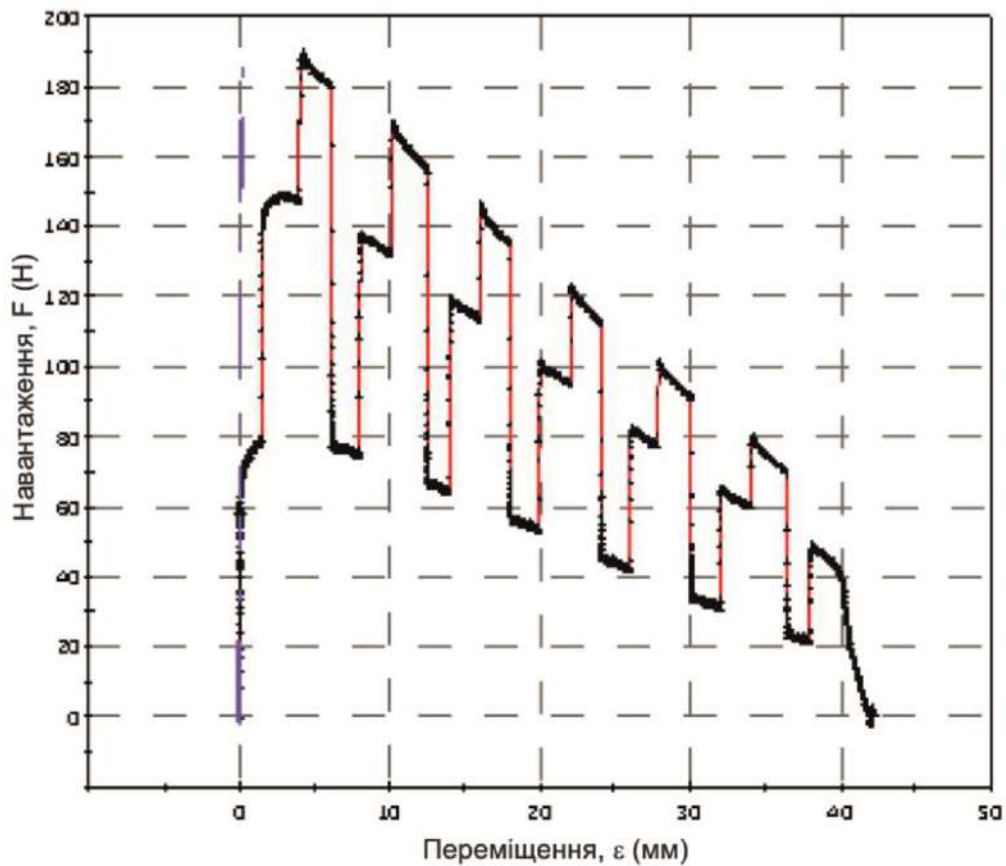


Рисунок 4.1 – Діаграма «навантаження-переміщення», отримана за результатами випробувань на розтяг зразка зі сплаву АМгбМ в процесі розтягування при заданій температурі нагріву 410°C зі зміною швидкості:  $v_1=1$  мм/хв.;  $v_2 = 5$  мм/хв. і  $v_3 = 10$  мм/хв.

Проводилася обробка діаграми «навантаження-переміщення», в якій кривими лініями з'єднували відповідні вершини виступів з отриманням діаграм «навантаження-переміщення» при розтягуванні зі швидкостями переміщення захватного пристрою, що відповідають значенням  $v_1=1$  мм/хв.;  $v_2 = 5$  мм/хв. і  $v_3 = 10$  мм/хв. Таким чином, при розтягуванні одного зразка при заданій температурі нагрівання з перемиканням випробувальної машини в процесі

розтягування на різні швидкості переміщення захватного пристрою  $v_1=1$  мм/хв.;  $v_2 = 5$  мм/хв. і  $v_3 = 10$  мм/хв. виходили одночасно три діаграми «навантаження-переміщення» (рис. 4.2).

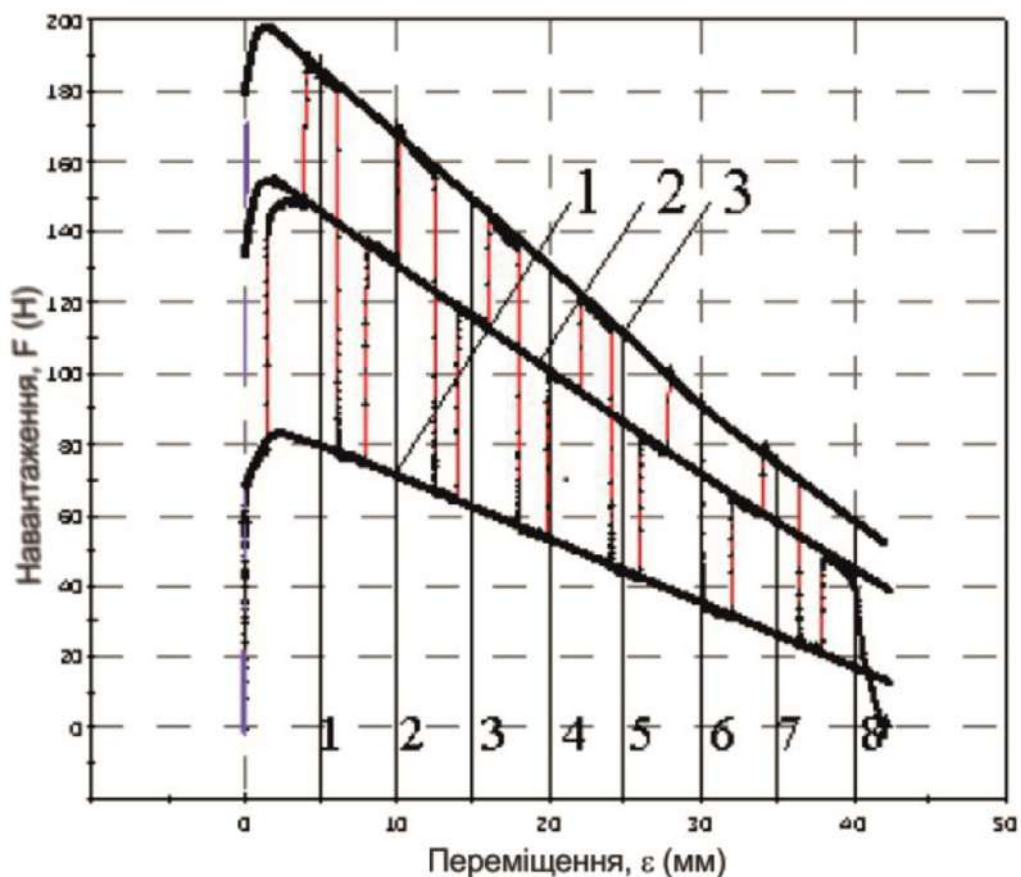


Рисунок 4.2 – Графіки «навантаження-переміщення», отримані за результатами випробувань на розтяг зразка зі сплаву АМг6М в процесі розтягування при заданій температурі нагріву 410°C:

- крива 1 – при швидкості переміщення захватного пристрою  $v_1=1$  мм/хв.;
- крива 2 – при швидкості переміщення захватного пристрою  $v_2 = 5$  мм/хв.;
- крива 3 – при швидкості переміщення захватного пристрою  $v_3 = 10$  мм/хв.

