Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота магістра

рівень вищої освіти___другий (магістерський) рівень_____
(другий (магістерський) рівень)

на тему___«Удосконалення технології екструзії алюмінієвих сплавів»_____

Виконав: студент ___2__курсу, групи *8.1364-омт*

__Доброхвалов С. В._____
(ПІБ) (підпис)

спеціальності
_____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)

спеціалізація
_____
(шифр і назва)

освітньо-професійна програма
*обробка металів тиском*_____
(шифр і назва)

Керівник _Бєлоконь Ю.О._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент __Григор'в С. М._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2025 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра _____*металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*___
Рівень вищої освіти _____*другий (магістерський) рівень*_____
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність ___*136 металургія*_____
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма ___*обробка металів тиском*_____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ___*МТЕТБ*_
_____*Ю. О. Бєлоконь*_

"__" _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Доброхвалов Сергій Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта)____« Удосконалення технології екструзії алюмінієвих сплавів»_____
керівник роботи (проєкту)_____*Бєлоконь Юрій Олександрович*_____*д.т.н, проф.*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від 27.02.2025 року № 319-с
2. Строк подання студентом роботи (проєкта)____*01.12.2025*_____
3. Вихідні дані до роботи (проєкта)__Мета дослідження - експериментально визначити вплив відстані тонкостінного каналу від центра матриці при різних співвідношеннях розміру форкамери і температури заготівлі на нерівномірність витікання для випадку багатоканального пресування алюмінієвого сплаву. Параметр дослідження – вплив технологічних факторів процесу на розміри поперечного перерізу тонкостінних прес-виробів алюмінієвих сплавів. Фактори оптимізації – X_1 – відносна відстань від центру матриці до центра ваги каналів (тобто зміщення загального центру ваги каналу), X_2 – умовний кут форкамери, що характеризує відношення її глибини до відстані від паска до стінки форкамери, X_3 – температура заготовки._____
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Літературний огляд. Розрахунково-дослідницька частина, Індивідуальне завдання, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік джерел посилання.*_____
_____
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Креслення, презентаційний матеріал 10 слайдах (на 10 сторінках)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Літературний огляд	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н., проф.*	
Розрахунково-дослідницька частина	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н., проф.*	
Індивідуальне завдання	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н., проф.*	
Охорона праці та техногенна безпека	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н., проф.*	
Нормоконтроль	*Карпенко Г.В., к.т.н., доц.*	

7. Дата видачі завдання *01.03.2025*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*		
2	*Реферат*		
3	*Літературний огляд*		
4	*Розрахунково-дослідницька частина*		
4	*Індивідуальне завдання*		
5	*Охорона праці та техногенна безпека*		
6	*Висновки*		

Студент _____ *С. В. Доброхвалов*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ *Ю. О. Бєлоконь*
(підпис) (прізвище та ініціали

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 84 с., 9 табл., 47 рис., 24 джерела.

ПРЕСУВАННЯ, ПРЕС-ФОРМА, МАТРИЦЯ, ФОРКАМЕРА, МЕТАЛ, АЛЮМІНІЄВИЙ СПЛАВ.

Об'єкт розробки - процес пресування алюмінієвих сплавів.

Метою цієї роботи є експериментально визначити вплив відстані тонкостінного каналу від центра матриці при різних співвідношеннях розміру форкамери і температури заготівлі на нерівномірність витікання для випадку багатоканального пресування алюмінієвого сплаву.

Метод дослідження - аналітичний розрахунок із застосуванням методів математичної статистики. В якості основного обладнання використовувався гідравлічний прес зусиллям 125 т кафедри МТЕТБ. Швидкість пресування є сталою і дорівнює 0,5 мм/с. Для пресування алюмінієвих сплавів був виготовлений контейнер з внутрішнім діаметром втулки 42 мм і довжиною 120 мм.

У роботі запропонована математична залежність для визначення співвідношення швидкостей витікання металу при багатоканальному пресуванні тонкостінних профілів і експериментально підтверджена можливість її використання.

У розділі металознавчі дослідження вивчені структура і фазовий склад алюмінієвих сплавів: 6060, 6082 та АД31.

У розділі практична цінність розглянуто особливість процесу пресування алюмінієвих сплавів і характер зміни напружено-деформованого стану.

ЗМІСТ

ВСТУП.....7
1 АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА СТАН ПРОБЛЕМИ…… 9
1.1 Загальні відомості процесу пресування алюмінієвих сплавів ……. 9
1.2 Аналіз вимог стандартів до пресованих профілів і причини їхнього невиконання ……12
1.3 Особливості прямого гарячого пресування профілів із алюмінієвих сплавів .15
1.4 Аналіз розвитку сучасної науки і техніки щодо питань моделювання пресування алюмінієвих сплавів ……. 19
2 ДОСЛІДНИЦЬКО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА 25
2.1 Задачі дослідження …….. 25
2.2 Методика дослідження ……25
2.3 Регресійне математичне моделювання 28
2.4 Дослідження спільного впливу геометричних параметрів інструмента на кінематику витікання металу при пресуванні 30
2.5 Математичне моделювання течії металу при об'ємному напружено-деформованому стані 34
3 ОБРОБКА І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ 44
3.1 Результати математичного моделювання 44
3.2 Вплив технологічних факторів процесу на розміри поперечного перерізу тонкостінних прес-виробів 49
3.3 Структура та фазовий склад досліджуваних алюмінієвих сплавів..... 54
3.4 Режими термічної обробки сплавів ……. 63
3.5 Нагрівальний пристрій ……70
3.6 Практична цінність отриманих результатів 74
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 75
4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища ……. 75

4.2 Заходи захисту від небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища …… 77
4.3 Нормування освітлення …….. 78
ВИСНОВКИ..... 81
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ...…… 82

ВСТУП

Протягом останніх десяти років кількість пресових ліній для виготовлення профілів з алюмінієвих сплавів в Україні зросла з 5 до 15 одиниць. Зараз спостерігається зростаючий попит на виробництво пресованих напівфабрикатів, що використовуються у транспортному машинобудуванні (залізничному та автомобільному), хімічній промисловості, холодильному обладнанні, медицині та інших галузях. До таких напівфабрикатів належать комбіновані суцільні та порожнисті теплоізоляційні профілі складного поперечного перерізу, довгомірні тонкостінні труби малого діаметру в бухтах (понад 1 км), товстостінні труби для гвинтового оребріння, а також з магнієвих сплавів – капілярні труби для стентів, порожнисті профілі для біорозчинних кісткових імплантатів, тонкостінні труби для гідроформування та деталі великого перерізу з дрібнозернистою структурою для подальшої обробки тиском і різанням. Виготовлення таких виробів можливе на сучасних горизонтальних гідравлічних пресах із прямим витіканням металу.

Через вимоги зниження маси та вартості пресованих профілів зростає необхідність виробництва деталей із зменшеною товщиною стінок та суворими допусками. Для гарячого прямого пресування без застосування змащення характерна значна нерівномірність деформації металу по об’єму, що може призводити до порушень геометрії профілю через нерівномірний розподіл швидкостей витікання по периметру каналу. Використання калібрувального паска з перемінною довжиною по периметру дозволяє частково компенсувати цю особливість, однак існуючі формули для розрахунку його довжини засновані переважно на геометричних принципах та розроблені для плоских матриць.

Сучасні технології передбачають пресування алюмінієвих сплавів за режимом «заготовка за заготовкою» з високими коефіцієнтами витяжки та застосуванням форкамерних або комбінованих матриць із плоским розсікачем. Відомі методики визначення розмірів форкамери та зварювальної камери враховують лише окремі параметри конструкції інструменту. Поточні підходи до розрахунку пресового обладнання не охоплюють комплексного впливу

технологічних факторів, таких як переднє натягнення, позаконтактна пластична деформація, пружна деформація інструменту, його знос та інші.

Крім того, обмежені дані про реологічні властивості сплавів системи Cu-Mg та недостатнє охоплення температурно-швидкісного діапазону для сплаву АД31 ускладнюють точний розрахунок інструменту та сили пресування, що може призвести до зниження точності профілів і продуктивності процесу.

Сучасні споживачі висувають підвищені вимоги до пластичності, якості та чистоти поверхні виробів, регламентують глибину залягання грубокристалічного ободка, розмір зерна та інші структурні параметри. Існуючі рекомендації часто дають занадто широкий температурно-швидкісний діапазон обробки без урахування взаємозв’язку з іншими технологічними факторами та параметрами інструменту. Це обумовлює потребу у визначенні оптимальних деформаційних і температурно-швидкісних режимів пресування, які забезпечують стабільно високі показники якості спеціальних профілів з алюмінієвих і магнієвих сплавів.

1 АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА СТАН ПРОБЛЕМИ

1.1 Загальні відомості процесу пресування алюмінієвих сплавів

Пресування є одним із методів обробки металів тиском. Суть процесу полягає у видавлюванні металу з замкнутого простору контейнера крізь отвір матриці, форма якого визначає переріз отримуваного профілю (рис. 1.1). Заготівлю 2, що може бути холодною або нагрітою, поміщають у контейнер 1, після чого вона продавлюється пуансоном 4 через отвір матриці 3 і утворює виріб 5. Як вихідний матеріал використовують злитки або прокат круглого, рідше – квадратного перерізу.

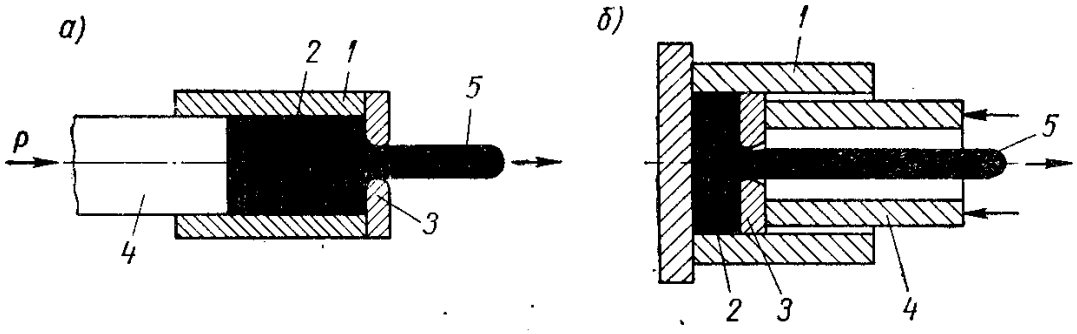


Рисунок 1.1 - Схеми прямого (а) і зворотного (б) методів пресування

Гарячим пресуванням виготовляють широкий асортимент виробів із кольорових металів та їхніх сплавів: прутки діаметром 3-250 мм та труби діаметром 20–400 мм зі стінками 1,5-12 мм. У порівнянні з прокаткою пресовані вироби мають вищу точність, що дає змогу мінімізувати подальшу холодну обробку. Пресування складних профілів часто є економічно вигіднішим, ніж лиття або штампування з наступною механічною обробкою.

За допомогою пресування можна отримувати профілі настільки складної форми, яка є недосяжною для інших методів обробки тиском. Для виготовлення труб діаметром меншим за 50 мм пресування є економнішим за прокатку, а для труб 20-30 мм – фактично незамінне.

Під час пресування метал деформується у схемі всебічного нерівномірного стиску, що значно підвищує його пластичність. Завдяки цьому методом пресування успішно обробляють мідь, мідно-цинкові сплави (латуні, томпаки), мідно-нікелеві сплави (мельхіори, нейзильбери), алюмінієві та олов'янисті бронзи, алюміній і його сплави, магнієві та цинкові сплави. Останніми роками методом пресування ефективно деформують і спеціальні сталі, титанові сплави та інші малопластичні метали, що є однією з ключових переваг цього процесу.

Пресування відрізняється високою технологічною гнучкістю. Замінивши елементи інструменту (матрицю для прутків або матрицю та оправлення для труб), легко перейти до виготовлення іншого профілю. При цьому заміна інструмента значно простіша та швидша, ніж зміна валків у прокатці, що робить цей метод економічно вигідним для виробництва малих серій. Основними методами пресування є пряме та зворотне.

При прямому пресуванні (рис. 1.1, а) напрямок руху металу та пуансона збігаються. Цей метод застосовується для виготовлення прутків і профілів. При зворотному пресуванні (рис. 1.1, б) метал та пуансон із матрицею рухаються назустріч один одному. Оскільки при зворотному пресуванні заготівля залишається нерухомою, тертя зменшується, що знижує необхідне зусилля.

Пресування виробів з алюмінієвих і магнієвих сплавів класифікують за типом продукції, напрямком витікання металу, характером контактної взаємодії та температурними умовами [1]. За типом виробів їх поділяють на профілі, труби та прутки. Вимоги до окремих профілів (куточків, швелерів, зетових профілів тощо) та безшовних труб регламентуються спеціальними стандартами. Більшість сучасної продукції пресових ліній належить до профілів, які, залежно від конструкції, поділяють на суцільні, напівзамкнуті й порожнисті. Для них характерне значне відношення діаметра описаної окружності до товщини стінки – до 40 і більше.

У подальшому будемо розглядати переважно профілі та труби з поздовжнім зварним швом, що пресуються через комбіновані матриці з плоским

розсікачем. Їхні технічні вимоги наведено у відповідних стандартах і детальніше проаналізовано в підрозділі 1.2.

За напрямком витікання металу та умовами контакту розрізняють такі способи пресування: пряме (зокрема «заготівля за заготівлею»), зворотне, з активною дією сил тертя, бічне (у тому числі рівноканальне кутове) та гідропресування. Пряме пресування іноді проводять зі змащенням, однак під час виготовлення профілів з алюмінієвих і магнієвих сплавів воно зазвичай не застосовується для забезпечення високої чистоти поверхні.

За температурними параметрами часто використовують критерій гомологічної температури [3]. До гарячої деформації належать процеси, у яких температура металу перевищує 0,7 від температури плавлення (у Кельвінах).

На українських промислових підприємствах застосовують переважно пряме гаряче пресування прутків, профілів та труб зварного типу. Прутки становлять невелику частку від загального обсягу, а процес їх виготовлення добре досліджений. Тому основну увагу в дисертації буде приділено пресуванню профілів, а також додатково — процесам, що легко реалізуються на наявному обладнанні: пресуванню труб малого діаметра на довгому оправленні та рівноканальному кутовому пресуванню.

В Україні виробництвом алюмінієвих профілів займаються: ЗАТ «Донецький завод алюмінієвих профілів» (м. Донецьк), «Київський завод алюмінієвих будівельних конструкцій» (м. Бровари), ЗАТ «Дніпровський завод “АЛЮМАШ”» (м. Дніпропетровськ), ВАТ «Завод “Ефкон”» (м. Київ), ТОВ «ФРУНЗЕ-ПРОФІЛЬ» (м. Суми), НП «Профільні системи» (м. Київ), ВАТ «Запорізький виробничий алюмінієвий комбінат» (м. Запоріжжя) та інші. Підприємства оснащені горизонтальними гідравлічними пресами зусиллям 3,2–25 МН, усі – прутково-профільного типу з прямим витіканням. Кількість пресових ліній за останні десять років зросла з 5 [4] до 15. До 90% виробленої продукції становлять тонкостінні профілі зі сплаву АД31 для огороджувальних конструкцій (вікон, дверей тощо), переважно для будівництва; також виготовляють труби й профілі підвищеної точності для машинобудування.

1.2 Аналіз вимог стандартів до пресованих профілів і причини їхнього невиконання

До основних нормативних документів, за якими українські підприємства випускають пресовані вироби, належать ГОСТ 8617-81, EN 755-9 (що замінив DIN 1748), EN 755-8, EN 755-2, ДСТУ Б В.2.6-3-95 (ГОСТ 22233-93) та DIN 17615. Перші п’ять регламентують продукцію з різних алюмінієвих сплавів, тоді як останні стосуються профілів зі сплаву АД31 або матеріалів, близьких до нього за хімічним складом, і містять жорсткіші вимоги щодо граничних відхилень розмірів та якості поверхні.