Результати обробки діаграм (рис. 4.2) «навантаження-переміщення» при розтягуванні одного зразка з графіками «навантаження-переміщення» (криві 1,

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		63

2, 3 за швидкостей переміщення захватного пристрою випробувальної машини відповідно  $v_1=1$  мм/хв.;  $v_2 = 5$  мм/хв. і  $v_3 = 10$  мм/хв.) наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати обробки діаграм «навантаження-переміщення» при розтягуванні зразків з алюмінієвого сплаву АМГ6М при температурі нагріву 410°C з перемиканням швидкостей переміщення захватного пристрою випробувальної машини  $v_1=1$  мм/хв.;  $v_2 = 5$  мм/хв. і  $v_3 = 10$  мм/хв. в процесі розтягування одного зразка (у 2-му перерізі)

№ етапу	Площа, мм <sup>2</sup>		Навантаження, кН			Деформація		Напруження, Н/мм <sup>2</sup>						
	1	2	1	2	3	Переріз1	Переріз2	Шв.1	Шв.2	Шв.10	Шв.1	Шв.5	Шв.10	
0	8.8690	8.8781												
1	7.6070	7.5130	78.33	147	184.37	0.1535	0.1669	10.30	19.32	24.24	10.43	19.57	24.54	
2	6.6594	6.5122	69.9	131.35	166.3	0.2865	0.3099	10.50	19.72	24.97	10.73	20.17	25.54	
3	5.9217	5.7463	61.46	116.89	147	0.4039	0.4350	10.38	19.74	24.82	10.70	20.34	25.58	
4	5.3009	5.1112	51.82	101.22	127.73	0.5147	0.5521	9.78	19.09	24.10	10.14	19.80	24.99	
5	4.8478	4.6524	44.59	87.97	109.66	0.6040	0.6462	9.20	18.15	22.62	9.58	18.91	23.57	
6	4.4237	4.2271	34.95	71.10	91.60	0.6956	0.7421	7.90	16.07	20.71	8.27	16.82	21.67	
7	4.0856	3.8907	25.31	56.64	74.71	0.7751	0.8250	6.19	13.86	18.29	6.51	14.57	19.20	
8	3.7881	3.5944	15.67	41	54.23	0.8507	0.9042	4.14	10.82	14.32	4.36	11.41	15.09	

На рис. 4.3 подано графіки залежності інтенсивності напруження від деформації при швидкостях деформації  $\dot{\epsilon}=\xi=3,77 \cdot 10^{-3}$  (рис. 4.3, а);  $\dot{\epsilon}=\xi=1,88 \cdot 10^{-3}$  (рис. 4.3, б);  $\dot{\epsilon}=\xi=3,77 \cdot 10^{-4}$  (рис. 4.3, в).

Після статистичної обробки були отримані рівняння регресії для швидкостей переміщення захватного пристрою випробувальної машини  $v_1=1$  мм/хв.;  $v_2 = 5$  мм/хв. і  $v_3 = 10$  мм/хв. відповідно:

$$\begin{aligned}
 \sigma_i &= -20.7964 \cdot \epsilon^2 + 13.9511 \cdot \epsilon + 08.4916; \\
 \sigma_i &= -31.2961 \cdot \epsilon^2 + 22.1707 \cdot \epsilon + 16.4407; \\
 \sigma_i &= -36.3371 \cdot \epsilon^2 + 25.8429 \cdot \epsilon + 20.9738;
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

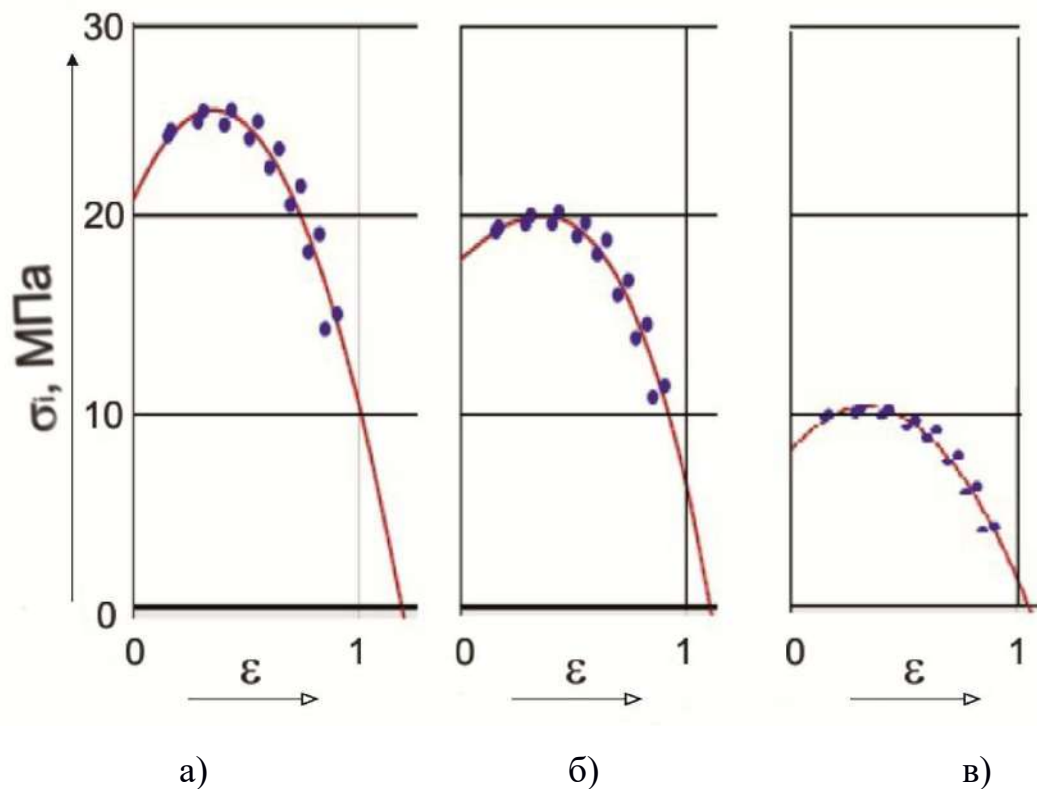


Рисунок 4.3 – Експериментальні графіки залежності інтенсивності напруження  $\sigma_i$  від ступеня деформації  $\varepsilon$  при фіксованій швидкості переміщення захватного пристрою випробувальної машини:

а) –  $\dot{\varepsilon}=\xi=3,77 \cdot 10^{-3}$ , б) –  $\dot{\varepsilon}=\xi=1,88 \cdot 10^{-3}$ , в) –  $\dot{\varepsilon}=\xi=3,77 \cdot 10^{-4}$

Після статистичної обробки отриманих рівнянь регресії з урахуванням впливу ступеня та швидкості деформації на інтенсивність напруження було отримано рівняння:

$$\sigma_i = 6,7095 \cdot [0,7951 \cdot (5,3536 + \ln \xi) + 0,7682 \cdot \varepsilon \cdot (6,4927 + \ln \xi) - \varepsilon^2 \cdot (6,8787 + \ln \xi)]. \quad (4.3)$$

Крім зниження трудомісткості випробувань на розтяг, підвищувалася точність експерименту завдяки тому, що температура випробувань для змінних швидкостей переміщення захватного пристрою одна і та сама, що відповідає

температурі нагріву одного зразка, тоді як при роздільному випробуванні декількох зразків забезпечити однакову температуру нагрівання в різних зразках важко.

Подальша обробка результатів експерименту за наведеною вище методикою дозволяє по випробуванню на розтяг одного зразка визначити експериментально залежність інтенсивності напруження не тільки від ступеня деформації, але і від швидкості деформації або швидкості переміщення захватного пристрою випробувальної машини.

Отримана залежність зміни інтенсивності напруження від ступеня та швидкості деформації дозволяє більш обґрунтовано визначати режими ізотермічного штампування листових металів.

Порівняння значень інтенсивності напружень  $\sigma_i$  від деформацій  $\varepsilon$  і швидкостей деформацій  $\dot{\varepsilon}=\xi$  показало, що похибка не перевищує 5 %.

#### 4.3 Прогнозування ефекту Портевена-Ле Шательє в АМгбМ за розподілом дисперсних частинок

Встановимо, як величина стрибкоподібних приростів деформації залежить від розміру дисперсних фаз та особливостей їхнього розподілу в сплаві АМгбМ, а також розробимо методику прогнозування стрибкоподібної деформації цього сплаву на основі гістограми розподілу дисперсних частинок у вихідному матеріалі.

Гладкі циліндричні зразки зі сплаву АМгбМ піддавали розтягуванню на універсальній розривній машині INSTRON 5982 за температури 20°C. Зразки діаметром 10 мм і робочою довжиною 25 мм виготовляли з прутків у стані постачання. Розтяг проводили зі швидкістю навантаження  $\leq 1,6$  МПа/с [39].

Мікроструктуру зразків аналізували за допомогою просвічувального електронного мікроскопа ПЕМ-125К. Тонкі фольги для досліджень вирізали в

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		66

поздовжньому та поперечному напрямках як із деформованих зразків, так і з недеформованого початкового прокату.

Металографічний аналіз мікроструктури сплаву АМг6М у первинному стані виконували на мікроскопі МІМ-10. Темплети для досліджень вирізали перпендикулярно до осі прокату.