Ще на етапі проєктування профілю встановлюють обмеження на його розміри, пов’язані з можливими складнощами у виготовленні інструмента або ризиком отримання профілю неналежної якості. Наприклад, стандарт DIN 1748 визначає мінімально допустиму товщину стінки та масу профілю, радіуси округлення між елементами поперечного перерізу, а також співвідношення геометричних параметрів порожнин у суцільних, напівзамкнутих і порожнистих профілях. Подібні вимоги містить і ДСТУ Б В.2.6-3-95.

Разом з тим споживачі зазвичай прагнуть зменшити товщину стінки s і масу виробу. Сьогодні звичайною практикою є пресування суцільних профілів з товщиною s = 1,2…1,5 мм при діаметрі описаної окружності $D_{оп}$ = 50…80 мм, тоді як за ДСТУ Б В.2.6-3-95 мінімальна товщина становить 1,7 мм (за DIN 1748 – 1,5 мм). Для порожнистих профілів при аналогічному Dоп стандартом встановлено smin = 2 мм, хоча на практиці виготовляють профілі з товщиною до 1,5 мм і менше. Саме тому стандарт EN 755 не встановлює мінімальної товщини стінки.

Усі стандарти визначають допустимі відхилення поперечних розмірів профілю: лінійних, кутових, радіусів заокруглень, а також поперечної кривизни. Найважливішим параметром, що визначає фактичну масу погонного метра виробу, є товщина стінки. Для профілів підвищеної точності за ДСТУ Б В.2.6-3-95 припустимі відхилення становлять ±10%, але не більше 1,2 мм. У підсумку

маса погонного метра може змінюватися приблизно на 20%. Вимоги DIN 17615 є подібними, а EN 755-9 дозволяє ще ширші допуски. Оскільки вартість заготівлі становить до 70% собівартості пресованого виробу, то зміна точності та ступеня зношування матриці може впливати на ціну погонного метра профілю в межах 10-15%.

Точність геометрії суцільних елементів профілю зазвичай легко забезпечується. Значно складніше витримати розмір «а» у швелерах та інших П- або З-подібних профілях (рис. 1.2), адже саме він визначає можливість сумісного складання з іншими елементами — наприклад, як у системах «рамний профіль — штапик». Неправильно вибрані параметри матриці насамперед спричиняють відхилення саме цього розміру. Так, якщо полиці профілю течуть швидше, ніж стінка, профіль «розкривається» і розмір «а» перевищує допустиме значення. Виправлення розтяганням у цьому випадку можливе, але надмірна деформація може викликати появу «апельсинової кірки» на поверхні та зменшення товщини стінки нижче норми. Якщо ж швидкість металу у полицях менша, профіль «закривається», і такий дефект уже неможливо усунути виправленням.

Згідно з ДСТУ Б В.2.6-3-95 поперечна кривизна полиць шириною b для виробів підвищеної точності має становити не більше 1% b, а для особливо точних – 0,5%. Причиною цього дефекту є сповільнення течії металу в кутах та тупикових зонах. У першому наближенні вважається, що величина кривизни пропорційна різниці швидкостей витікання в центрі та на краях полиці. Найбільше значення цей дефект має для панелей і широких полиць порожнистих профілів.

Стандарти також встановлюють допустимі значення поздовжнього прогину та кутового скручування. Для профілів підвищеної точності прогин не повинен перевищувати 1 мм на 1 м довжини, для особливо точних – 0,5 мм/м; допустимий кут скручування становить відповідно 1,5°/м та 1°/м. Такі дефекти виникають через нерівномірність швидкостей витікання металу по різних елементах перерізу.

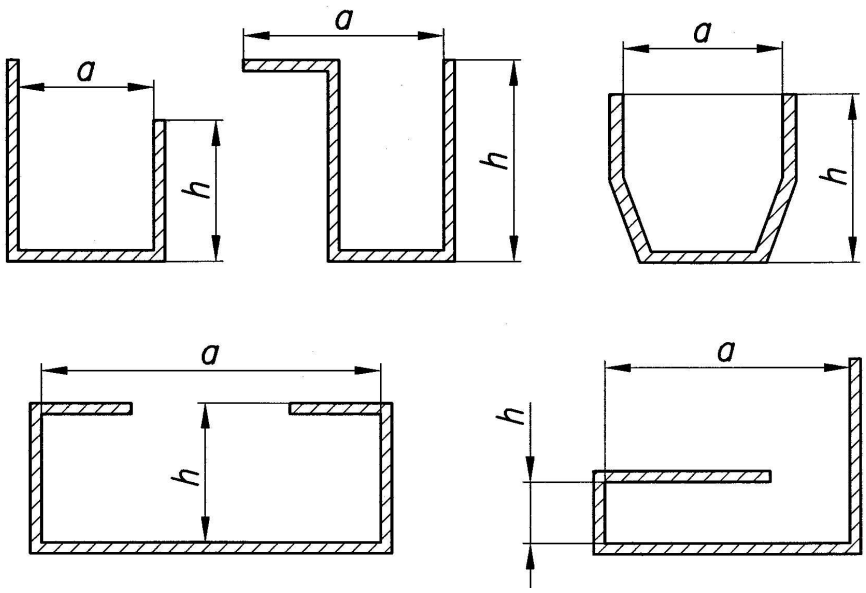


Рисунок 1.2 - Характеристики профілей П- и С-образного типу

Більшість дефектів поверхні (включення, корозійні плями, механічні пошкодження тощо) не пов’язані безпосередньо з процесом пресування. Наявність міхурів обумовлена якістю налаштування обладнання та загальною культурою виробництва. За ГОСТ 8617-81 допускається крупнокристалічний ободок (ККО), якщо його глибина не перевищує 5 мм, хоча така структура може спричинити зниження механічних властивостей. Розмір зерна стандартами зазвичай не регламентується, важливішими є забезпечення необхідної міцності та пластичності. Незважаючи на відносно невисокі стандартні вимоги до відносного подовження δ5 (наприклад, 20% для АД0 за ГОСТ 8617 або 23% для сплаву 1050 за EN 755-2), споживачі часто вимагають значно більших значень, зокрема для труб, що підлягають роздачі, розвальцьовуванню тощо – не менше 30%.

Таким чином, чинні стандарти охоплюють широкий спектр вимог до геометричної точності, поверхневої якості, механічних властивостей та структури металу пресованих виробів. Водночас замовники, як правило, встановлюють додаткові, більш жорсткі вимоги, що відображаються в технічних умовах. Наприклад, для труб Ø8-10 мм з товщиною стінки 1-1,25 мм для холодильного обладнання необхідно забезпечити відхилення зовнішнього діаметра не більше ±0,1 мм і товщини стінки ±0,1 мм, тоді як стандарт EN 755-8

дозволяє відповідно ±0,25 мм і ±0,20 мм. Такі труби повинні витримувати роздачу оправкою з кутом 60° до збільшення діаметра на 40%, а також випробування на герметичність. Допускається не більше двох поздовжніх рисок на 10 мм периметра глибиною до 0,04 мм. Крім того, жорстко регламентується забрудненість внутрішньої поверхні, середній розмір зерна та відсутність крупнокристалічної структури.

Невідповідність вимогам стандартів і технічних умов найчастіше спричиняється неправильним вибором конструктивних параметрів пресового інструмента та технологічних режимів процесу пресування.

1.3 Особливості прямого гарячого пресування профілів із алюмінієвих сплавів

Пресування з прямим витіканням є одним із найдавніших методів обробки металів тиском і має понад столітню історію. Значний внесок у розвиток теорії та технології цього процесу зробили радянські дослідники – М.С. Гильденгорн, С.І. Губкін, М.З. Ерманок, В.В. Жолобов, Г.І. Звєрєв, І.Л. Перлин, Л.В. Прозоров, Л.Х. Райтбарг, В.Н. Щерба, а також зарубіжні вчені, серед яких R. Akeret, A. Ames, M. Bauser, K. Müller, P.K. Saha, H. Valberg та інші.

Процес гарячого пресування алюмінієвих сплавів має дві ключові особливості, які по-різному впливають на характер течії металу [5].

1. Висока адгезія металу до інструмента зумовлює значні контактні напруження тертя, що наближаються до зсувної межі текучості. Через це спостерігається помітна різниця між величинами зсувних деформацій у периферійних та центральних зонах заготовки, що збільшує нерівномірність деформування порівняно з матеріалами, які мають нижчу адгезію до інструмента.

2. Порівняно низькі температури деформації алюмінієвих сплавів дають змогу мінімізувати перепад температур між заготовкою та інструментом. У поєднанні з високою теплоємністю та теплопровідністю алюмінієвих сплавів

це сприяє вирівнюванню температурного поля по перетину та довжині заготовки, що, у свою чергу, зменшує нерівномірність деформації порівняно з матеріалами, для яких різниця температур нагрівання є суттєвішою (мідь, титанові сплави, сталі).

Пресування з прямим витіканням має низку кінематичних і деформаційних особливостей, які відрізняють його від інших різновидів процесу [6].

1. Контактне тертя між заготовкою та контейнером уповільнює рух периферійних шарів металу. У результаті ці шари осаджуються, скорочуються у поздовжньому напрямку та зміщуються до осі заготовки. Найбільше розширення спостерігається у тій частині, що прилягає до прес-шайби, де діють максимальні осьові напруження. Це спричиняє формування загальмованої ("мертвої") зони металу в місці переходу контейнера до матриці (рис. 1.3).

2. Стаціонарна стадія процесу фактично відсутня. Деформація у центральних та периферійних зонах постійно збільшується, що призводить до неоднорідності механічних властивостей по перетину та довжині готового профілю.

3. Високі сили тертя у зоні контакту заготовки з контейнером та у ділянці "мертвої" зони ускладнюють рух тонких периферійних шарів у канал матриці, забезпечуючи при цьому високу якість поверхні прес-виробів. Це особливо важливо під час виготовлення профілів, які після пресування не підлягають механічній обробці.

За даними роботи [7], форма поверхонь мертвих (пружних) зон не залежить від конфігурації матриці – вони завжди мають випуклість, спрямовану до зони стику контейнера та матриці. Ці поверхні обмежують так звану частину, що обжимає, пластичної зони (ОЧПЗ). У різних авторів існують розбіжності щодо кута нахилу границі між мертвою зоною та ОЧПЗ: від 45° [9] до 60° [8], а за даними С.Н. Тарантова [10] він може змінюватися в межах 35…80° залежно від коефіцієнта витяжки. Збільшення питомих сил тертя призводить до розширення мертвої зони [11], причому її розміри змінюються впродовж процесу пресування (рис. 1.3).

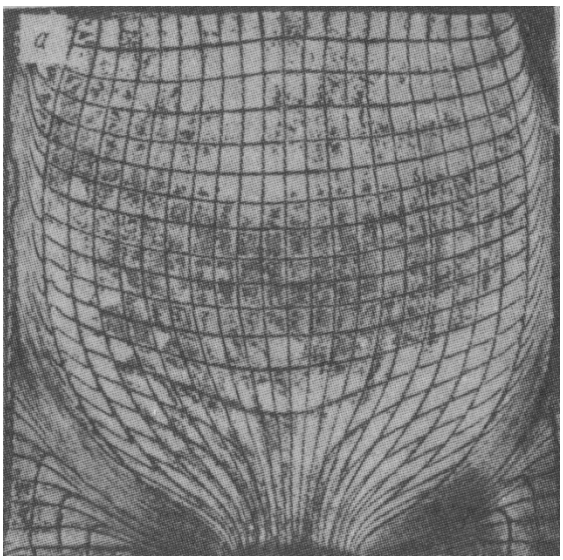


Рисунок 1.3 – Характер течії металу в контейнере при прямому пресуванні алюмінієвого сплаву

У роботі [7], на основі аналізу макроструктури прес-залишків, показано, що принципових відмінностей у течії металу при пресуванні через комбіновані матриці порівняно з пресуванням суцільних профілів немає. Єдине виключення — розділення потоку та його подальше зварювання. Німецькі дослідники [9] підтверджують, що до входу металу у зварювальну камеру течія аналогічна пресуванню круглих прутків через багатоканальну матрицю (рис. 1.4).

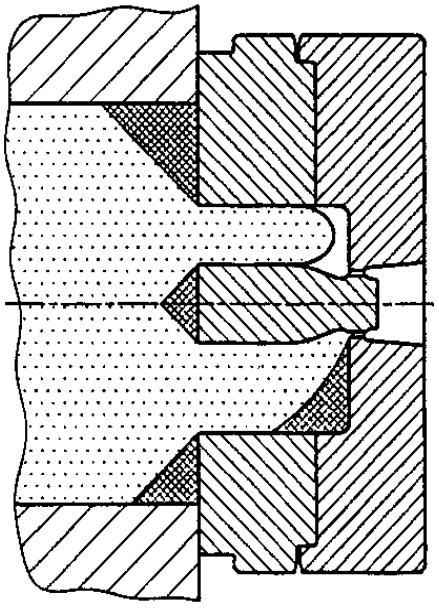


Рисунок 1.4 - Утворення мертвих зон на плоском расзсікачі комбінованої матриці

Проте експериментальні дослідження Ф.В. Журавльова та Л.С. Скоблова свідчать, що виступаючий рассекатель суттєво змінює характер плину металу. Інтенсивне радіальне переміщення спричиняє проникнення периферійних шарів у внутрішні та їх затікання в зварювальну зону й далі – у готовий профіль. Через це для забезпечення якісного зварювання та гарного стану поверхні необхідне ретельне очищення заготовки, а саме пресування слід вести з більшим прес-залишком. З огляду на ці недоліки такі конструкції матриць практично вийшли з ужитку. Далі розглядаються комбіновані матриці з плоским рассекателем, які забезпечують стабільний режим «заготовка-за-заготовкою».

Під час пресування складних суцільних профілів із круглих заготовок виникають додаткові напруги та деформації, що спричиняють перекручення форми профілю, а інколи й утворення тріщин. Це пояснюється такими чинниками [7]:

1. Порушенням геометричної подоби поперечних перерізів заготовки та кінцевого виробу.

2. Збільшенням нерівномірності температури та напружень у пластичній зоні через зміну її форми та розмірів.

3. Відсутністю симетрії поперечного перерізу.

Нерівномірність деформації спричиняє різницю швидкостей течії металу в окремих ділянках профілю, що може призводити до жолоблення або розривів (рис. 1.5).

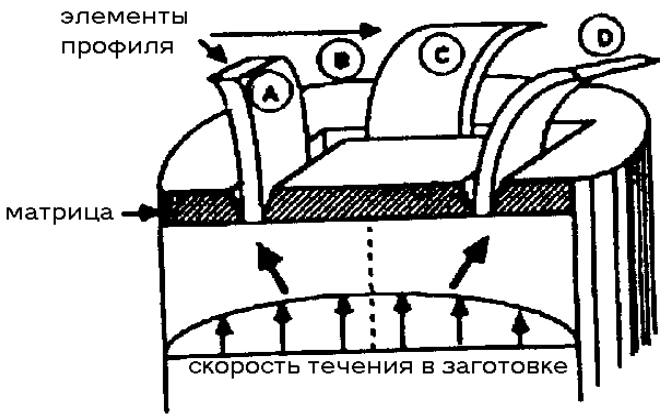


Рисунок 1.5 - Вплив нерівномірності деформації на «поділянкову» теченію металу П-образного профилю

Для мінімізації цих негативних явищ необхідно максимально зменшити осьову асиметрію та вирівняти швидкість витікання металу через елементи матриці. Першу умову забезпечують шляхом наближення форми заготовки до форми профілю (наприклад, панелі пресують у прямокутних контейнерах). Другу – завдяки оптимізації конструкції матриці ще на етапі її проєктування.

Похибки, які все ж виникають під час проєктування, можуть бути частково усунуті під час правки профілів. Однак вирівнювання форми може призвести до порушення допусків на товщину стінок, кути елементів або збільшення шорсткості поверхні. Навіть якщо геометрія знаходиться в межах норм, нерівномірність деформації може стати причиною різної структури металу та, відповідно, різних механічних властивостей і корозійної стійкості.

Сучасні пресові лінії обладнані системами охолодження та загартування профілів, які дозволяють регулювати розподіл температури та зменшувати залишкові напруги, що спричиняють жолоблення. Наприклад, система BICS забезпечує кероване охолодження залежно від товщини та форми елементів профілю.

Отже, властива прямому пресуванню нерівномірність деформації призводить як до геометричних відхилень профілю, так і до невідповідності вимогам щодо структури та механічних властивостей металу. Забезпечення необхідної геометрії досягається на стадії проєктування та доведення матриці, а відповідність характеристикам матеріалу – регулюванням технологічних параметрів процесу. Нижче розглянуто принципи проєктування інструмента та вплив технологічних параметрів пресування на якість прес-виробів.

1.4 Аналіз розвитку сучасної науки і техніки щодо питань моделювання пресування алюмінієвих сплавів

Комп’ютерні програми, що застосовуються для моделювання процесів пресування, умовно поділяють на двовимірні (осесиметричні та плоскі) та тривимірні. Вони можуть бути як вузькоспеціалізованими, призначеними лише

для розрахунку параметрів процесу, так і універсальними. Більшість сучасних теоретичних досліджень, представлених у літературі, виконано саме з використанням універсальних програмних комплексів. Розглянемо деякі з них.

У роботі [5] автори за допомогою FORGE2 дослідили механізми тертя під час пресування прутка зі сплаву АА2024. Було встановлено, що:

1. умова повного прилипання металу до контейнера (коефіцієнт тертя = 1) є адекватною;
2. необхідно враховувати коригувальний температурний фактор на контактних поверхнях;
3. перекручування металу на контакті з контейнером зосереджуються в дуже вузькій зоні (100…300 мкм).

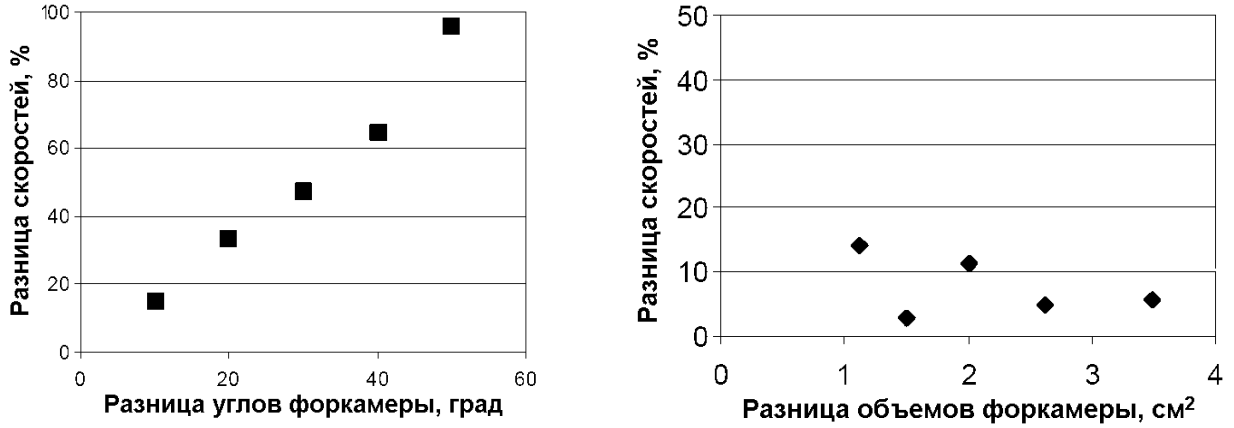
Подальше моделювання розподілу деформацій у перетині контейнера за допомогою FORGE2 дозволило авторам роботи [6] дійти висновку, що пружно-пластична та в'язко-пластична моделі середовища забезпечують майже однакову точність при розрахунку сили пресування. Водночас друга модель значно пришвидшує обчислення. У цій же роботі FORGE2 використано й для аналізу розвитку поверхневих складок за різних температур і швидкостей пресування.

Серед недоліків FORGE2 варто відзначити неможливість фізично коректного накладання трикутних елементів на гострі зовнішні кути інструмента (наприклад, крайку паска). Крім того, двовимірні постановки задачі не дають змоги моделювати просторові особливості формозміни.

У роботі [7] FORGE2 застосовано для розрахунку нормальних і дотичних напружень у комбінованій матриці з подальшим використанням цих даних при оцінці її міцності. Досліджувалися перетини містка (плоска задача) та живильного каналу-розсікача ("вікна", плоска й осесиметрична постановки). Для профілю прямокутної труби 72,5×20×1,4 мм з коефіцієнтом витяжки 73 було показано, що максимальні нормальні стискальні напруження виникають на торці розсікача (430 МПа), на вихідній поверхні містка – 346 МПа, на дні матриці – 370 МПа; максимальні дотичні напруження на робочому паску становили 38

МПа. Розподіл напружень і деформацій у металі, що пресується, у [8] не наведено.

За допомогою DEFORM 3D у роботі [9] розглянуто важливе питання впливу форми двох однакових каналів з різними форкамерами на співвідношення швидкостей витікання металу. Показано залежність цього співвідношення від умовних кутів форкамер (рис. 1.6а). Водночас у роботі [10] автори змінювали кут форкамери разом із її глибиною та шириною, що ускладнює інтерпретацію результатів. До недоліків їхнього дослідження належать також невідповідне розташування форкамер одна відносно одної та малий коефіцієнт витяжки (μ = 5), нетиповий для пресування алюмінієвих профілів. Зроблений ними висновок про переважний вплив об'єму форкамери, а не її умовного кута, є дискусійним: різниця швидкостей витікання при зміні співвідношення об'ємів від 1 до 3,5 становила 3-15%, що співпадає з коливаннями, наведеними на рис. 1.6б.



А *б*

Рисунок 1.6 - Зміна співвідношення швидкостей витікання при варіюванні умовного кута форкамери (*а*) і її обсягу (*б*)

Практичний інтерес становить також оцінка впливу кількості щаблів у східчастій матриці, хоча всі щаблі мали однаковий і досить малий умовний кут (~45°). У роботі [11] DEFORM 3D використано для оцінки зварюваності при пресуванні двутаврового профілю. Проте в роботі [12] для уникнення збоїв програми автори були змушені вводити віртуальну проміжну площину

товщиною 0,1 мм на межі потоків, тому якісну оцінку здійснювали лише за ступенем заповнення зварювальної камери та характером формозміни металу на виході з каналу.

DEFORM 3D також застосовано в роботі [13] для оптимізації конструкції матриці для профілю у вигляді незамкнутого циліндра, хоча вказані авторами вихідні дані відсутні.

Окрім того, останнім часом з'являються нові програмні продукти для розрахунку напружено-деформованого стану та оптимізації параметрів процесу пресування [14-15]. Наприклад, у [16] із використанням HyperExtrude оптимізують довжину робочого паска по периметру профілю, хоча досліджується матриця без форкамерами. У [17] наведено поєднання методу скінченних елементів із методом верхньої оцінки, що пришвидшує розрахунки, хоча й дещо знижує їхню точність.

Чисельні результати, узагальнені у вигляді формул, значною мірою залежать від прийнятих теоретичних припущень. Так, у низці моделей використовується пружно-в'язкопластичний підхід, у якому повна деформація складається з пружної та пластичної складових. Для врахування умови нестисливості при розв'язанні в'язкопластичної задачі використовують метод штрафних функцій. Це знижує точність через малий внесок пружної деформації та значні похибки методу штрафів при великих пластичних деформаціях, що продемонстровано в [18]. У роботі [19] математичну модель описано неповно, що не дає змоги її коректно проаналізувати.

Дослідження [20-21] також становлять інтерес, проте вони присвячені окремим складним профілям, тому їхні результати важко узагальнювати для інших типів прес-виробів.

Серед інших робіт варто назвати праці Гуна Г.Я. та А.Ф. Аверченка [22] щодо двовимірного моделювання, а також А.А. Миленина [23], який виконав об'ємне моделювання пластичного плину з подальшим узагальненням результатів для оптимізації форкамерних матриць.

Основою робіт Гуна та Аверченка є припущення, що швидкість витікання металу в напрямку пресування на виході з каналу можна визначити у точці перетину профілю за формулою:

$$v_{\Sigma} = K_1 v_{1i} + (B/D_k) K_2 v_{2i} + K_3 v_{3i}, \qquad (1.1)$$

де v_{1i}, v_{2i}, v_{3i} – розв'язки рівняння Пуассона на перетинах контейнера, форкамери та профілю;

K_i – поправочні коефіцієнти.

Швидкості визначаються за принципом гідродинамічної аналогії – як течія в'язкої рідини в системі циліндрів. Такий підхід є досить грубим: модель не враховує вплив довжини робочих пасків і напружень тертя. Щоб частково компенсувати ці недоліки, у формулу вводять поправочні коефіцієнти K_i, отримані методом найменших квадратів за експериментальними даними для кількох варіантів розташування каналу матриці. Проте навіть з поправками модель не дозволяє оцінити вплив більшості конструктивних параметрів інструмента, а отже – не забезпечує повноцінної оптимізації. Водночас саме ці роботи стали одними з перших спроб застосувати математичне моделювання для аналізу пластичного плину через плоскі форкамерні матриці.

На відміну від них, робота [24] ґрунтується на більш сучасних теоретичних передумовах. Використані математичні моделі докладно описано в [25]. У роботі [26] досліджувався процес пластичної деформації при пресуванні суцільного товстостінного профілю через плоску форкамерну матрицю. Параметрами оптимізації обрано глибину та площу поперечного перерізу форкамери, а також відстань від осі контейнера до центра ваги каналу. Вплив довжини калібрувального паска, розмірів контейнера та зміщення середніх ліній каналу і форкамери не враховувався. Моделювання виконувалося для технічного алюмінію та сплаву AlCuMg, які рідко застосовуються у виробництві профілів через відповідно низьку міцність і корозійну нестійкість. Критерієм оптимізації була відсутність вигину прес-виробу на виході; для цієї умови визначено

емпіричні коефіцієнти та оптимальні параметри, проте їх не можна безпосередньо переносити на інші профілі й матеріали.

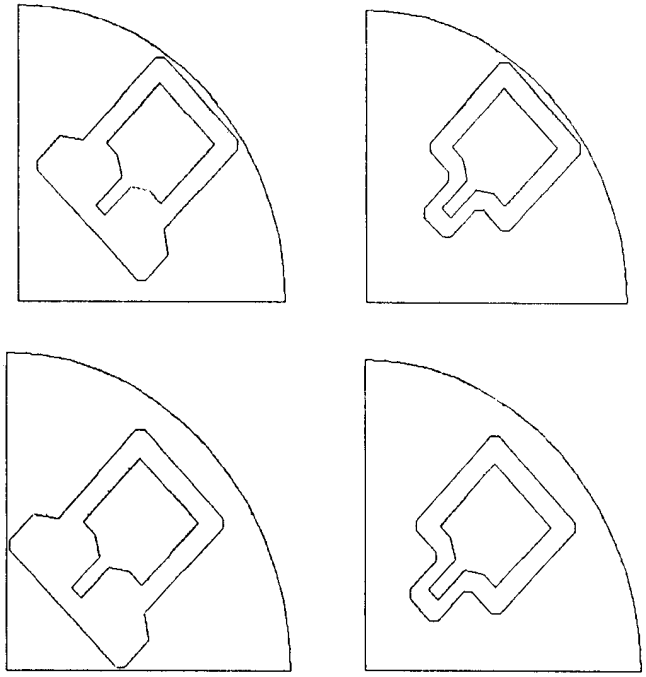


Рисунок 1.7 - Варіанти положення каналу на дзеркалі матриці й форми поперечного перерізу форкамери

Подальшим розвитком підходів, започаткованих цими роботами (зокрема, Миленіним), є система QForm компанії QuantorForm. Закладені у неї принципи подібні до тих, що реалізовано в Extrusion 3D. Проте об’ємні моделі рідко застосовуються для серійних статистичних розрахунків – такі задачі доцільніше вирішувати у двовимірній постановці, оскільки повноцінна тривимірна модель фактично описує лише окремий випадок і має значно більшу обчислювальну складність. Тривимірні моделі виправдані насамперед при аналізі кінематики плину в контейнері та матриці, а також для дослідження взаємодії потоків у різних каналах складних матричних систем.

2 ДОСЛІДНИЦЬКО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Завдання дослідження

1. Дослідження утворення нерівномірного витоку металу при багатоканальному пресуванні через форкамерні матриці.

2. Експериментальне визначення впливу відстані тонкостінного каналу від центра матриці при різних співвідношеннях розміру форкамери.

3. Експериментальне визначення температури заготівлі на нерівномірність витікання для випадку багатоканального пресування алюмінієвого сплаву АД31.

4. Побудувати математичну модель для визначення співвідношення швидкостей витікання металу при багатоканальному пресуванні тонкостінних профілів.

2.2 Методика дослідження

У кваліфікаційній роботі методика експериментального дослідження поділяється на три взаємопов’язані етапи: підготовку експерименту, методику його проведення та методику опрацювання отриманих даних. Необхідність науково обґрунтованої організації експериментальних досліджень процесів пресування зумовлюється зростаючими вимогами до глибини аналізу досліджуваних явищ та якості отримуваної інформації. Обґрунтувати вибір випробувальних параметрів, їх послідовності, переліку вимірюваних величин, вимог до точності та частоти реєстрації можна лише маючи кількісні залежності, що описують зв’язок між необхідними техніко-економічними характеристиками об’єкта та його параметрами. Тому основоположним принципом організації сучасних комплексних експериментів є системний підхід, який розглядає всі елементи дослідження як єдину систему з математичною моделлю та визначеним алгоритмом функціонування.

Після опрацювання матеріалів, пов’язаних із метою та предметом дослідження, мною було сформульовано основне завдання — розроблено робочу гіпотезу. Вона містить наукове припущення щодо перебігу досліджуваного явища, можливих причинно-наслідкових зв’язків, напрямів і характеру його розвитку. Якщо очікуваний хід процесу або вплив чинників піддається математичному опису, його можна подати у вигляді фізико-механічних закономірностей, що формують модель явища.

У практиці застосовують різні типи моделей: фізичні (геометрично подібні або масштабно змінені аналоги), символічні (опис властивостей через рівняння, графіки, таблиці), а також математичні або аналогові моделі, коли явище імітується на установці, що відтворює інше фізичне середовище, але описується тими самими рівняннями. Під час фізичного чи математичного моделювання доцільним є використання теорії подібності та принципу розмірностей, що дають змогу визначити кількість незалежних змінних і параметрів, а також узагальнити експериментальні результати.

Після формулювання робочої гіпотези я перейшов до планування науково обґрунтованого й економічно доцільного експерименту: обрав метод дослідження, необхідне обладнання, пристрої та вимірювальну апаратуру; визначив та проаналізував похибки вимірювань і методичні похибки; оцінив загальну невизначеність експерименту; обрав способи обробки даних; встановив інтервали та кількість відліків; розробив план експерименту та послідовність дослідів, а також визначив їхню кількість, витрати часу та ресурсів [27].

Вибір методу дослідження визначався передусім необхідним обсягом та якістю інформації. Орієнтація на усталені підходи або особисті вподобання могла б призвести до отримання надлишкових або недостатніх даних, ускладнити експеримент, підвищити його вартість або навіть спричинити недостовірні результати. Мета експерименту значною мірою визначає фізичний зміст результатів вимірювань, а отже – і вибір методу. Наприклад, під час аналізу зміни геометричних параметрів процесу (витяжка, розширення при куванні чи прокатуванні) первинні дані доцільно реєструвати у вигляді переміщень,

використовуючи геометричні методи. Дослідження глибини проникнення деформацій чи нерівномірності їх розподілу потребує реєстрації деформацій, наприклад методом поляризаційно-оптичного аналізу.

Під час вибору методу враховувалась можливість подальшої обробки первинних даних. У зв’язку з розвитком обчислювальної техніки та прикладної математики широкого поширення набули аналітичні методи, що відкривають можливості для автоматизації експериментів. Разом з тим графічні та графоаналітичні методи залишаються актуальними завдяки своїй точності та простоті, а їх подальшому розвитку сприяє застосування автоматизованих систем керування експериментом.