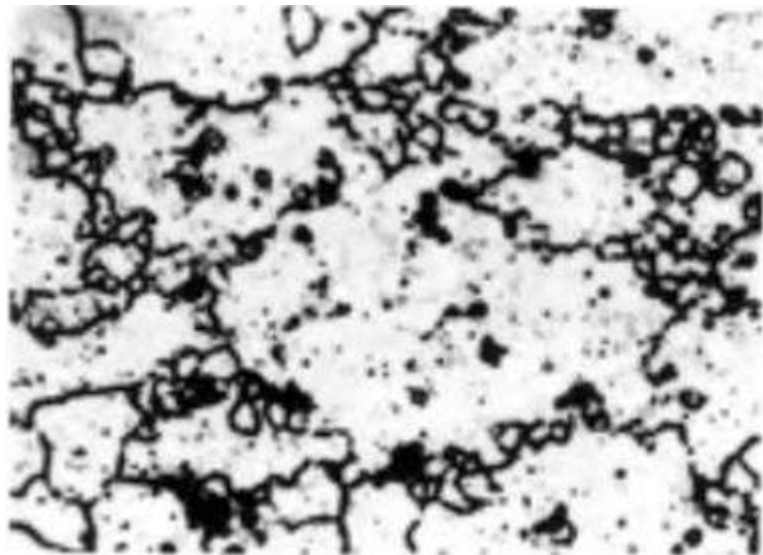
#### 4.3.1 Результати експериментальних досліджень

Під час розтягування сплаву АМг6М спостерігається явище переривчастої текучості, або стрибкоподібної деформації, яке за умов плавного навантаження проявляється на діаграмі деформування у вигляді характерних «сходинок». При цьому зі зростанням розтягувального напруження збільшується й величина деформаційного стрибка, тобто ширина «сходинки».

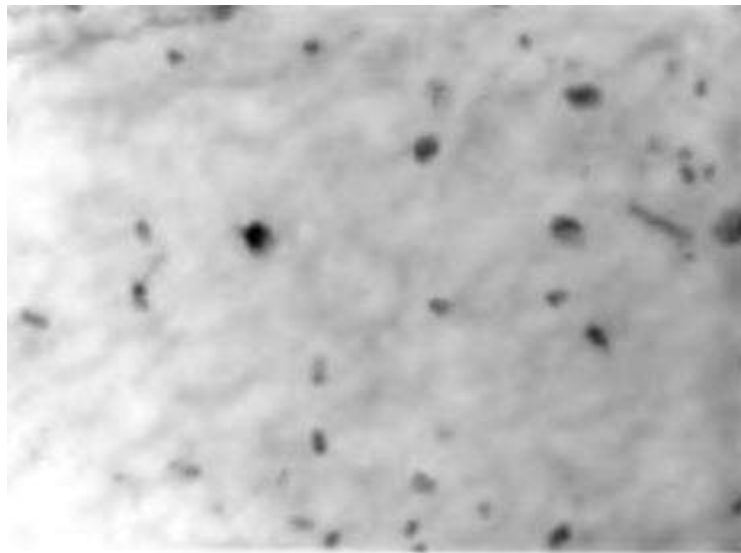
Електронно-мікроскопічний аналіз тонких фольг показав, що у матриці  $\alpha$ -твердого розчину Mg в Al містяться включення другої фази, рівномірно розподілені в об'ємі зерен. Переважної концентрації частинок на межах зерен не виявлено. Включення поділяються на два типи. Перший тип – це масивні частинки переважно округлої або витягнутої форми, середній розмір яких досягає 5,0 мкм. Другий тип – дисперсійні частинки правильної циліндричної форми завдовжки 0,25–4,00 мкм і діаметром 0,1–0,15 мкм, витягнуті вздовж напрямку прокатки заготовки. У матеріалі первинного стану обидва типи включень мають суцільну структуру.

На основі металографічних (рис. 4.4, а) та електронно-мікроскопічних досліджень (рис. 4.4, б) визначено кількість масивних включень і дисперсійних частинок у поперечному перерізі зразків сплаву АМг6М. Густина включень у поперечному перерізі на  $0,01 \text{ мм}^2$  при діаметрі 5–10, 1–2 та 0,1–0,15 мкм становила відповідно 24, 455 та 30000.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		67



а)



б)

Рисунок 4.4 – Мікроструктура сплаву АМг6М:

а) – первинний стан ( $\times 500$ ); б) – поперечний переріз ( $\times 2000$ )

Кількість дисперсійних частинок значно більша, ніж кількість масивних включень. Оскільки саме дрібнодисперсні частинки відіграють основну роль у гальмуванні руху дислокацій, подальший аналіз впливу другої фази на пластичну деформацію сплаву АМг6М проводили лише для дисперсійних частинок.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		68

Було виконано вимірювання геометричних характеристик та статистичний аналіз кількості дисперсних частинок залежно від початкового коефіцієнта форми  $a_0$ :

$$a_0 = \frac{l_0}{d_0},$$

де  $l_0$  – довжина дисперсної частинки,  $d_0$  – діаметр дисперсійної частинки у первинному матеріалі.

Залежність відносної кількості дисперсних частинок  $p$  від коефіцієнта форми  $a_0$  у первинному матеріалі наведена на рис. 4.5.

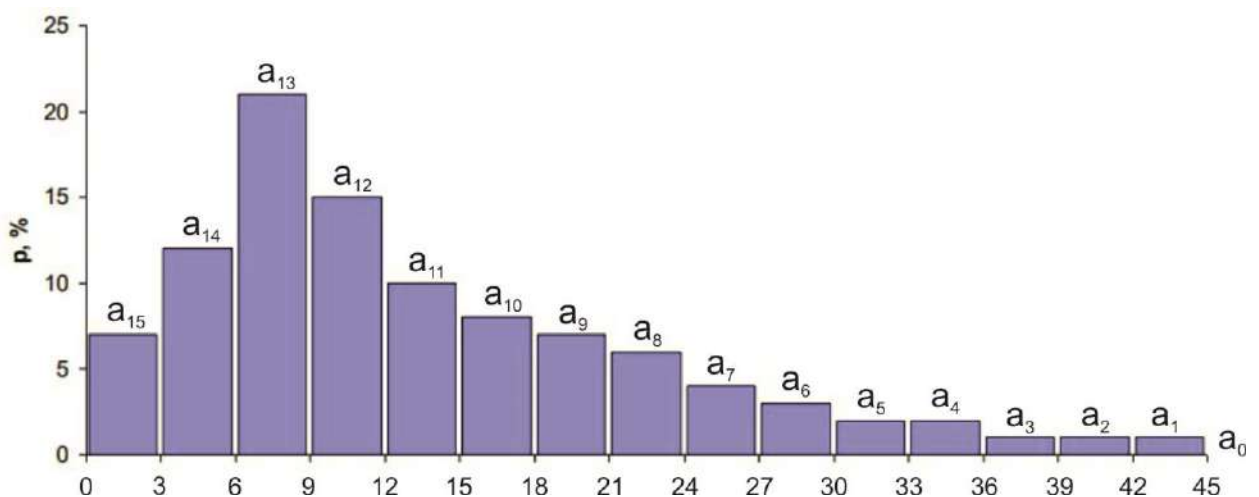
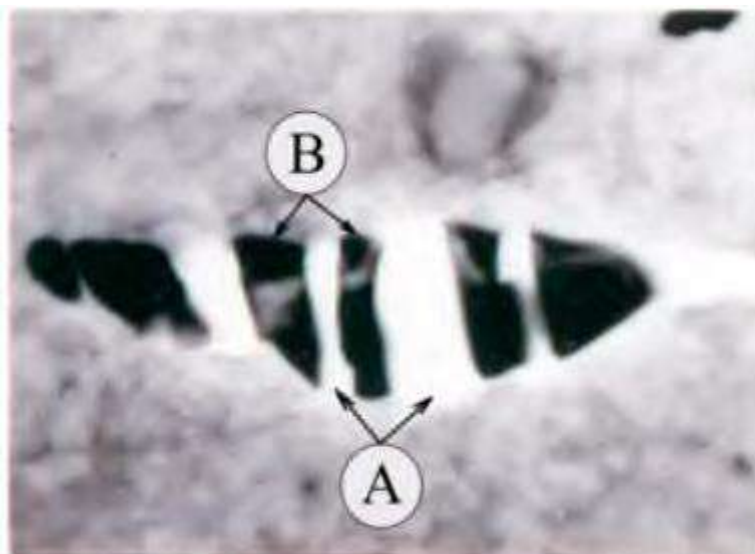