Вибір методики дослідження визначає і склад необхідного обладнання. При цьому я не прагнув до максимальної можливої точності, адже навіть високоточне обладнання не гарантує наукової новизни результатів. Точність вимірювальних засобів має відповідати необхідному рівню достовірності, адже її підвищення вимагає додаткових витрат або збільшення кількості повторних дослідів. Ефективність експерименту також забезпечувалася раціональним поєднанням натурних випробувань із лабораторними, виконаними на фізичних, електричних та інших моделях.

Завершальний етап експериментального дослідження полягає в обробці та узагальненні отриманих результатів. Для цього використовуються всі наявні матеріали: вимірювання, описи розвитку процесу, зафіксовані закономірності, відхилення та їх можливі причини, додаткові спостереження, фотографії, таблиці, графіки тощо. Спершу визначаються функціональні залежності між експериментальними даними, зазвичай поданими у вигляді таблиць або графіків. Після їх опрацювання встановлюються закономірності розвитку процесу, взаємодія параметрів і супутніх явищ. Установивши зв’язки між окремими параметрами, переходять до аналізу процесу в цілому, його теоретичного узагальнення та формулювання емпіричних залежностей [28].

2.3 Регресійне математичне моделювання

Складання плану експерименту

При складанні плану повного факторного експерименту треба стежити, щоб не було повторів.

Таблиця 2.1 - Матриця повного факторного експерименту 2^3

План	Номер досліду	x_0	x_1	x_2	x_3
2^2	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	-1
	3	1	1	-1	1
	4	1	1	-1	-1
2^3	5	1	-1	1	1
	6	1	-1	1	-1
	7	1	-1	-1	1
	8	1	-1	-1	-1

Фактор, що по значений «x_0» - так називаємо фіктивну зміну – уводимо для розрахунку вільного члена шуканої моделі – коефіцієнта – «b_0». Після складання таблиці перевіряємо правильність її заповнення. Умова симетричності репліки вимагає, щоб у кожному стовпці знаходилося рівне число мінусів та плюсів. Умова виконується.

Реалізація плану експерименту. Для визначення помилки експерименту досліди слід дублювати. Частіше дублюють не всі досліди, а тільки досліди на основному рівні. В цьому випадку розрахунок дисперсії досліду S_y проводимо по формулі:

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(Y_{0i} - Y_0)^2}{f_1},$$

де n – кількість дублів на основному рівні;

i – номер дубля

Y_{0i} – значення параметра оптимізації в i-ом дублі;

Y_0 – середнє арифметичне результатів всіх дублів;

f_1 – число мір свободи (f_1 = n-1)

Для визначення дисперсії досліду було організовано досліди 9 -11 на основному рівні.

Побудова математичної моделі. Після реалізації всіх дослідів матриці планування по їх результатах будують математичну модель процесу, що вивчається. Для цього при використанні повного факторного експерименту розраховуємо коефіцієнти регресії рівняння по формулі:

$$b_j = \sum_{j=1}^{n} \frac{x_{jn} \cdot Y_n}{N},$$

де b_j – значення j-го коефіцієнта регресії;

xjn – значения j-го чинника в n-ом досліді в кодованому вигляді;

Yn – значення параметра оптимізації в n-ом досліді;

N – число дослідів в матриці планування.

В результаті одержують модель, яка має наступний вигляд:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$$

Статистичний аналіз моделі. Метою аналізу є перевірка придатності моделі для її використання при описі досліджування пористості інтерметалідів.

Аналіз складається з двох етапів. На першому етапі перевіряємо статистичну значущість коефіцієнтів регресії. У статистиці прийнято здійснювати перевірку значущості коефіцієнтів регресії за допомогою критерію Стьюдента. Для цього розрахуємо довірічний інтервал коефіцієнтів:

$$\Delta b_i = t_{\alpha,f_1} \cdot S_{bi}$$

де S_{bi} – середньоквадратична помилка у визначенні коефіцієнтів регресії;

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_y^2}{N}};$$

$t_{\alpha,f1}$ – значення критерію Стьюдента, яке вибирається залежно від рівня значущості α і числа мір свободи при визначенні дисперсії досліду f_1.

Значення коефіцієнтів регресії порівнюємо з довірчим інтервалом, і ті що виявляються по абсолютній величині менше довірчого інтервалу, виключаємо з рівняння.

2.4 Дослідження спільного впливу геометричних параметрів інструмента на кінематику витікання металу при пресуванні

Дослідження виконано із застосуванням скінченно-елементної математичної моделі та створеної на її основі програми для розрахунку параметрів напружено-деформованого стану під час пресування, розробленої на кафедрі металургійних технологій, екології та техногенної безпеки. Математична модель ґрунтується на таких припущеннях: деформований стан матеріалу при видавлюванні з контейнера, зокрема круглого, вважається плоским; процес прямого пресування розглядається як умовно сталий (квазістаціонарний) та ізотермічний; матеріал, що зазнає деформації, характеризується нелінійно-в'язкою поведінкою й нестисливістю, а його напруження текучості залежить від ступеня та швидкості деформації і температури. Для дискретизації площини поперечного перерізу металу в контейнері, форкамері, зоні калібруючого паска та на вільному кінці профілю застосовано прямокутний мультиплекс-елемент.

Пошук полів істинних швидкостей і напружень здійснюється на основі умови стаціонарності функціонала варіаційного принципу Маркова, який для випадку плоскої деформації має такий вигляд:

$$J = \frac{1}{2}\int_F \mu' \mathrm{H}^2 dF + \int_F \sigma_0 \dot{\varepsilon}_0 dF - \int_l \sigma_\tau V_\tau dl\,, \qquad (2.1)$$

де μ' – умовна в'язкість металу;

H – інтенсивність швидкості деформації зсуву;

F – площа поперечного перерізу тіла, що деформується;

$\dot{\varepsilon}_0$ – швидкість відносної зміни площі поперечного перерізу;

σ_0 – середнє гідростатичне напруження;

σ_τ – напруження тертя;

V_τ – швидкість ковзання металу по інструменту;

l – довжина поверхні контакту металу з інструментом.

Умовна в'язкість металу визначається за формулою:

$$\mu' = \mathrm{T}_s\left(\mathrm{H}, \Lambda, T\right)/\mathrm{H}\,, \qquad (2.2)$$

де T_s – інтенсивність напружень зсуву;

Λ – сумарна деформація зсуву;

T – температура.

В рамках моделі застосовується теорія пластичності Сен-Венана-Леві-Мізеса. Зв'язок між компонентами тензора швидкостей деформацій і тензора напружень у вигляді:

$$\sigma_{ij} = 2\mathrm{T}_\mathrm{s}\,\dot{\varepsilon}_{ij}/\mathrm{H} + \delta_{ij}\sigma_0 = 2\mu'\dot{\varepsilon}_{ij} + \delta_{\mathrm{ij}}\sigma_0\,. \qquad (2.3)$$

Для врахування нелінійності реологічних властивостей матеріалу

використаний метод гідродинамічних наближень. На кожному кроці ітераційного процесу вирішується лінеарізована крайова задача, що відповідає течії лінійно-в'язкої рідини. Використана модель тертя, отримана з експериментальних досліджень О.М. Лєванова:

$$\tau = K_{\text{П}}\left[1 - \exp\left(\frac{1{,}25 \cdot \sigma_n}{\sigma_{\text{T}}}\right)\right] \cdot \tau_{\text{T}}, \qquad (2.4)$$

де $K_{\text{П}}$ – константа поверхні, фізична характеристика поверхні контакту;

σ_n – нормальне контактне напруження;

σ_{T} – напруження текучості;

τ_{T} – напруження текучості металу на зсув.

Реологічні властивості матеріалів, використаних у моделюванні, були задані у двох формах: або у вигляді поліноміальної залежності, отриманої шляхом апроксимації власних експериментальних даних, або через застосування методу термомеханічних коефіцієнтів.

Використана розрахункова модель процесу пресування, адаптована зокрема для випадків застосування ступінчастих форкамерних матриць, дає змогу визначати по елементах скінчено-елементної сітки поля швидкостей деформацій, величини деформацій та компоненти тензора напружень.

У межах аналізу зони деформації при використанні форкамерних матриць були виокремлені такі характерні геометричні параметри: діаметр контейнера *D* (або приведений поперечний розмір для двовимірної постановки), відстань між осями контейнера і профілю *E*, глибина *H* та ширина *B* форкамери (рис. 2.1), зміщення осі форкамери відносно осі каналу *e*, а також товщина профілю (ширина каналу) *s*.

Крім того, для більш повного опису геометрії форкамери можуть використовуватися такі величини, як: відстань від калібрувального паска до стінки форкамери (*a* або *c* – залежно від напрямку відносно осі контейнера),

середня відстань між стінками паска та форкамери b, а також умовний кут розкриття форкамери.

$$e = (c - a)/2. \tag{2.5}$$

$$b = (c + a)/2. \tag{2.6}$$

$$\text{tg}\,\beta = H/b. \tag{2.7}$$

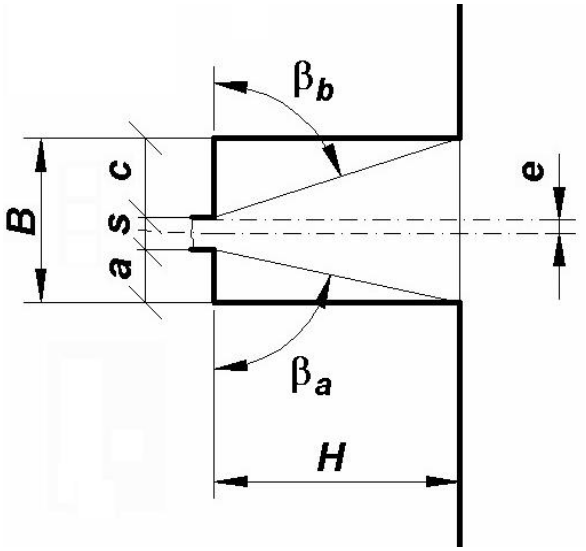


Рисунок 2.1 - Характерні геометричні розміри форкамери

Функцією відгуку є кривизна штаби ζ або радіус вигину *r*. Інший важливий параметр – нерівномірність розподілу осьового компонента швидкості витікання Ω (рис. 2.2).

$$\Omega = \frac{\sum_{1}^{n} \Delta V_{x,i} \Delta y_i}{\overline{V}_x} = \frac{n \sum_{1}^{n} \Delta V_{x,i} \Delta y_i}{\sum_{1}^{n} V_{x,i} \Delta y_i}. \tag{2.8}$$

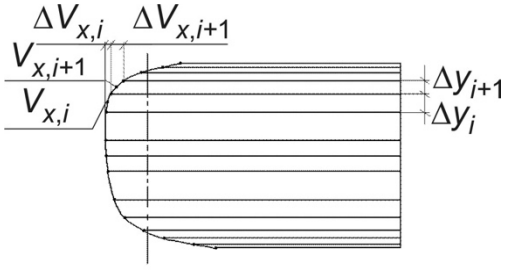


Рисунок 2.2 - Нерівномірність швидкостей по перерізу штаби

Був проведений чисельний факторний експеримент і за його результатами отримана залежність кривизни штаби від розглянутих безрозмірних параметрів:

$$\zeta = \lambda_0 + \lambda_1\left(\frac{D_i}{s_i}\right) + \lambda_2\left(\frac{2E_i}{D_i}\right) + \lambda_3\left(\frac{e_i}{b_i}\right) + \lambda_4\beta_i + \lambda_4\left(\frac{D_i}{s_i}\right)^2 + \lambda_{44}\beta_i{}^2. \quad (2.9)$$

Для сплавів АД31, АА6082 і АА6060 отримані коефіцієнти λ.

Показано, що нерівномірність швидкостей Ω зростає зі збільшенням відношення *D*/*s* і зворотно куту β (рис. 2.3). Останнє показує, що хоча метал і більше загальмовується при проходженні форкамери більшої глибини, це приводить до зменшення нерівномірності швидкостей по перерізу.

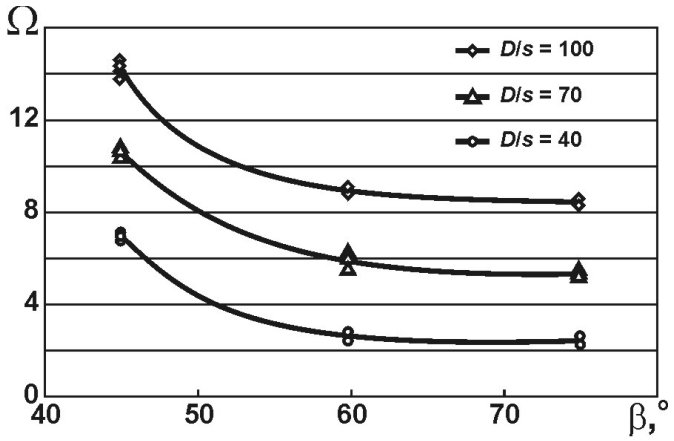


Рисунок 2.3 - Залежність Ω від кута β

Встановлено, що у випадку застосування внутрішньої ступіні двохступінчастої форкамери з умовним кутом менше, ніж загальний її кут, внутрішня ступінь незначно впливає на кінематику витікання.

2.5 Математичне моделювання течії металу при об'ємному напружено-деформованому стані

Дослідження особливостей об'ємної течії металу при пресуванні через форкамерні матриці проведено з використанням пакета скінчено-елементних програм, створеного на кафедрі МТЕТБ. У цьому випадку задача пресування

розглядається як стаціонарна у формулюванні Ейлера. Для одержання рішення використаний модифікований функціонал варіаційного принципу Маркова:

$$J = \tfrac{1}{2}\int_{\Phi} \mu' \mathrm{H}^2 d\Phi + \int_{\Phi} \sigma_0 \dot{\varepsilon}_0 d\Phi - K_p \int_F \left(V_\tau\right)^2 dF\,, \qquad (2.10)$$

де F – площа поверхні контакту металу з інструментом;

K_p – штрафний множник;

Ф – об’єм тіла, що деформується.

Нелінійні реологічні властивості металу враховано за допомогою методу гідродинамічних наближень. Для дискретизації об’єму деформованого металу та апроксимації поля швидкостей застосовано п’ятнадцятивузлові трикутні призматичні елементи. Середнє напруження апроксимувалося за допомогою трикутних призм із шістьма вузлами, які збігаються з кутовими вузлами елементів першого типу. Під час задання граничних умов використано також модель тертя, встановлену за експериментальними дослідженнями О.М. Лєванова. Реологічні властивості металу описуються аналогічно до підходу, застосованого у двовимірній моделі.

Моделювання процесу пресування рівнополкового кутового профілю за різних значень кута між полицями (135°, 90° і 45°) та умовного кута форкамери (75°, 60° і 45°), а також при зміні відстані між центром ваги профілю і центром матриці, дало змогу визначити характерні закономірності розподілу швидкості витікання матеріалу вздовж осі контейнера й уздовж полиць профілю. Це дозволило пов’язати кут нахилу епюри швидкостей із полярними координатами тупика та вершини полиць профілю.

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{\Delta W_Z / 2W_{Z.\mathrm{ср}}}{l/D_\mathrm{к}}; \quad \mathrm{tg}\varphi = \left[k_1 \left(\frac{\rho_\mathrm{т}^2 - \rho_\mathrm{в}^2}{R_\mathrm{к}^2} \right) + k_2 \right], \qquad (2.11)$$

де ΔW_Z – різниця осьових швидкостей витікання у вершині та тупику полиці, $W_{Z.cp}$ – середня швидкість витікання з елемента;

l – довжина полки;

$D_к$ і $R_к$ – діаметр і радіус контейнера;

k_1 і k_2 – коефіцієнти (для сплаву АА6082 k_1=5,9; k_2=0,8).

Встановлено розподіл швидкостей при пресуванні профілю з різним кутом (γ = 45, 90, 135°) між полками різної товщини через матрицю з постійною довжиною паска. На підставі форми епюр можна зробити висновок про можливість застосування формули Матвєєва-Журавського для розрахунку довжини паска, однак вона повинна бути скоректована з урахуванням того, що форкамера з кутом β>45° змінює перерозподіл потоків металу між елементами. Це може бути враховано коефіцієнтом:

$$k_\gamma = 1{,}07 - 0{,}19\frac{\gamma - 90^\circ}{45^\circ}.$$

Досліджено розподіл швидкостей витікання уздовж каналу при його радіальному й тангенціальному розташуванні щодо осі контейнера. На підставі отриманих епюр і результатів фізичного моделювання рекомендовано в тупику каналу зменшувати (у порівнянні з основною частиною) довжину паска на довжині, рівній товщині профілю, з переходом до основної частини на довжині, що залежить від співвідношення розмірів елемента профілю.