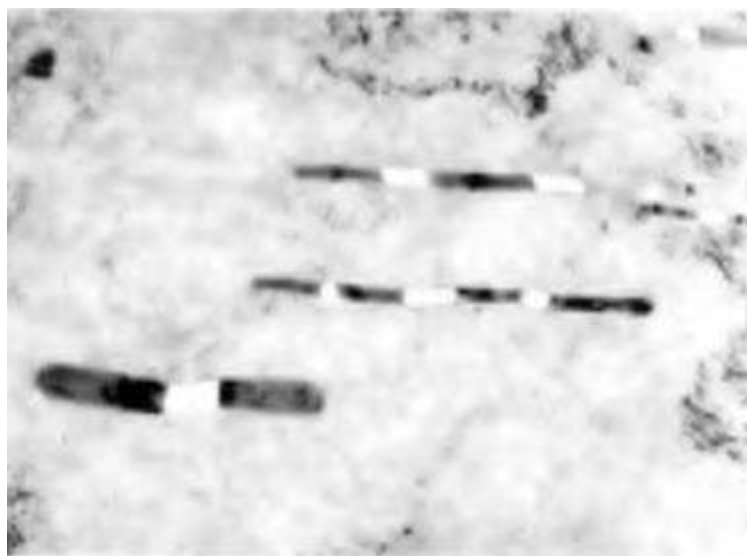
Рисунок 4.5 – Гістограма кількості дисперсійних частинок  $p$  в первинному матеріалі сплаву АМг6М залежно від коефіцієнта форми  $a_0$

Після випробувань на розтяг у поздовжньому напрямку зразків спостерігалось розтріскування на окремі фрагменти як масивних включень (рис. 4.6, а), так і дисперсних частинок (рис. 4.6, б). Переважно руйнування частинок відбувалося перпендикулярно до напрямку дії навантаження. Залежно від

початкового коефіцієнта форми  $a_0$  дисперсні частинки розтріскувалися на 3–7 фрагментів. Частинки з більшим  $a_0$  розпадалися на більшу кількість фрагментів.



а)



б)

Рисунок 4.6 – Мікроструктура сплаву АМг6М:

а) – розтріпані масивні частинки (світлі смуги А – порожнини, темні смуги В – фрагменти) ( $\times 5000$ ); б) – розтріпані дисперсні частинки ( $\times 20000$ )

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		70

Між фрагментами розтрісканих частинок формувалися пори. Їх розмір збільшувався зі зростанням пластичної деформації. Процес відшарування включень від матриці є статистично малоймовірним, який реалізувався переважно в геометрично несприятливих умовах поблизу великих частинок із рівновісною формою. Фізично це пояснюється дисбалансом критичних напружень: напруження, необхідне для руйнування крихких частинок, є меншим за напруження, яке потрібне для їх відшарування від матриці. Тому при ескалації зовнішнього навантаження домінуючим механізмом виявляється внутрішня деструкція частинок, а не їх відшарування.

Інтенсивність багатостадійного розтріскування дисперсних частинок корелювала з локальним напруженням в матричній фазі та величиною їх початкового коефіцієнта форми  $a_0$ . Виявлено існування критичного порогового значення  $a_0=3,7$ , при досягненні якого подальша фрагментація стає енергетично не вигідною та самообмежується. Більш того, частинки з початковим коефіцієнтом форми  $a_0 < 3,7$  зберігали структурну цілісність навіть під дією екстремальних деформацій у зоні шийки зразка. Отже, геометричний параметр у вигляді коефіцієнта форми виступає як фундаментальний критерій, що визначає потенційну здатність дисперсних включень до руйнування під навантаженням.

Мікроструктурний аналіз каверн, що утворилися внаслідок фрагментації включень, виявив широкий розмірний діапазон цих дефектів (рис. 4.6, а, б). Цей факт свідчить про поступову, а не миттєву деструкцію дисперсних частинок із прогресуванням деформації зразків. Процес руйнування відбувається ітеративно: при збільшенні зовнішнього навантаження шматки дисперсних включень розпадаються на дрібніші фрагменти у відповідності до рівня локальних напружень.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		71

#### 4.3.2 Результати аналітичних досліджень

Таким чином, сплав АМгбМ на мікрорівні функціонує як композитний матеріал, що складається з в'язкої алюмінієвої матриці та крихких дисперсних наповнювачів. У такій архітектурі тверді частинки виконують функцію перешкод для руху дислокацій. Коли накопичена густина дислокацій досягає критичного значення, напруження в зародках дислокаційних скупчень перевищує міцність крихких включень, що призводить до їх руйнування та одночасного розсіювання дислокаційної хмари. Цей релаксаційний процес супроводжується стрибкоподібним приростом пластичної деформації. Враховуючи, що кожна зруйнована частинка певного розміру дає внесок у загальний приріст деформації, пропонується наступна методика оцінки амплітуди стрибкоподібної деформації:

$$\Delta\varepsilon_i = g(\sigma_i) \cdot p_i, \quad (4.4)$$

де  $g(\sigma_i)$  – функція зміцнення матеріалу при відповідному напруженні розтягу  $\sigma_i$ ,  $p_i$  – відносна кількість дисперсних частинок розміру  $a_i$ .

Залежність між амплітудою стрибкоподібних приростів пластичної деформації та відповідним максимальним напруженням розтягу подана на рис. 4.7.

Встановлено, що величина приросту пластичної деформації майже лінійно зростає під час кожного наступного стрибка при збільшенні напруження для всіх досліджених зразків. Аналітичне представлення цієї закономірності, одержане на основі регресійного аналізу, наступне:

$$\Delta\varepsilon_i = 1.4545 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_i - 0.0292. \quad (4.5)$$

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		72

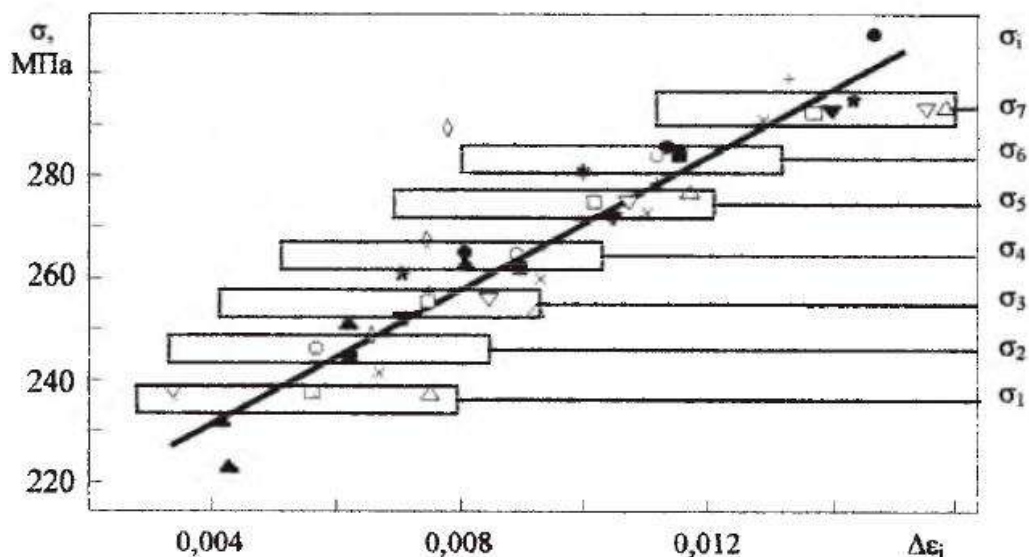


Рисунок 4.7 – Експериментальна залежність приростів деформації  $\Delta\varepsilon_i$  від напружень  $\sigma_i$  (12 зразків сплаву АМгбМ, однакові умови випробувань)

Таким чином, близько 75 % приростів деформації реалізується в діапазонах напружень, які корелюють з розтріскуванням дисперсних частинок конкретного розміру  $a_i$  (на рис. 4.7 відповідні інтервали позначені прямокутниками). Виявлено, що залежність критичного напруження розтріскування  $\sigma_i$  від розміру частинок  $a_i$  при розтягуванні має чітко виражений лінійний характер та може бути описана як функція індексу розмірного класу. Лінійне рівняння регресії має вигляд:

$$\sigma_i = 235 + 10(i - 1). \quad (4.6)$$

На основі гістограми, наведеної на рис. 4.5, та формули (4.6) побудовано динамічну діаграму коефіцієнтів форми дисперсних частинок і їхніх фрагментів під час розтягування сплаву АМгбМ залежно від напружень, за яких відбувається руйнування частинок відповідного розміру (рис. 4.8). При цьому

враховано, що після досягнення фрагментом коефіцієнта форми 3,7 подальше дроблення припиняється.