Для вивчення особливостей течії металу за допомогою спеціалізованого програмного комплексу кінцево-елементного аналізу Deform-3D було виконано моделювання процесу напівбезперервного пресування профілів із алюмінієвого сплаву.

У програмному середовищі DEFORM-3D моделювання здійснюється у три основні етапи:

1. Препроцесор;
2. Вирішувач (Solver);

3. Постпроцесор.

Препроцесор призначений для формування геометричної та розрахункової моделей об’єкта дослідження, задання параметрів сітки, температури, пластичних властивостей матеріалу, а також характеристик контакту – коефіцієнтів тертя й теплопередачі. На цьому етапі визначаються контактні зони між інструментом і заготовкою, виконується налаштування параметрів вирішувача та генерується база даних для подальших розрахунків.

У вирішувачі здійснюється безпосереднє чисельне розв’язання поставленої задачі.

Постпроцесор використовується для опрацювання й аналізу отриманих результатів. Він забезпечує відображення даних у графічній формі для кожного кроку розрахунку (загального чи локального в обраних точках), дає змогу визначити напрямки течії матеріалу, а також експортувати результати у вигляді текстових, графічних чи відеофайлів.

Розглянемо кожен із цих етапів детальніше з урахуванням специфіки процесу пресування. У розділі, присвяченому чисельним розрахункам у Deform, застосовуватиметься така ж послідовність дій, з урахуванням особливостей кожного конкретного випадку.

Після запуску програми Deform відкривається головне вікно (рис. 2.4), у якому відображаються всі раніше створені бази даних (1), робоча панель (2), а також доступ до модулів: препроцесор (3), вирішувач (4) і постпроцесор (5).

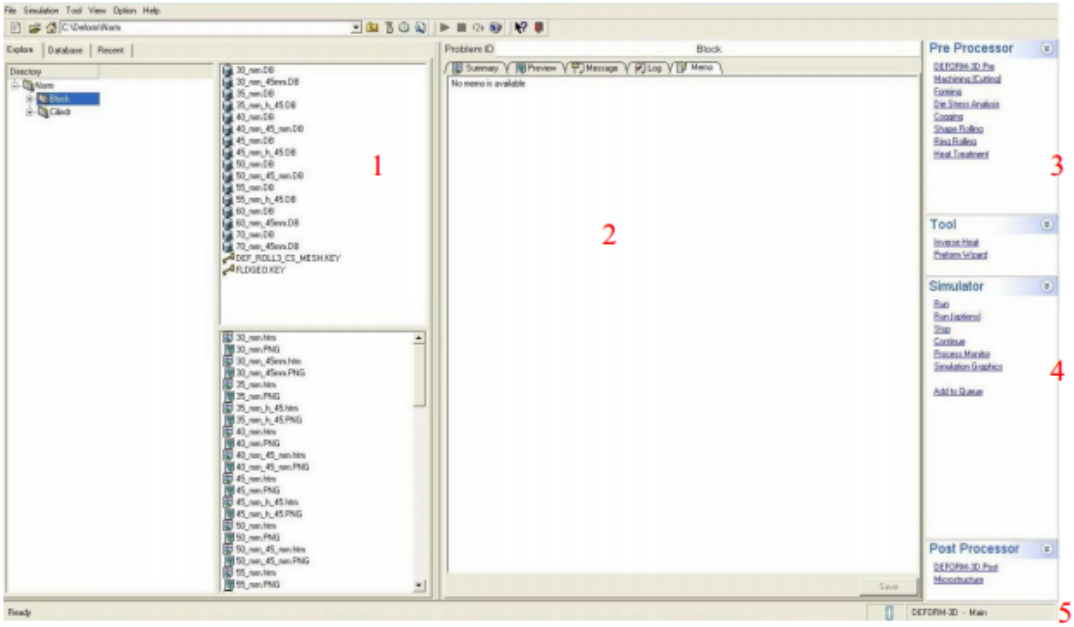


Рисунок 2.4 - Головне вікно Deform

У меню 3 вибираємо завдання, яке збираємося вирішувати, в нашому випадку це Blanking and piercing. Завданню необхідно присвоїти ім'я, в нашому випадку - Blanking (рис. 2.5).

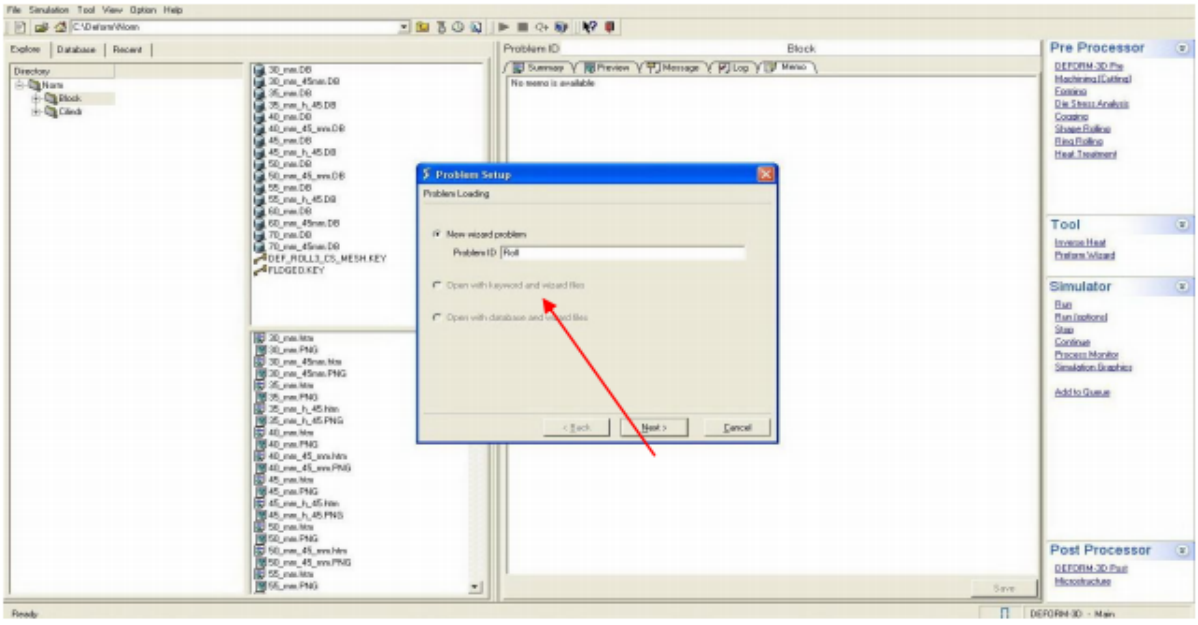


Рисунок 2.5 - Створення і привласнення імені новому завданню

Присвоївши ім'я, натискаємо кнопку Next, відкриється меню препроцесора для нашого завдання (рис. 2.6).

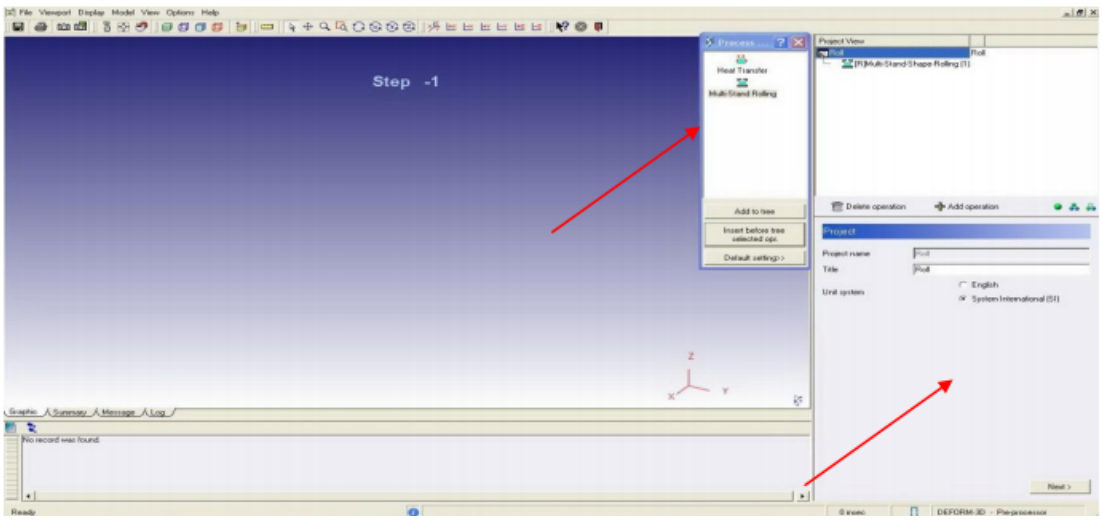


Рисунок 2.6 - Меню препроцесора

У меню, що з'явилося, вибираємо Blanking. Пам'ятаємо про одиниці виміру (нам потрібна система CI). Натискаємо Next. Далі з'явиться меню розрахунку температури (рис. 2.7).

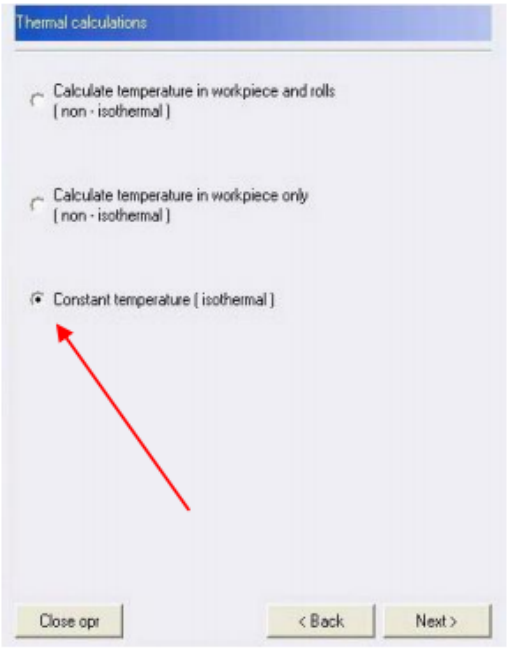


Рисунок 2.7 - Меню розрахунку температури

У нашому завданні температура буде постійною. Натискаємо Next і переходимо в меню вибору моделі заготівлі.

Для прискорення розрахунків вибираємо чверть (рис. 2.8).

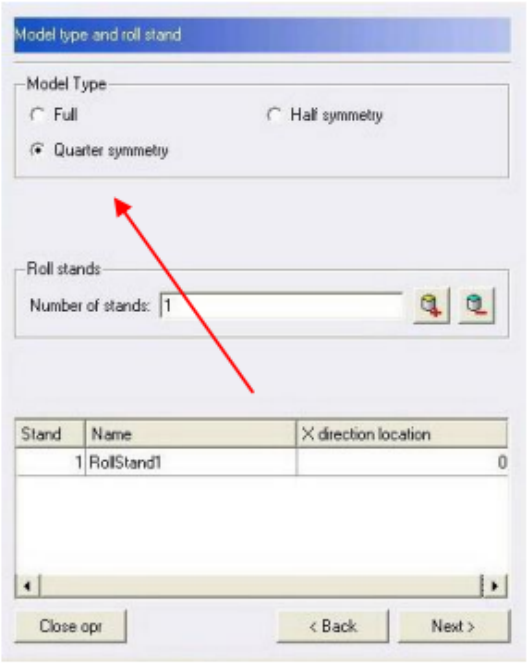


Рисунок 2.8 - Вибір моделі заготівлі

Наступний пункт - визначення геометрії для форкамери: радіус, скруглення, ширина і проміжок (рис. 2.9).

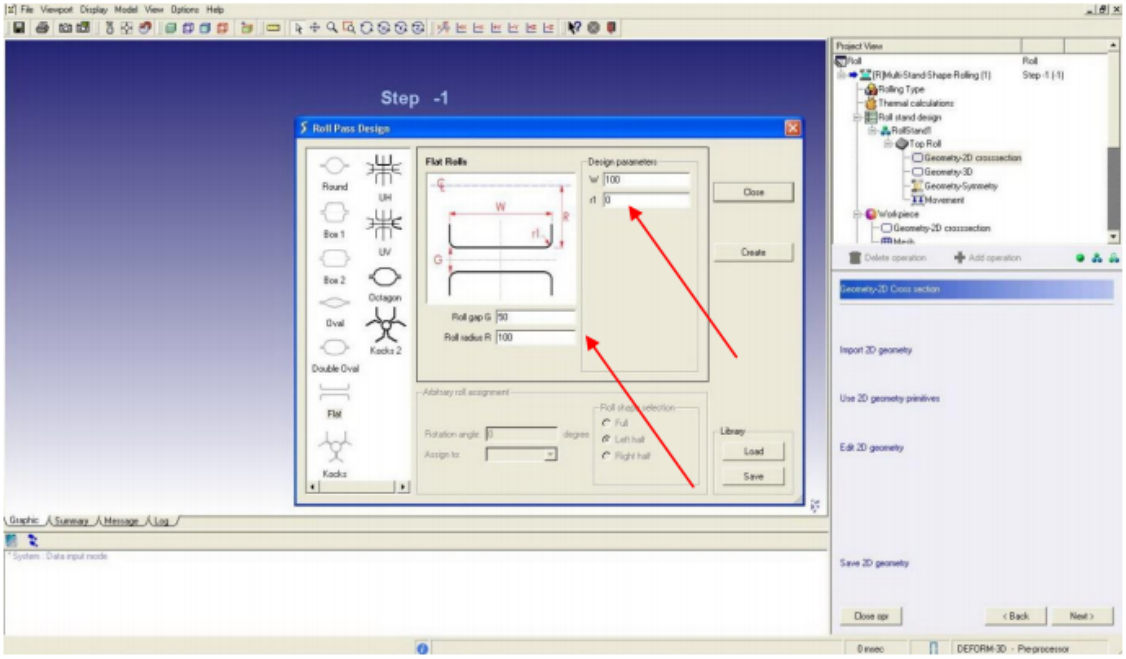


Рисунок 2.9 - Визначення геометрії форкамери і матриці

Форкамеру обираємо циліндричної форми та натискаємо **Next**. На екрані з’являється контур форкамери (рис. 2.10), який після обертання навколо осі формує її тривимірну модель.

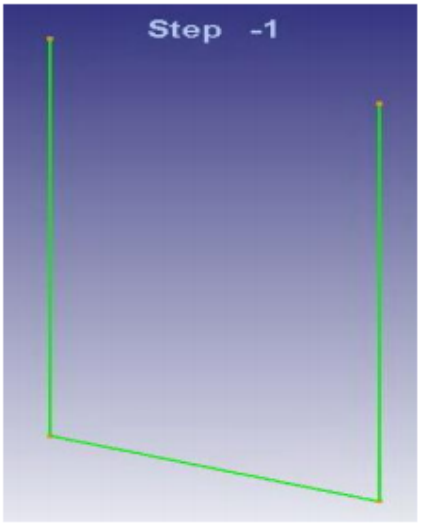


Рисунок 2.10 – Контур технологічного інструменту

Для моделювання було обрано процес пресування штаби розмірами 10×180 мм зі сплаву АД31 через форкамери різної глибини – 8, 16 і 20 мм та з коефіцієнтами витяжки 2,7; 4,2; 6,1. У розрахунках використовували параметри горизонтального гідравлічного преса зусиллям 25 МН і діаметром контейнера 225 мм. Заготовкою слугував зливок діаметром 220 мм та довжиною 350 мм, нагрітий до 460 °С.

Під час моделювання були прийняті такі спрощення. Оскільки процес пресування штаби є симетричним відносно вертикальної осі, розглядалася лише половина зони деформації. Пресовий інструмент вважався абсолютно жорстким. Температуру металу приймали сталою в межах стаціонарної стадії пресування, а швидкість руху прес-штемпеля – незмінною. За результатами моделювання отримано схеми течії металу під час напівбезперервного пресування.