Припускається, що спочатку руйнуються дисперсні частинки з максимальним коефіцієнтом форми  $a_1$ , що викликає перший стрибок деформації. У результаті утворюється вдвічі більше дисперсних частинок із коефіцієнтом форми, вдвічі меншим за  $a_1$ . Таким чином, у діаграму розподілу дисперсних частинок вноситься поправка на зміну їхньої кількості.

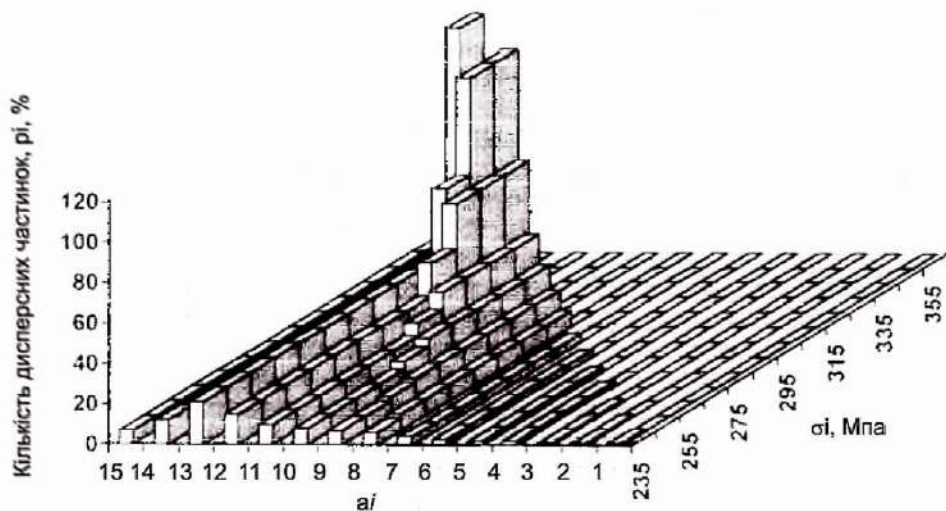


Рисунок 4.8 – Теоретична діаграма розподілу фрагментів дисперсних частинок у сплаві АМгбМ при розтягуванні

На динамічній діаграмі до напруження 235 МПа кількість дисперсних частинок відповідає гістограмі вихідного матеріалу. При вищих значеннях напруження розтягу кількість частинок подано відносно їхньої кількості на початку стрибкоподібних приростів деформації, з урахуванням фрагментів, утворених унаслідок розтріскування дисперсних частинок.

Коефіцієнти форми фрагментів дисперсних частинок розраховувалися на основі динамічної діаграми, отриманої після розтягування сплаву АМгбМ. Рис. 4.9 ілюструє порівняльну гістограму розрахункових та експериментально виміряних (методом електронної мікроскопії) значень. Диспропорції між

теорією та експериментом пояснюються просторовою неоднорідністю пластичного потоку в матеріалі.

Функцію  $g(\sigma_i)$ , що характеризує зміцнення матеріалу при напруженні розтягу  $\sigma_i$ , визначаємо за формулами (4.4), (4.5) з подальшою лінійною апроксимацією (рис. 4.10):

$$g(\sigma_i) = 1,575 - 4,39 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_i . \quad (4.7)$$

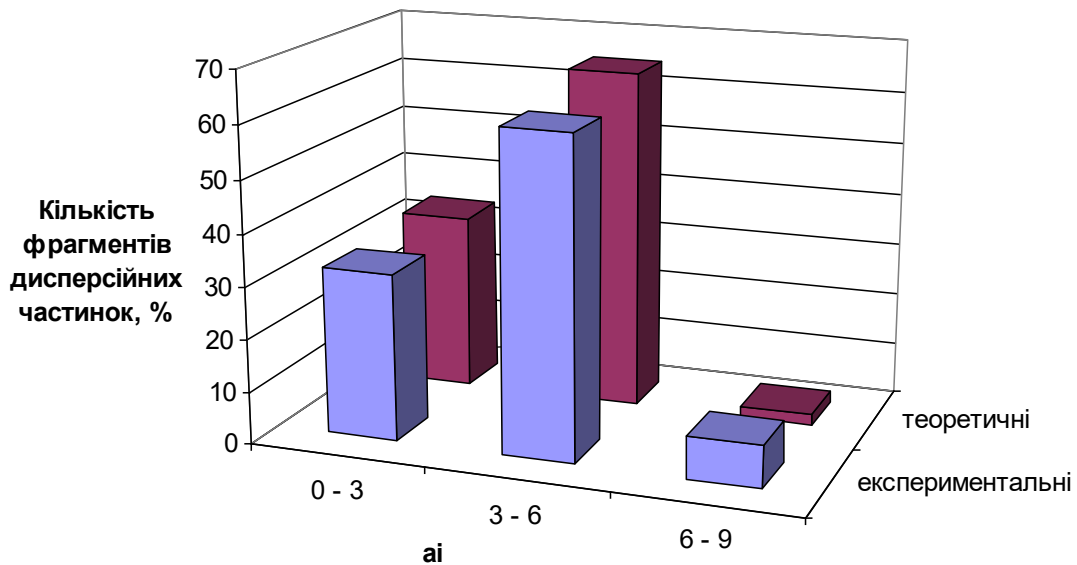


Рисунок 4.9 – Порівняльна гістограма кількості фрагментів дисперсних частинок залежно від коефіцієнта їх форми після розтягування зразків сплаву АМг6М

Отже, приріст деформації  $\Delta \epsilon_i$ , зумовлена руйнуванням дисперсійних частинок розміру  $a_i$ , буде:

$$\Delta \epsilon_i = (1,575 - 4,39 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_i) \cdot p_i , \quad (4.8)$$

де  $\sigma_i$  – напруження руйнування;  $p_i$  – відносна кількість дисперсійних частинок.

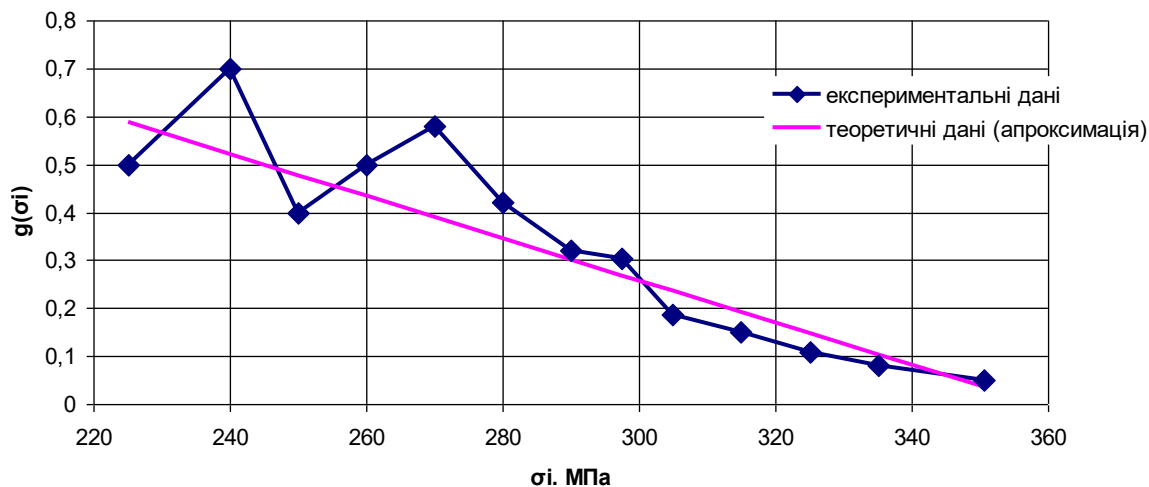


Рисунок 4.10 – Функція  $g(\sigma_i)$  при напруженні розтріскування  $\sigma_i$

Методику допустимо застосовувати для передбачення стрибкоутворення в АМГБМ за умови зміни його початкової структури.

#### Висновки до розділу 4

1. Пропонована методика та спосіб визначення інтенсивності напружень від деформації та швидкості деформації зразка з металу при розтягуванні з підвищеною температурою значно зменшують трудомісткість випробування (у прикладі, що розглядається, в три рази).

2. Підвищення точності результатів досліджень досягається завдяки тому, що випробовується один зразок при заданій температурі нагріву в процесі перемикання швидкостей переміщення захватних органів випробувальної машини, тоді як при роздільному розтягуванні зразків однаковий температурний режим нагрівання є важко реалізованим.

3. Сформульовано та підтверджено гіпотезу про причинний зв'язок між стрибкоподібною деформацією сплаву АМГБМ при статичному розтягуванні у

м'якому режимі та послідовним руйнуванням дисперсних включень другої фази.

4. Отримано розрахункову модель, що описує величину стрибкоподібних приростів деформації як функцію розмірної характеристики та розподілу дисперсних фаз.

5. Запропоновано методику прогнозування параметрів стрибкоподібної деформації, яка базується на аналізі гістограми розподілу дисперсних частинок у первинній структурі матеріалу.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		77

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналітичний огляд сучасних досліджень, присвячених впливу температури та швидкості деформації на механічні властивості металів. Встановлено, що температуру та швидкість деформації можна розглядати як еквівалентні, але протилежні за дією фундаментальні параметри, які визначають механічну відповідь металів. Ця закономірність має критичне значення для оптимізації технологій обробки тиском та оцінки працездатності конструкцій. Для сплаву АМгбМ підтверджено високу пластичність навіть за ударних швидкостей деформування, однак для побудови повної моделі напружено-деформованого стану необхідні систематичні дослідження в широкому інтервалі температур та швидкостей розтягування.

2. Удосконалено методику механічних випробувань та статистичного аналізу для кількісного встановлення взаємозв'язку між напруженнями та параметрами деформування сплаву АМгбМ.

Пропонована методика та спосіб визначення інтенсивності напружень від деформації та швидкості деформації зразка з металу при розтягуванні з підвищеною температурою значно зменшують трудомісткість випробування (у прикладі, що розглядається, в три рази).

Підвищення точності результатів досліджень досягається завдяки тому, що випробовується один зразок при заданій температурі нагріву в процесі перемикання швидкостей переміщення захватних органів випробувальної машини, тоді як при роздільному розтягуванні зразків однакового температурний режим нагрівання є важко реалізованим.

3. Експериментально визначено механічні властивості сплаву АМгбМ в інтервалі температур гарячого деформування за різних швидкостей деформування.

4. Встановлено закономірності поведінки сплаву АМгбМ в умовах повільного гарячого деформування.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		78

5. Розроблено науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимальних режимів гарячого пресування сплаву АМгбМ.

6. Обґрунтовано причинно-наслідковий зв'язок між руйнуванням дисперсних включень другої фази та стрибкоподібною деформацією сплаву АМгбМ при статичному розтягуванні в м'якому режимі навантаження.

7. Запропоновано методику розрахунку приростів пластичної деформації на основі аналізу гістограми розподілу дисперсних частинок у матриці сплаву.

8. Побудовано динамічні діаграми зміни коефіцієнтів форми та кількості дисперсних частинок залежно від рівня напружень їх руйнування.

9. Експериментально підтверджено адекватність розрахункової моделі для прогнозування стрибкоподібною деформації сплаву АМгбМ.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		79

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 Qin X, Yan W, Liang Y, Li F. Effects of the temperature, strain rate, and loading conditions on the deformation behaviors and mechanical properties of the Ni/Ni3Al superalloy. RSC Adv. 2024 Jul 9;14(30):21821-21831. doi: 10.1039/d4ra04034a.

2 George T. (Rusty) Gray III High-Strain-Rate Deformation: Mechanical Behavior and Deformation Substructures Induced. // Annual Review of Materials Research. Vol. 42, 2012:285-303 <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070511-155034>

3 Kocks, U. F., & Mecking, H. (2003). Physics and phenomenology of strain hardening: The FCC case. Progress in Materials Science, 48, 171–273. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(02\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(02)00003-8)

4 Puspasari, V.; Astawa, I.N.; Herbirowo, S.; Mabururi, E. Mechanical properties and microstructure of Al–Mg (5052) alloy processed by equal-channel angular pressing (ECAP) with variation of ECAP routes and heat treatment. Izvestiya. Ferr. Metall. 2024, 67, 37–46.

5 Testa, G.; Bonora, N.; Ruggiero, A.; Iannitti, G. Flow Stress of bcc Metals over a Wide Range of Temperature and Strain Rates. Metals 2020, 10, 120. <https://doi.org/10.3390/met10010120>

6 Biswajit Banerjee, The Mechanical Threshold Stress model for various tempers of AISI 4340 steel, International Journal of Solids and Structures, Volume 44, Issues 3–4, 2007, Pages 834-859. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.05.022>.

7 P.S. Follansbee, U.F. Kocks, A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable, Acta Metallurgica,

Volume 36, Issue 1, 1988, Pages 81-93. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(88\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0001-6160(88)90030-2).

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		80

8 Metal Forming Mechanics and Metallurgy , pp. 52 - 75 Publisher: Cambridge University Press Print publication year: 2011. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976940.006>

9 Dowding, I., Schuh, C.A. Metals strengthen with increasing temperature at extreme strain rates. Nature 630, 91–95 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07420-1>

10 Yuan Li, Yong Chae Lim, Jian Chen, Jiheon Jun, Zhili Feng, Mechanical joint performances of friction self-piercing riveted carbon fiber reinforced polymer and AZ31B Mg alloy, Journal of Magnesium and Alloys, Volume 10, Issue 12, 2022, Pages 3367-3379. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.09.015>.

11 Pouranvari, Majid. (2017). Critical assessment: dissimilar resistance spot welding of aluminium/steel: challenges and opportunities. Materials Science and Technology. 33. 1-8. 10.1080/02670836.2017.1334310.

12 Zerilli, Frank. (2004). Dislocation mechanics-based constitutive equations. Metallurgical and Materials Transactions A. 35. 2547-2555. 10.1007/s11661-004-0201-x.

13 Jiang Y, Zou T, Liu M, Cai Y, Wang Q, Wang Y, Pei Y, Zhang H, Liu Y, Wang Q. Temperature and Strain Rate Dependence on the Tensile Mechanical Properties, Constitutive Equations, and Fracture Mechanisms of MarBN Steel. Materials. 2023; 16(8):3232. <https://doi.org/10.3390/ma16083232>

14 D. Scott MacKenzie. The mechanism of creep and its stages. (2024) URL: <https://thermalprocessing.com/the-mechanism-of-creep-and-its-stages/>

15 Li, T., Zhao, B., Lu, X., Xu, H., & Zou, D. (2019). A Comparative Study on Johnson–Cook, Modified Zerilli–Armstrong, and Arrhenius-Type Constitutive Models to Predict Compression Flow Behavior of SnSbCu Alloy. Materials, 12(10), 1726. <https://doi.org/10.3390/ma12101726>

16 Johnson, G. R., & Cook, W. H. (1983). A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings

					<i>KPTAM 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		81

— 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, April 19–21, 1983, pp. 541–547.

17 Bouaziz, O. (2012), Revisited Storage and Dynamic Recovery of Dislocation Density Evolution Law: Toward a Generalized Kocks–Mecking Model of Strain-Hardening. Adv. Eng. Mater., 14: 759-761. <https://doi.org/10.1002/adem.201200083>

18 HLC Metal Parts. (2024, May 30). Що таке термічна обробка? Практичне застосування термічної обробки в різних галузях промисловості. URL: <http://ua.hlc-metalparts.com/news/what-is-heat-treatment-78849714.html>

19 Вогнестійкість і холодостійкість як ключові фактори експлуатації конструкцій в умовах пожеж та низьких температур. (2024). Інформаційно-аналітичний ресурс з будівельних матеріалів та технологій. URL: [https://eprints.kname.edu.ua/43022/1/2012%203%D0%9D%20%D0%9A%2B%D0%A0%20%D0%9F%D0%9E%D0%A1%D0%86%D0%91%D0%9D%D0%98%D0%9A%20%D0%B2%20%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B0%D1%82%D1%8C\\_.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/43022/1/2012%203%D0%9D%20%D0%9A%2B%D0%A0%20%D0%9F%D0%9E%D0%A1%D0%86%D0%91%D0%9D%D0%98%D0%9A%20%D0%B2%20%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B0%D1%82%D1%8C_.pdf)

20 СТИЛ-СЕРВІС. (2020, 29 жовтня). Сплав АМгб: характеристики, властивості, ГОСТи, сфери застосування. URL: <https://steelservice.com.ua/alyuminij-amgb/>

21 Кваліфікаційна робота магістра Дослідження точності пневмоударного штампування листових деталей Дегтяр Є.І. (2023). URL: [https://document.kdu.edu.ua/diplom/2023\\_mag\\_5442.pdf](https://document.kdu.edu.ua/diplom/2023_mag_5442.pdf)

22 Дія імпульсного електромагнітного поля на залишковий напружено-деформований стан зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМгб / "Проблеми міцності", 2021, № 6, с.