Якісний аналіз показав, що основні закономірності течії металу при використанні форкамер узгоджуються з результатами фізичного моделювання. Зокрема, у контейнері (рис. 2.11а) та у форкамері (рис. 2.11б) формуються мертві

зони. Їх розміри різняться залежно від геометрії форкамери та параметрів контейнера.

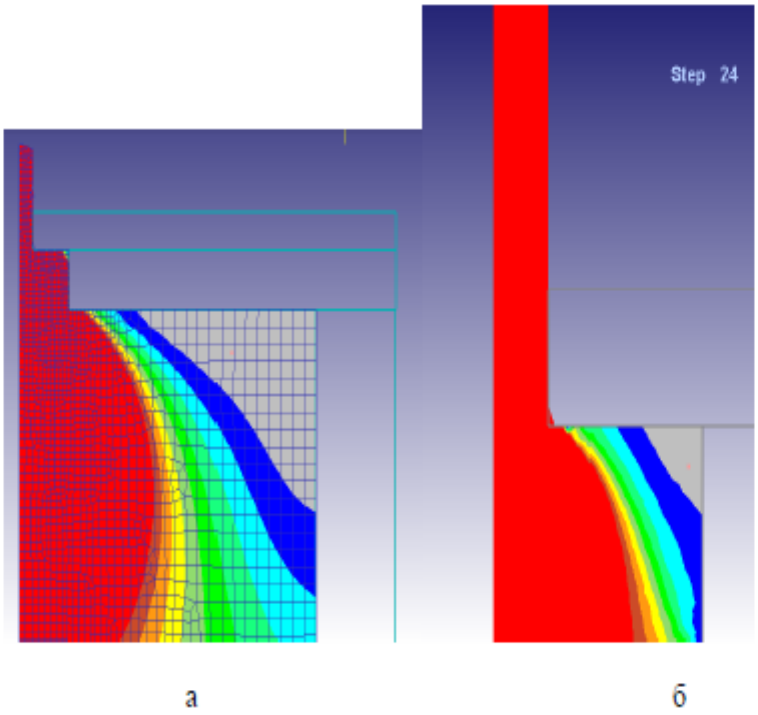


Рисунок 2.11 – Течія металу та мертві зони у форкамері (а) і контейнері (б): сірим позначено області з майже нульовою швидкістю, червоним – з максимальною

Загальна картина течії металу у форкамері (рис. 2.12) практично повністю повторює поведінку потоку в контейнері. Центральні шари переміщуються швидше, ніж периферійні, а частина металу затримується в мертвій зоні. Деформація координатної сітки у форкамері менш інтенсивна, що пояснюється більш рівномірною деформацією через знижені сили тертя на її стінках.

Аналіз графіка розподілу швидкості потоку металу по вертикальному перерізу форкамери (рис. 2.13) підтверджує, що швидкість центральних шарів у багато разів перевищує швидкість периферійних. Разом із тим застосування форкамер сприяє зменшенню нерівномірності деформації металу в контейнері, що суттєво впливає на вибір параметрів калібруючого паска під час проєктування пресового інструменту.

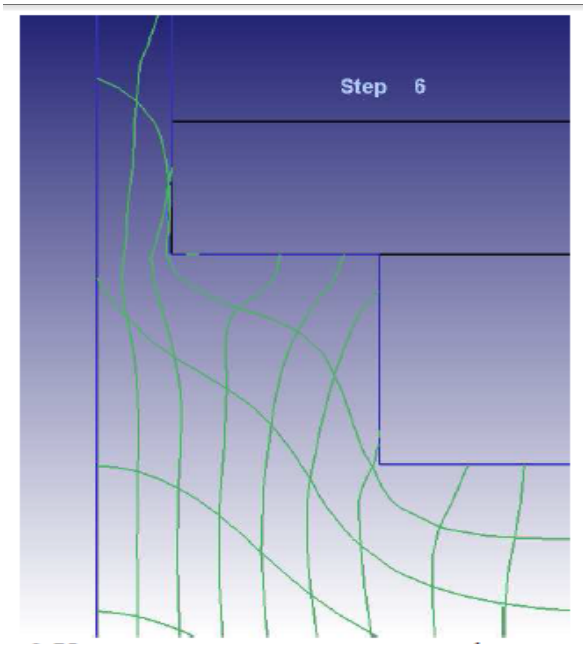


Рисунок 2.12 – Течія металу у форкамері

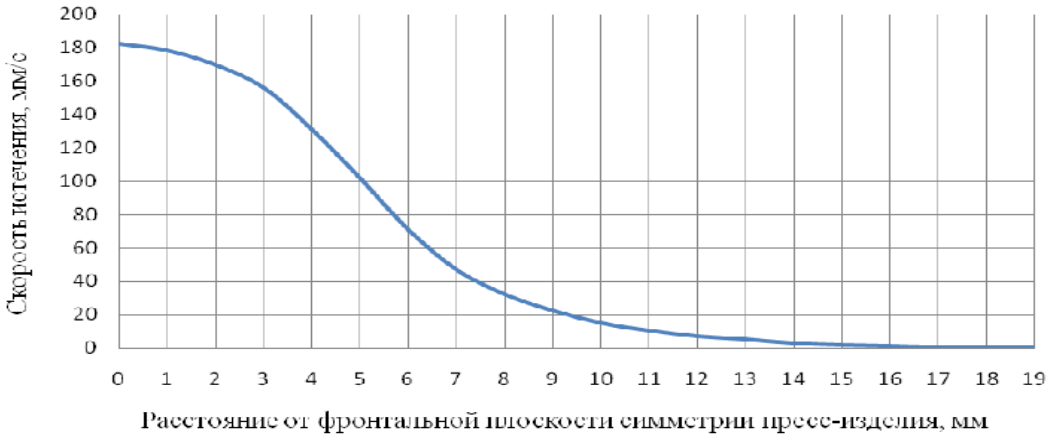


Рисунок 2.13 – Розподіл швидкості течії металу у вертикальному перерізі форкамери

У підсумку результати комп’ютерного моделювання дали змогу визначити основні закономірності течії металу при використанні форкамерного інструменту та кількісно описати відмінності швидкостей центральних і периферійних шарів у зоні деформації. Це створює передумови для врахування особливостей формозміни металу у форкамері під час розроблення алгоритмів проєктування пресового оснащення.

3 ОБРОБКА І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Результати математичного моделювання

Метою цього розділу кваліфікаційної роботи є експериментальне дослідження впливу відстані тонкостінного каналу від центра матриці, за різних співвідношень розмірів форкамери та температури заготівлі, на нерівномірність витікання металу при багатоканальному пресуванні алюмінієвого сплаву АД31.

Як основне устаткування використовувався вертикальний гідравлічний прес із зусиллям 10 МН та постійною швидкістю пресування 0,5 мм/с. Для роботи з алюмінієвими сплавами був виготовлений нагрівальний контейнер із внутрішнім діаметром втулки 42 мм і довжиною 120 мм [29]. Експерименти проводилися з використанням складеної матриці, ескіз якої наведено на рис. 3.1. Конструкція матриці дозволяє регулювати розміри (глибину) форкамери, змінюючи таким чином умовний кут форкамери β.

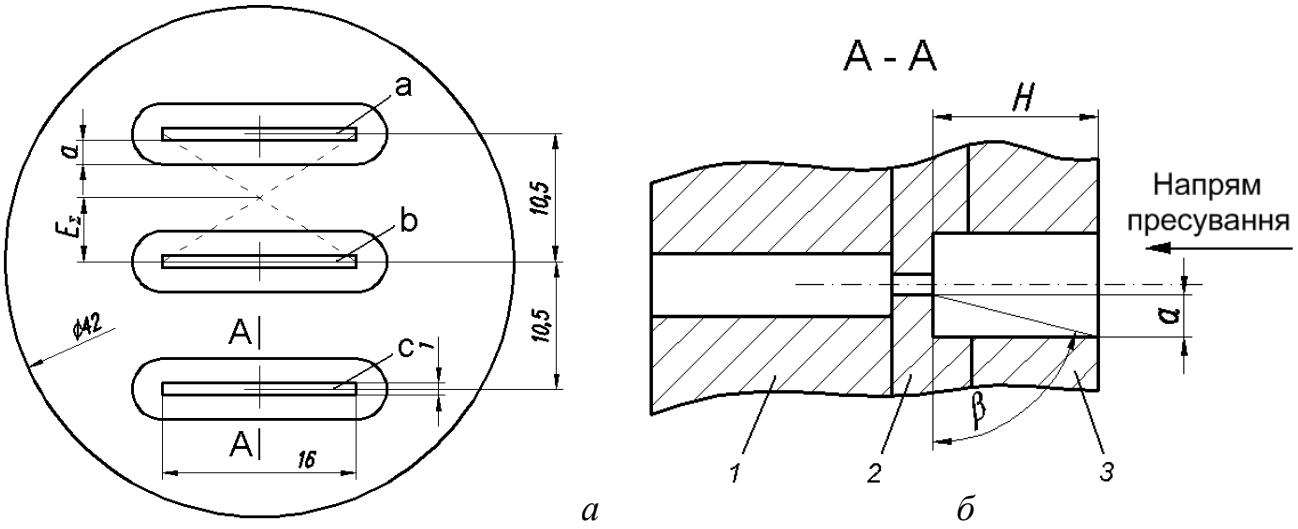


Рисунок 3.1 - Ескіз експериментальної матриці: *а* – дзеркало матриці; *б* – перетин форкамери й каналу (*1* – підкладка; *2* – матричне кільце; *3* – форкамерне кільце)

Використовували обточені заготівлі діаметром 41 мм, які попередньо нагрівали в електричній печі опору. Контейнер підігрівався до температури на 30±5 °С нижче номінальної температури заготівлі.

Методика проведення експерименту базувалася на плані повного факторного експерименту 2^3.

У якості змінних параметрів були обрані (рис. 3.1):

- відносна відстань від центра матриці до центра ваги каналів, тобто відношення цієї відстані до внутрішнього радіуса втулки контейнера, далі – зсув загального центра ваги каналів ЕΣ;
- умовний кут форкамери β, який характеризує відношення глибини форкамери до відстані від паска до стінки форкамери: β = arctg(H/a);
- температура заготівлі Тз, °С.

Зсув загального центра ваги каналів змінювали, заглушаючи пробкою або звільняючи один із крайніх каналів. Це впливало на коефіцієнт витяжки, який у даному випадку розглядали як залежну величину, а не керований фактор. Умовний кут форкамери змінювали шляхом регулювання глибини форкамери.

Об’єктивною характеристикою нерівномірності витікання металу обрали масу смуги, випресованої з кожного каналу, що прямо пропорційна середній швидкості витікання по каналах протягом часу пресування.

Рівні факторів, інтервали їх варіювання та план експерименту наведені в табл. 3.1. Діапазони значень температури і глибини форкамери визначалися на основі даних літератури та заводської практики. Для кожної експериментальної точки проводили по три повтори, що забезпечує мінімально статистично значущу вибірку.

Функцією відгуку обрали відношення маси профілю, що виходить із кожного каналу матриці, до сумарної маси всіх профілів, отриманих у даному досліді.

У табл. 3.2 наведені результати експериментів (середні значення трьох повторів) у порівнянні з теоретичними даними. Позначення профілів показані на рис. 3.1.

Таблиця 3.1 – План повного факторного експерименту 2^3

Рівень/фактори			Умовний кут форкамери □,°	Відстань від центра матриці до центра ваги всіх каналів, E□	Температура заготівлі, $T_З$,°С
Основний рівень(x=0)			60	0,125	475
Інтервали варіювання			15	0,125	25
Верхній рівень (x_i=1)			75	0,25	500
Нижній рівень (x_i=-1)			45	0	450
Код		X_0	X_1	X_2	X_3
точки плану	черговості досліду				
1	7	+	+	+	+
2	8	+	–	+	+
3	6	+	+	–	+
4	1	+	–	–	+
5	2	+	+	+	–
6	3	+	–	+	–
7	4	+	+	–	–
8	5	+	–	–	–

Розкид експериментальних даних становив не більше 5%. Оскільки дослідження проводилися за планом 2^k, результати їх не дозволяють одержати іншу експериментальну, крім лінійної, форму залежності співвідношення швидкостей витікання по каналах від зсуву E□. Однак наявність множинних літературних даних про розподіл швидкостей по окремих каналах для плоских матриць дозволяють припустити наявність параболічної форми залежності розподілу швидкостей витікання як функції відстані до центра матриці. Приймаючи таку гіпотезу для випадку пресування через форкамерні матриці з тонкостінними каналами, визначаємо співвідношення швидкостей для випадку пресування через 3 канали без зсуву й через 2 канали з відносним зсувом E□=0,25.

Використовуємо відому формулу В.П. Альошина для визначення розмірів паска [30]. Відповідно до цієї залежності, відношення довжини пасків визначиться по формулі:

$$\frac{h_i}{h_0} = \frac{\Pi_0 F_i}{\Pi_i F_0} \frac{\Psi_i \mu_0}{\Psi_0 \mu_i}, \tag{3.1}$$

де h – довжина паска;

F і □□– площа й периметр каналу;

Ψ□– швидкісний коефіцієнт;

□ – поділянкова витяжка (□□=ln(F_i/F_k));

F_k – площа контейнера;

i і 0 – індекси розглянутого й початкового елемента.

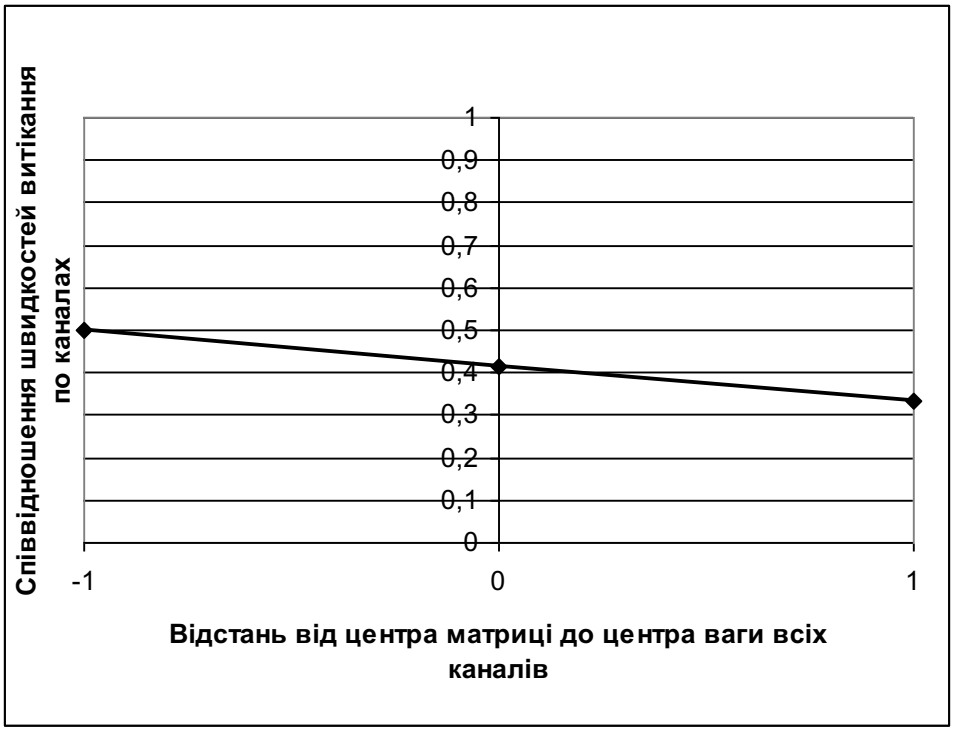


Рисунок 3.2 - Залежність співвідношення швидкостей витікання по каналах від відстані від центра матриці до центра ваги всіх каналів