23 Altair Engineering. (2024). Equivalent stress concept to account for the effect of local stress ratio on transverse cracking in laminates. International Journal of Fatigue, 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112324003402>

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		82



Materials Science for Engineers (Askeland and Fulay)/08%3A Metal Forming/8.01%3A Hot Working

33 Пошивалов В.П., Кузмицька А.І., Телегіна І.І. (2019). Поліпшення фізико-механічних характеристик сплавів системи Al-Mg для конструктивного захисту транспортних засобів. Журнал "Інформаційно-технологічне моделювання", №4. URL: <https://www.journal-itm.dp.ua/docs/P-10-04-2019.pdf>

34 Takahashi, K., et al. (2020). High Temperature Deformation and Microstructure of  $\gamma'$  Precipitation Strengthening Ni-Base Superalloy TMW-4M3. Materials Transactions, 61(4), 707-713. URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/61/4/61\\_MT-MBW2019002/\\_html/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/61/4/61_MT-MBW2019002/_html/-char/en)

35 Peng, L., et al. (2022). Effect of Zener–Hollomon parameter on hot deformation behavior of 6016 aluminum alloy. Journal of Materials Research and Technology, 19, 4025-4035. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.07.094

36 Wang, S.-Q., et al. (2023). Hot Deformation Behavior and Processing Map Considering Strengthening Effect for Al–10.0Zn–3.0Mg–2.8Cu alloy. Materials, 16(5), 1880. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16051880>

37 Taktak, W.; Elleuch, R. Mechanical Properties and Fracture Toughness Behavior of Cold Worked AA 5754 Alloy. In Advances in Acoustics and Vibration IV; Akrouf, A., Abdennadher, M., Feki, N., Abbas, M.S., Chaari, F., Haddar, M., Eds.; ICAV 2022; Applied Condition Monitoring; Springer: Cham, Switzerland, 2023; Volume 22

38 Tian N, Wang W, Feng Z, Song W, Wang T, Zeng Z, Zhao G, Qin G. Portevin-Le Chatelier Characterization of Quenched Al-Mg Alloy Sheet with Different Mg Concentrations. Materials (Basel). 2022 Jul 17;15(14):4965. doi: 10.3390/ma15144965

39 П. В. Ясній, С. І. Федак, В. Б. Гладь, М. П. Галушак Стрибокподібна деформація сплаву АМгб при розтязі // Проблеми міцності, 2004, № 2, 5-13.

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		84

40 Mahajan, Aditya & Nagumothu, Kishore & Talari, Mahesh & Lateef-Ur-Rehman, Ateekh-Ur-Rehman & Srirangam, Prakash. (2023). Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Rotary Friction Welded AA7075 and AA5083 Dissimilar Joint. *Materials*. 16. 2464. 10.3390/ma16062464.

41 P.G McCormick, The Portevin-Le Chatelier effect in an Al-Mg-Si alloy, *Acta Metallurgica*, Volume 19, Issue 5, 1971, Pages 463-471, ISSN 0001-6160, [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(71\)90170-2](https://doi.org/10.1016/0001-6160(71)90170-2).

42 Krashchenko, V.P., Rudnitskii, N.P., Dvoeglazov, G.A. et al. Mechanical characteristics of alloy AMg6M in broad temperature and strain-rate ranges. *Strength Mater* 17, 775–782 (1985). <https://doi.org/10.1007/BF01528727>

43 EN 573-3:2019 Aluminium and aluminium alloys. Chemical composition and form of wrought products. Chemical composition and form of products. — Brussels : CEN, 2019. — 42 p.

44 ДСТУ EN ISO 6892-1:2019 Металічні матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування при кімнатній температурі. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. — V, 63 с.

45 ISO 6892-2:2018. Metallic materials — Tensile testing — Part 2: Method of test at elevated temperature. Geneva: ISO, 2018. 34 p.

46 Instron. (2024). 5980 Series Floor Model Universal Testing Machine Data Sheet. — Norwood, MA : Instron, 2024. — 2 p. URL: [https://www.instron.com/wp-content/uploads/2025/02/5980-series-dual-column-floor-model-100kn-600kn\\_en.pdf](https://www.instron.com/wp-content/uploads/2025/02/5980-series-dual-column-floor-model-100kn-600kn_en.pdf)

47 ДСТУ EN ISO 9513:2019. Системи вимірювання подовження при механічних випробуваннях металів. Вимоги до калібрування. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 28 с.

48 ДСТУ EN ISO 7500-1:2022 Матеріали металеві. Калібрування та перевірка статичних одноосьових випробувальних машин. Частина 1. Випробувальні машини на розтягування та стиснення. Калібрування та перевірка силовимірювальної системи (EN ISO 7500-1:2018, IDT; ISO 7500-1:2018, IDT). — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		85

49 ISO 783:1989 Metallic materials — Tensile testing at elevated temperatures. — Geneva : International Organization for Standardization, 1989.

					<i>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		86

# ДОДАТОК А

## Презентаційний матеріал



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

### Дослідження впливу температури, ступеня та швидкості деформації на напружено-деформований стан металевих зразків при розтягненні

Виконав : студент групи МТВАм-24-1  
Дмитро ПРУС

Керівник : д.т.н., професор Ілона ДРАЧ



**Об'єкт** дослідження – процес деформування металевих зразків при розтягненні.

**Предмет** дослідження – вплив температури, ступеня та швидкості деформації на напружено-деформований стан металевих зразків та закономірності зміни їхніх механічних характеристик.

**Мета** дослідження – дослідження впливу температури, ступеня та швидкості деформації на напружено-деформований стан металевих зразків при розтягненні та встановлення основних закономірностей зміни механічних властивостей металів у цих умовах.

2

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		87

## Завдання дослідження :

1. Провести аналітичний огляд сучасних досліджень, присвячених впливу температури та швидкості деформації на механічні властивості металів.
2. Розробити методику експериментального дослідження розтягнення металевих зразків у різних температурних і швидкісних режимах.
3. Провести експериментальні дослідження механічних властивостей сплаву АМг6М на розтягування в інтервалі температур гарячого деформування з отриманням даних для виявлення закономірностей поведінки матеріалу та формування обґрунтованих рекомендацій щодо оптимальних режимів гарячого пресування (кування).
4. Дослідити механізм стрибкоподібної деформації сплаву АМг6М шляхом аналізу руйнування дисперсних включень другої фази, розробити розрахункову модель приростів пластичної деформації на основі гістограми їх розподілу та експериментально верифікувати адекватність побудованих діаграм зміни коефіцієнтів форми і кількості частинок залежно від рівня напружень.

3

## РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1. Температура та швидкість деформації є фундаментальними параметрами, що визначають механічну відповідь металів. Їх вплив має еквівалентний, але протилежний характер: підвищення  $T$  еквівалентне зниженню  $\dot{\epsilon}$ .
2. Комплексний аналіз за допомогою параметра Зенера-Голломона дозволяє кількісно описати поведінку матеріалу.
3. Практичне застосування цих закономірностей критично важливе для оптимізації технологій обробки тиском та оцінки працездатності конструкцій.
4. Для сплаву АМг6М характерна висока пластичність навіть при ударних швидкостях, але потребує додаткових систематичних досліджень при різних температурах та швидкостях розтягування для побудови повної моделі НДС.
5. При побудові експериментальної методики слід охопити достатній діапазон температур і швидкостей (від квазістатичних до високошвидкісних), аби виявити перехідні режими механізмів деформації.
6. Для інтерпретації результатів необхідно поєднувати макромеханічні характеристики з мікроструктурним аналізом для встановлення причин зміни властивостей.
7. Варто розглядати одночасне калібрування декількох конститутивних моделей (емпіричних і фізично-обґрунтованих) – це підвищить надійність прогнозів у чисельних розрахунках.