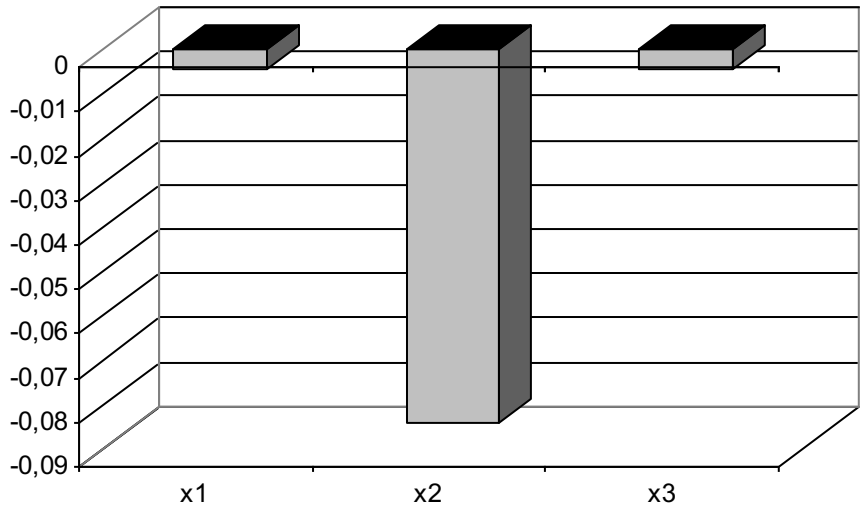


Рисунок 3.3 - Коефіцієнти регресії

Таблиця 3.2 - Теоретичні й експериментальні дані про співвідношення швидкостей витікання при многоканальном пресуванні

№ досліду	Сумарна маса профілів, що випресу-вали ,г	Маса профілю, г			Відношення маси профілю до сумарної маси (експериментальні дані)			Відношення маси профілю до сумарної маси (теоретичні дані), □*i*/□□*i*		
		a	*b*	*c*	*a*	*b*	*c*	*a*	*b*	*c*
1	190,3	58,8	70,4	61,1	0,307	0,370	0,323	0,31	0,38	0,31
2	198,8	57,7	80,1	61,0	0,290	0,403	0,307	0,31	0,38	0,31
3	185,0	81,4	103,6		0,440	0,560		0,43	0,57	
4	180,4	75,3	105,1		0,417	0,583		0,43	0,57	
5	184,5	59,2	69,2	56,1	0,321	0,375	0,304	0,31	0,38	0,31
6	181,8	57,0	69,9	55,0	0,313	0,384	0,302	0,31	0,38	0,31
7	199,2	86,4	112,8		0,434	0,566		0,43	0,57	
8	196,7	84,7	112,0		0,431	0,569		0,43	0,57	

У нашім випадку площі, периметри й поділянкові витяжки каналів рівні; відрізняються лише швидкісні коефіцієнти. Аналіз значень цих

коефіцієнтів за даними на малюнку їхнього розподілу свідчить про те, що цей коефіцієнт може бути математично виражений у такий спосіб:

$$□□= 1 – (□/R_к)^2. \quad (3.2)$$

Тоді, знаючи зсуву центра ваги кожного каналу, визначаємо швидкісні коефіцієнти для випадку пресування через 3 і 2 канали. Потім знаходимо відношення швидкості кожного каналу до суми всіх швидкостей $□i/□□_i$ (табл. 3.2).

Ці співвідношення будуть теоретичними значеннями співвідношень швидкостей (відповідно до прийнятої гіпотези). Для пресування в 3 нитки ці числа для крайніх каналів будуть рівні.

Зіставлення теоретичних і експериментальних результатів показало, що коефіцієнт кореляції між їхніми масивами становить 0,986. Оскільки на аналізований показник (а саме, відношення маси одного профілю при багатоканальном пресуванні до загальної маси профілів, що випресували), відповідно до наведених даних, робить тільки вплив зсув каналу матриці щодо центра, то можна констатувати, що при заданих умовах в описуваному інтервалі температур і глибин форкамери останні два фактори виявилися незначимі.

Таким чином, запропонована математична залежність для визначення співвідношення швидкостей витікання металу при багатоканальному пресуванні тонкостінних профілів і експериментально підтверджена можливість її використання.

3.2 Вплив технологічних факторів процесу на розміри поперечного перерізу тонкостінних прес-виробів

До основних факторів, що визначають різницю між розмірами каналу матриці та поперечним перерізом профілю, відносяться:

1. температурне розширення матеріалу матриці та пресованого металу;
2. пружна деформація матричного комплекту;

3. натяг, створюваний пулером;
4. подовження, що виникає при виправленні розтяганням;
5. утягування у тупикових елементах довгих полиць [5];
6. зношування матриці під час експлуатації.

Вплив температурного розширення на розміри профілю можна врахувати за даними, наведеними у [8]. Практичний досвід показує, що при пресуванні через сучасні форкамерні матриці з паском, який має значно меншу довжину у зоні тупиків, утягування металу не спостерігається. Інші фактори будуть розглянуті детальніше нижче.

Для експериментальної оцінки величини пластичної формозміни після проходження через калібруючий пасок матриці (далі – «позаконтактна деформація») необхідно або усунути, або врахувати розрахунковим шляхом термічне розширення та пружну деформацію матричного комплекту. Експериментальні дослідження позаконтактної деформації поділялися на дві групи:

1. пресування штаб із пластиліну на вертикальному гідравлічному пресі;
2. пресування алюмінієвих профілів простої форми та труб на горизонтальному гідравлічному пресі.

Пресування виконували без використання технологічного змащення при кімнатній температурі. Швидкість руху прес-штемпеля становила 0,5 мм/с.

У виготовлених штаб вимірювали товщину переднього та заднього кінців, яку порівнювали з шириною каналу матриці. Виміри проводили на відстані приблизно 200 мм від переднього торця прес-виробу, де можна вважати плин матеріалу сталим.

Наявність позаконтактної деформації підтверджується збільшенням товщини штаби порівняно з розмірами каналу матриці та характером плину матеріалу у форкамері і на виході з каналу (рис. 3.4). У стислій частині пластичної зони форкамери паралельні шари металу звужуються й сходяться до

осі штаби, а на виході з паска – розходяться, що особливо помітно у центральних (осьових) шарах.

На рис. 3.5 показано відношення товщини штаби sп до ширини каналу sк залежно від відношення ширини форкамери *B* до її глибини *H*. Аналіз графіків демонструє, що при різних абсолютних ширинах форкамери залежності *sп/sк(B/H)* мають однаковий характер із мінімумом у зоні *B/H* = 1,2. Саме в цьому діапазоні, за результатами математичного моделювання асиметричного пресування штаб із сплаву АА6060 [17], очікується мінімальне скривлення штаб на виході з преса.

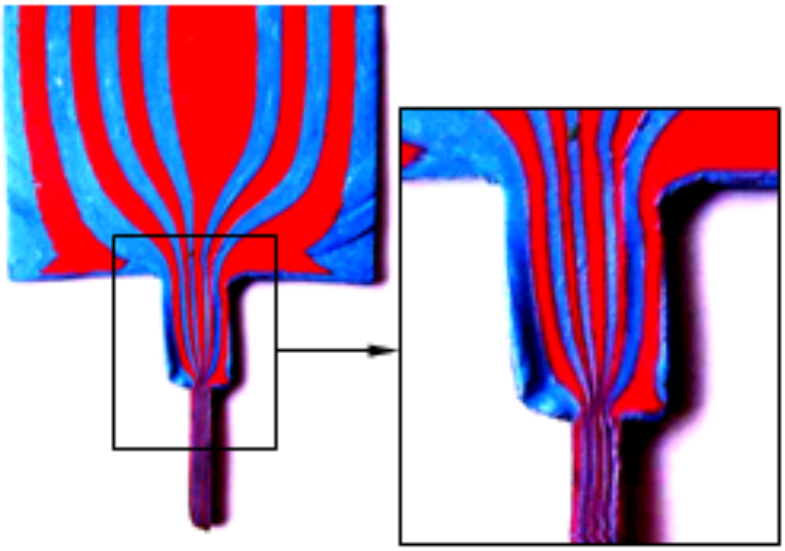


Рисунок 3.4 - Формозміна матриці в площині осі матриці, перпендикулярної каналу

Результати, отримані з використанням пластиліну як модельного матеріалу, показують більші абсолютні відхилення товщини штаби, проте добре ілюструють загальні закономірності явища.

На рис. 3.6 наведено форму переднього кінця штаби («виходи») для обох типів матриць і різних сплавів. Пресування через традиційну плоску матрицю зі змінною товщиною паска забезпечує практично пряму форму «виходу», що свідчить про рівномірний розподіл швидкостей металу по ширині штаби. Пресування через форкамерну матрицю призводить до утворення «мов» на краях

штаби, що пов’язано з тим, що матриця була призначена для магнієвих сплавів із меншим коефіцієнтом тертя порівняно з алюмінієм.

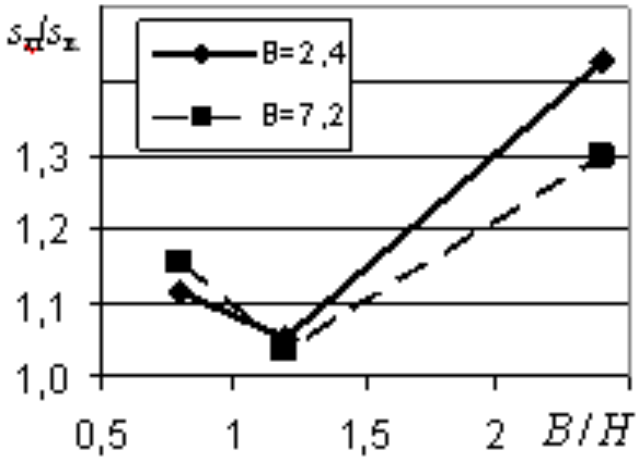
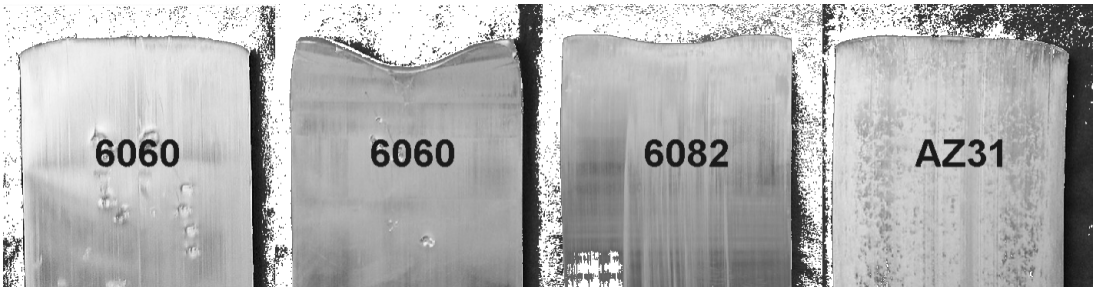


Рисунок 3.5 - Відношення товщини штаби до ширини каналу для різної відносної ширини форкамери

Для сплаву 6082 величина «мов» менша, ніж для 6060, а для сплаву АД31 вони відсутні. На практиці зазвичай середина штаби випереджає краї. Використання форкамерної матриці, у якій щаблі всередині каналу відстають від країв робочого паска на 0,5-1 мм, забезпечило суттєве гальмування металу в цій зоні, навіть для відносно товстої штаби при використанні паска з постійною товщиною 4 мм, що сприяє підвищенню зносостійкості матриці.



а *б* *в* *г*

Рисунок 3.6 - Форма переднього кінця штаб: а – пресування через плоску матрицю; б-г – через форкамерну

Аналіз структури пресованих штаб 80×6 мм показує значну нерівномірність величини зерна по перетину профілю. Біля поверхні

утворюється крупнокристалічний ободок (ККО) з розміром зерна 20-100 мкм. У центрі перетину зерно дрібніше, але може досягати 100 мкм. Між ними – перехідна зона з розміром зерна 10-50 мкм [4]. Зі збільшенням швидкості пресування нерівномірність структури зростає, проте це стосується лише середини штаби, тоді як біля краю структура дрібна й однорідна.

Порівняння штаб із сплаву 6060, пресованих у плоскій і форкамерній матриці, показує, що у плоскій матриці біля поверхні зерно дрібніше й витягнуте вздовж напрямку пресування, проте різниця невелика. Глибина ККО при використанні форкамерної матриці приблизно на 30 % менша, ніж у плоскій матриці.

Для штаб із сплаву 6082 також утворюється ККО. Через форкамерну матрицю межа ККО чітка, товщина 200–350 мкм; через плоску матрицю межа розмита, а товщина досягає 1,5-2 мм, розмір зерна у ККО більший – до 1000 мкм проти 500 мкм у форкамерній матриці. Зерно в центрі перетину дрібне (5-20 мкм) і витягнуте вздовж напрямку пресування.

Для усунення дефектів рекомендується збільшувати час гомогенізації злитка, підвищувати температуру заготівлі для зменшення роботи деформації й підвищення температури рекристалізації (за даними В.Н. Щерби), або застосовувати охолодження азотом на виході з матриці.

Порівняння з літературними даними показує, що збільшення швидкості витікання зазвичай призводить до зростання температури та зерна, проте для сплаву 6082 підвищення швидкості пресування зменшує глибину залягання ККО. Такі відмінності пояснюються геометрією пресового інструмента та впливом інших технологічних параметрів.

Таким чином, встановлено й підтверджено даними літератури, що для сплавів 6ххх серії пресування через форкамерну матрицю зменшує глибину залягання ККО порівняно з плоскою матрицею; збільшення швидкості витікання при використанні форкамерної матриці зменшує або зберігає глибину залягання ККО на рівні попередніх значень (AA6060, AA6082).

3.3 Структура та фазовий склад досліджуваних алюмінієвих сплавів

Дослідження структури та фазового складу є одним з основних методів оцінки сплавів з метою визначення впливу різних способів виготовлення і термічної обробки, вивчення впливу нових технологій і аналізу причин руйнування.

Вивчаючи впливу термічної обробки та деформації на величину зерна алюмінієвих сплавів, у роботі було розглянуто чотири алюмінієвих сплави різних систем:

1. Технічний алюміній;

2. Сплав алюмінію з марганцем стосовний до системи Al - Mn;

3. і 4. Конструкційні сплави типу дуралюмін системи Al - Cu - Mg - Mn з різним вмістом міді та магнію.

Ціль даного розділу – дати коротку інформацію про структуру і фазовий состав аналізованих сплавів.

Технічний алюміній залежно від вмісту домішок підрозділяється на кілька марок. У роботі був використаний технічний алюміній марки - А5М (див. таблицю 3.3).

Таблиця 3.3 – Хімічний склад технічного алюмінію А5М за ДСТ 11069-2001

Марка	Хімічний склад, %						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
А5М	0,06	0,29	0,005	0,005	0,005	0,011	0,012

Мікроструктура злитків алюмінію високої чистоти звичайно стовпчаста. Домішки, присутні в технічних сортах алюмінію (залізо, кремній), а також, що модифікуючи добавки (титан, цинк та ін.) сприяють здрібнюванню литої структури. У практиці ливарного виробництва для одержання дрібнокристалічної структури застосовується добавки титана в кількості до 0,1 % (див. рис 3.7).