4

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### Al-сплави при гарячому розтягуванні:

Поведінка залежить від  $\epsilon$ ,  $\dot{\epsilon}$ ,  $T$ . При  $T > 200^\circ\text{C}$  — динамічне відновлення, зниження опору. Параметр  $Z$  об'єднує  $T$  та  $\dot{\epsilon}$  (оптимум:  $250\text{-}320^\circ\text{C}$ ,  $\dot{\epsilon} = 10^{-3}\text{--}1\text{ c}^{-1}$ ).

### Стрибкоподібна деформація АМг6М:

Динамічне деформаційне старіння при  $20\text{-}150^\circ\text{C}$  (взаємодія дислокацій з Mg  $\rightarrow$  смуги Людерса)

Усунення: холодне обжаття 20% або стабілізаційний відпуск  
Критично для якості прокату та довговічності

5

					КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		88

## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1. Мета та завдання

Визначення залежності напруги-деформації для сплаву AMg6M у широкому діапазоні температур (20–450 °C) та швидкостей ( $10^{-4}$ – $10^{-1}$  с $^{-1}$ ) для побудови конститутивних моделей та карт пластичності.

### 2. Матеріал і підготовка зразків

Хімічний склад: Al-Mg-Mn (Mg 5,8–6,8%, Mn 0,5–0,8%) — ДСТУ EN 573-3:2015

Початковий стан: відпалений (310–335 °C, 2 год)

Геометрія зразків: циліндри  $\varnothing 10 \times 120$  мм для гарячого розтягування, плоскі за ДСТУ EN ISO 6892-1

Технологія: точкове електроерозійне різання, шліфування Ra  $\leq 0,8$  мкм, контроль дефектів

Підготовка до високотемпературних випробувань: нанесення графітового захисного покриття

6

## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

### 3. Обладнання та вимірювальні засоби

**Розтяг:** універсальна машина INSTRON 5982 (100 кН, точність  $\pm 0,4\%$ )

**Високі температури:** індукційний нагрів

**Вимірювання деформації:** екстенсометр ( $\pm 0,5\%$ ), цифрова кореляція зображень

### 34. Методика випробувань

**Режими:** квазістатичні ( $\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ – $10^{-3}$  с $^{-1}$ ), середні ( $10^{-2}$  с $^{-1}$ ), високошвидкісні ( $10^{-1}$  с $^{-1}$ )

**Температури:** 20, 150, 250, 350, 450 °C з витримкою 10 хв

**Контроль:** параметр Zener-Hollomon, 3 повтори для кожного режиму, валідація за ISO 6892-2 та ДСТУ EN ISO 7500-1

7

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

1. Удосконалено методику експериментального дослідження розтягнення металевих зразків у різних температурних і швидкісних режимах: досліджувалась можливість визначення інтенсивності напружень від інтенсивності деформації залежно від швидкості деформації за випробуваннями одного зразка

Параметри : нагрів зразків до 410°C, розтяг не з циклічною зміною швидкості переміщення захватного пристрою ВМ  $v_1=1$  мм/хв.;  $v_2 = 5$  мм/хв. і  $v_3 = 10$  мм/хв. в інтервалі подовження 5...10 % від загального подовження

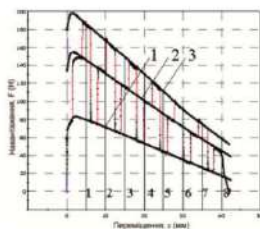


Рисунок 1 – Графіки «навантаження-переміщення»: крива 1 – при швидкості переміщення захватного пристрою  $v_1=1$  мм/хв.; крива 2 – при швидкості переміщення захватного пристрою  $v_2 = 5$  мм/хв.; крива 3 – при швидкості переміщення захватного пристрою  $v_3 = 10$  мм/хв.

8

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ

Арк.

89

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

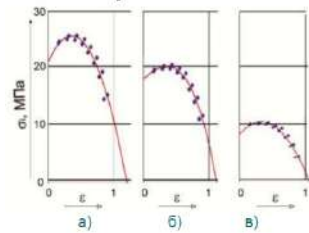


Рисунок 2 – Експериментальні графіки залежності інтенсивності напруження  $\sigma_i$  від ступеня деформації  $\varepsilon$  при фіксованій швидкості переміщення захватного пристрою випробувальної машини:

а) –  $\dot{\varepsilon} = 3,77 \cdot 10^{-3}$ , б) –  $\dot{\varepsilon} = 1,88 \cdot 10^{-3}$ , в) –  $\dot{\varepsilon} = 3,77 \cdot 10^{-4}$

Залежність зміни інтенсивності напруження від ступеня та швидкості деформації дозволяє більш обґрунтовано визначати режими ізотермічного штампування листових металів:

$$\sigma_i = 6,7095 \cdot [0,7951 \cdot (5,3536 + \ln \xi) + 0,7682 \cdot \varepsilon \cdot (6,4927 + \ln \xi) - \varepsilon^2 \cdot (6,8787 + \ln \xi)].$$

9

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

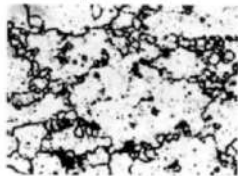
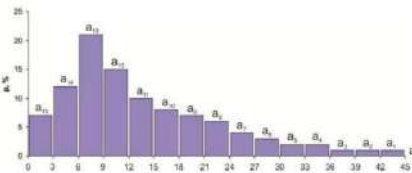


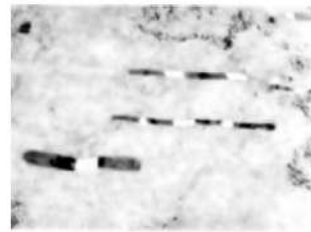
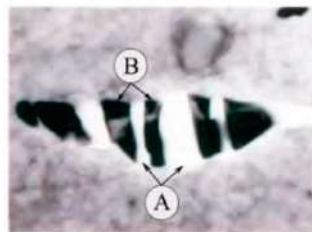
Рисунок 3 – Мікроструктура сплаву АМг6М: первинний стан ( $\times 500$ )

Рисунок 4 – Гістограма кількості дисперсійних частинок  $r$  в первинному матеріалі сплаву АМг6М залежно від коефіцієнта форми  $a_0$



10

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ



а) б)

Рисунок 5 – Мікроструктура сплаву АМг6М: а) – розтріпані масивні частинки (світлі смуги А – порожнини, темні смуги В – фрагменти) ( $\times 5000$ ); б) – розтріпані дисперсні частинки ( $\times 20000$ )

11

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ

Арк.

90

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

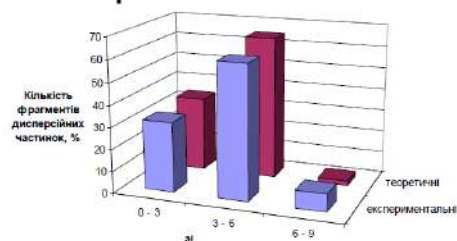


Рисунок 6 – Порівняльна гістограма кількості фрагментів дисперсних частинок залежно від коефіцієнта їх форми після розтягування зразків сплаву АМг6М

Функція  $g(\sigma)$ , що характеризує зміцнення матеріалу при напруженні розтягу  $\sigma$ :  
 $g(\sigma) = 1,575 - 4,39 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma$ .

Приріст деформації  $\Delta \epsilon_i$ , зумовлена руйнуванням дисперсійних частинок розміру  $a_i$ :

$$\Delta \epsilon_i = (1,575 - 4,39 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_i) \cdot \rho_i$$

12

## Висновки

1. Удосконалено методику механічних випробувань та статистичного аналізу для кількісного встановлення взаємозв'язку між напруженнями та параметрами деформування сплаву АМг6М.
2. Експериментально визначено механічні властивості сплаву АМг6М в інтервалі температур гарячого деформування за різних швидкостей деформування.
3. Встановлено закономірності поведінки сплаву АМг6М в умовах повільного гарячого деформування.
4. Обґрунтовано причинно-наслідковий зв'язок між руйнуванням дисперсних включень другої фази та стрибкоподібною деформацією сплаву АМг6М при статичному розтягуванні в м'якому режимі навантаження.
5. Запропоновано методику розрахунку приростів пластичної деформації на основі аналізу гістограми розподілу дисперсоїдів у матриці сплаву.
6. Побудовано діаграми зміни коефіцієнтів форми та кількості дисперсних частинок залежно від рівня напружень їх руйнування.
7. Експериментально підтверджено адекватність розрахункової моделі для прогнозування стрибкоподібною деформації сплаву АМг6М.

13

					<b>КРТАМ 25 24355. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		91