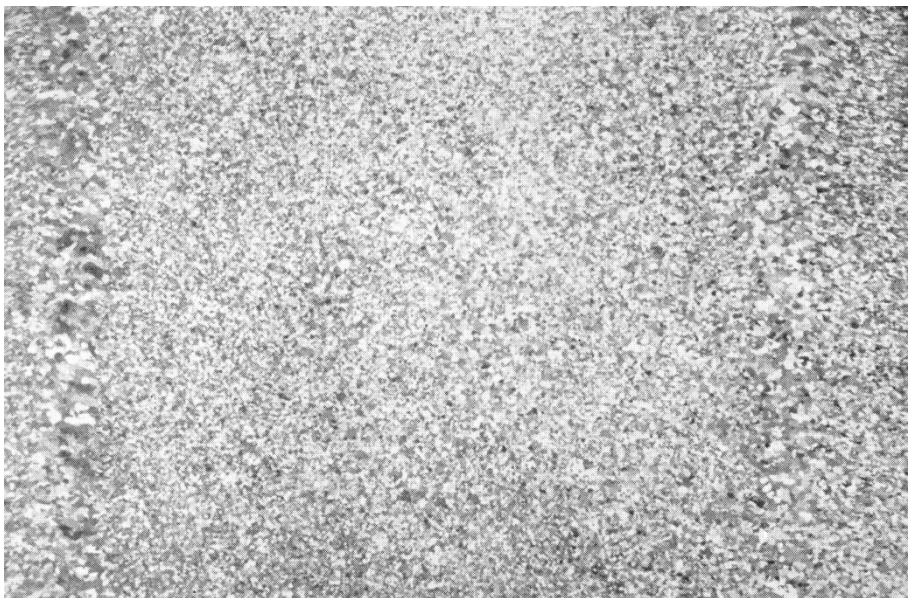


Рисунок 3.7 - Макроструктура плоского злитка алюмінію А5

Домішки заліза та кремнію утворять із алюмінієм кілька хімічних з'єднань. При значному перевищенні вмісту заліза над вмістом кремнію по границях дендритних осередків спостерігаються голкоподібні кристали Al_3Fe (рис. 3.8), які виділяються з розплаву як складові евтектики α (Al) + Al_3Fe. При інших співвідношеннях між залізом і кремнієм утворяться з'єднання α (AlFeSi) і β(AlFeSi) (рис. 3.9). Фаза β(AlFeSi) спостерігається в технічному алюмінії при значному перевищенні вмісту кремнію над вмістом заліза. Потрійні з'єднання утворяться по перитектической реакції або виділяються безпосередньо з рідини у формі кістякообразних кристалів (фаза α) і пластинчастих кристалів (фаза β). Фаза Al_3Fe, α, β тендітні й знижують пластичність алюмінію. Після гомогенізації структура алюмінію змінюється: границі дендритних осередків стають більше тонкими і переривчастими, що свідчить про часткове розчинення і коагуляцію хімічних з'єднань.

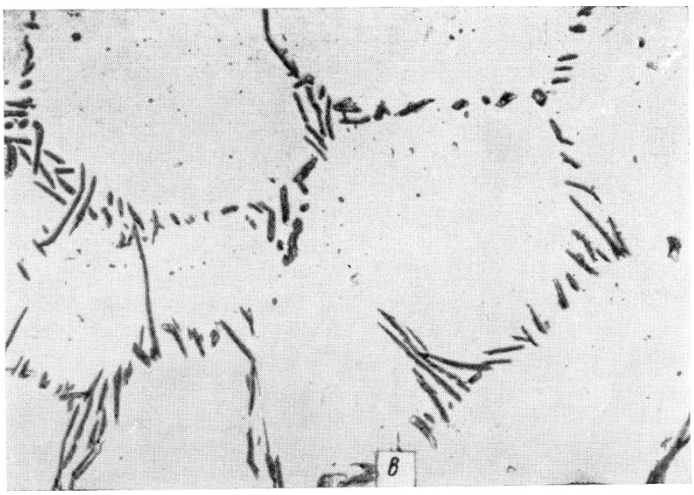


Рисунок 3.8 - Фаза Al_3Fe в алюмінії марки А5, ×300;

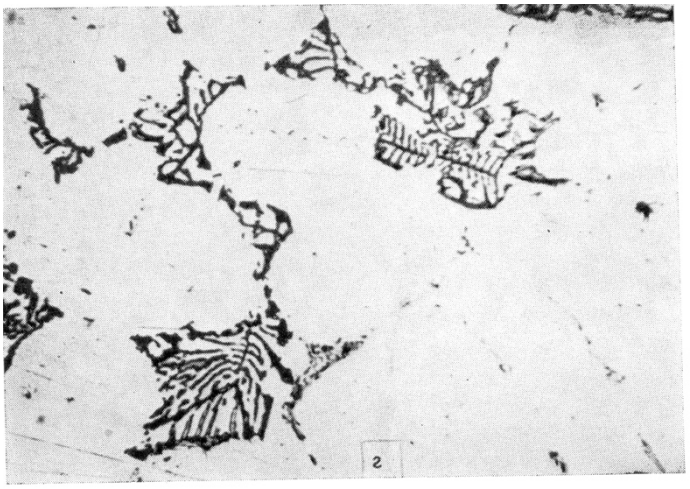


Рисунок 3.9 - Фаза AlFeSi в алюмінії марки А5, ×150;

Співвідношення заліза й кремнію в алюмінії дуже впливає на схильність злитків до утворення тріщин при литті. Перевищення вмісту заліза над кремнієм забезпечує одержання злитків без тріщин.

Сплав алюмінію з марганцем

Із промислових сплавів системи Al - Mn у роботі був застосований сплав АМц2 (рис.3.10). Марганець є в ньому основним легуючим компонентом і втримується в межах 1,0-1,6 %. Домішки, % (не більше): 0,7% Fe; 0,6% Si; 0,2% Cu; 0,1% Zn; 0,2% Ti; 0,05% Mg.

Відмінні риси діаграми стану Al – Mn: украй малий вертикальний інтервал кристалізації твердого розчину, що становить 0,5 – 1° С; значна довжина горизонтального інтервалу кристалізації, що приводить при нерівновагих умовах кристалізації до усередині кристаллитной ліквації; відносно висока розчинність марганцю при евтектичній температурі і різке зниження цієї розчинності в області температур 450-550° С, що охоплює весь діапазон температур термічних обробок (рис.3.11).

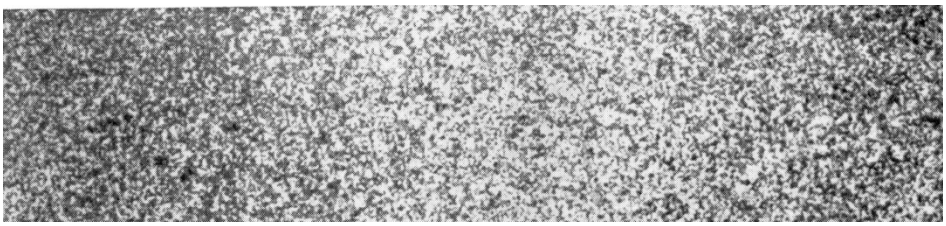


Рисунок 3.10 - Макроструктура плоского злитка сплаву АМц

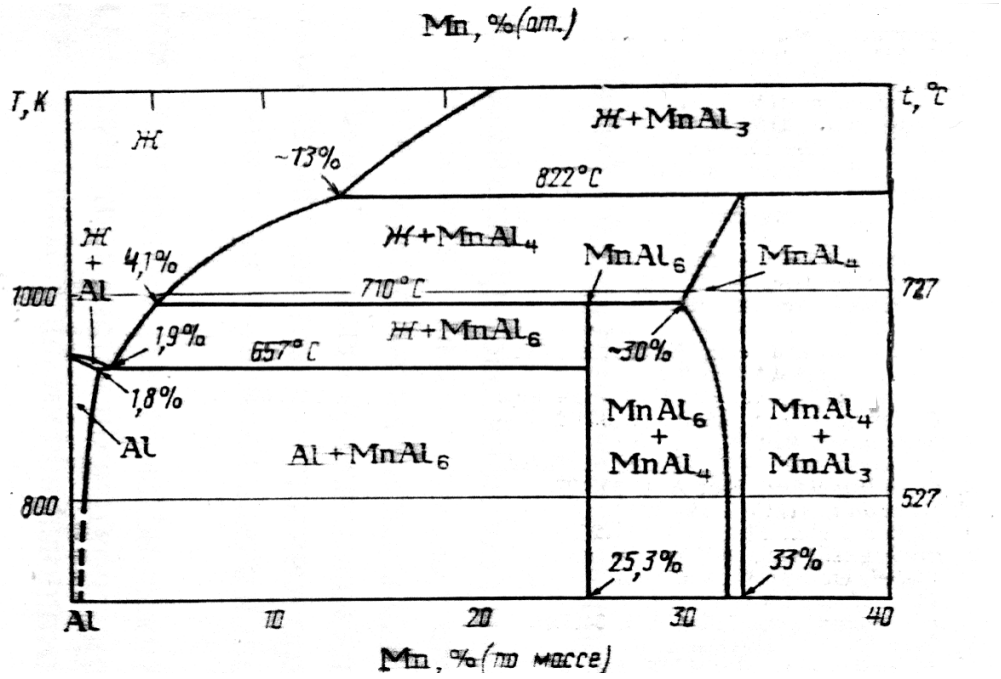


Рисунок 3.11 - Діаграма стану Al - Mn

При швидкому охолодженні та високих швидкостях кристалізації Al – Mn-сплавів відбувається перенасичення α-твердого розчину марганцем і кристалізація фази Al_4Mn замість Al_6Mn. У процесі наступного нагрівання Al_4Mn перетворюється в стабільну фазу Al_6Mn і стан перенасичення α-твердого розчину ліквідується. При малих швидкостях кристалізації Al_6Mn кристалізується

безпосередньо з розплаву. Неминуча присутність заліза в сплаві впливає на розчинність марганцю в розчині. Встановлено, що вже невелика кількість заліза різко знижує розчинність марганцю в α-твердому розчині.

Фаза Al_6Mn (25,34% Mn) (рис. 3.12) рівноважна з алюмінієм, має орторомбічну решітку з параметрами a = 6,49 ÷ 6,51 Å, $в$ = 7,54 ÷ 7,57 Å, c = 8,86 ÷ 8,87 Å; *HV* 5400-5600 МН/мм^2 майже постійна до 427^{O}C і потім швидко знижується. Теплота утворення становить 15 кДж/моль. Фаза Al_6Mn утвориться по перитектичній реакції при 710^{O}C із фази, формула якої звичайно повідомляється як Al_4Mn (33,7% Mn), хоча інтервал її існування (30-33% Mn) нижче стехіометричного вмісту. Фаза Al_4Mn зберігається в сплавах зі вмістом більш ніж 4-5% Mn, особливо при швидкому охолодженні. Фаза Al_4Mn має гексагональну решітку з параметрами a = 28,4 Å, c = 12,4 Å; твердість фази 7800 МН/мм^2. При більше високому вмісті марганцю утвориться кілька інших фаз.

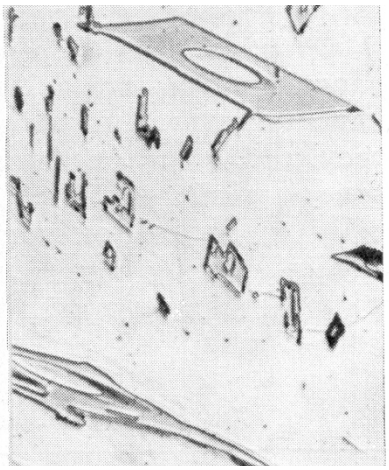


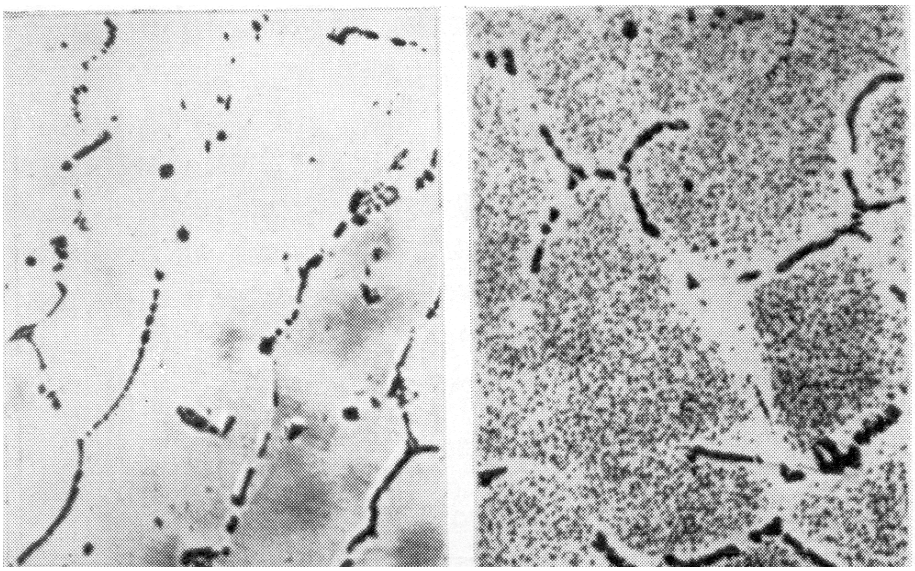
Рисунок 3.12 - Фаза Al_6Mn у модельному сплаві системи Al – Mn, ×300.

Фаза Al_6Mn здатна розчиняти значні кількості заліза, внаслідок чого утворюються грубі пластинчасті кристали твердого розчину Fe та Al_6Mn – фаза $Al_6(FeMn)$, що значно знижує пластичні властивості сплаву. Якщо в сплаві одночасно присутні домішки заліза і кремнію, то поряд із кристалами Al_6Mn може формуватися потрійне з'єднання кістякообразної форми α(AlMnSi) або фаза α(AlMnFeSi).

При безперервному литті марганцевмісних сплавів більша частина марганцю входить до складу твердого розчину, який кристалізується первинно і

не розпадається під час охолодження злитка. Такий твердий розчин пересичений щодо марганцю не лише при кімнатній температурі, але й при 400-500 °С, оскільки рівноважна розчинність марганцю при цих температурах не перевищує 0,3 %.

Під час гомогенізації, нагрівання злитка перед обробкою тиском та гарячої деформації відбувається розпад твердого розчину марганцю в алюмінії з виділенням часток марганцевих сполук. Структура злитка, отриманого методом безперервного лиття, складається із зерен пересиченого α-твердого розчину марганцю в алюмінії, у межах яких розташовані включення алюмінієво-марганцевої фази по границях дендритних осередків. Периферійні зони дендритних осередків містять значно більше марганцю, ніж їх центральні частини. Тому при нагріванні злитків продукти розпаду формуються переважно по границях осередків, а в центральних зонах їх утворюється значно менше (рис. 3.13).



а *б*

Рисунок 3.13 - Мікроструктура плоского злитка сплаву АМц: а - без гомогенізації, ×300; б - після гомогенізації, ×300.

Особливістю вихідної литий структури й пояснюється схильність сплаву АМц до утворення крупних зерен у напівфабрикаті.

Сплави системи Al - Cu - Mg - Mn

Сплави системи Al - Cu - Mg - Mn називаються дуралюмінами. У роботі застосовувалися широко використовувані в промисловості сплави АД31 і 1163 (див. таблицю 3.4).

Таблиця 3.4 – Хімічний склад сплавів системи Al - Cu - Mg - Mn за ГОСТ 4784-65

Сплав	Основні компоненти, %			Домішки, % (не більше)				
	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Ti	*Zn*	Ni
АД31	до 0,1	1,5	До 0,15	0,4 - 1,0	до 0,7%	до 0,1%	до 0,25%.	0,01
1163	4,3	1,42	0,45	0,09	0,13	0,08	0,025	0,01

Сплави даного типу поєднують добру оброблюваність тиском із високими механічними властивостями, що досягаються після термічної обробки — загартування та природного старіння. Основними фазами, які визначають процеси зміцнення цих сплавів, є $CuAl_2$, S (Al_2CuMg) та Mg_2Si. Фаза S надає найбільш ефективний вплив на зміцнення сплаву АД31 порівняно з іншими фазами ($CuAl_2$ або Mg_2Si). Кількість фази S у сплаві АД31 залежить від вмісту магнію, причому для її утворення необхідне співвідношення міді до магнію 2,6:1. При надлишку міді додатково формується фаза $CuAl_2$, а при значному вмісті кремнію – Mg_2Si. На рисунку 3.14 показано розташування промислових сплавів у системі Al–Cu–Mg, а в таблиці 3.5 наведено ймовірний фазовий склад цих сплавів.

Таблиця 3.5 – Імовірний фазовий состав промислових сплавів системи Al - Cu - Mg

Марка сплаву	Стабільні фази	Метастабільні фази
АД31	Al_2CuMg, Al_2Cu, Al_7Cu_2Fe, Mg_2Si	$(AlCu)_6$, (MnFe) Cu, Al (MnFe) Si, (FeMn) Al_6
1163	Al_2Cu, Al_7Cu_2Fe, Al_2CuMg, Mg_2Si	$(AlCu)_6$, (MnFe) Cu, Al (MnFe) Si, (FeMn) Al_6

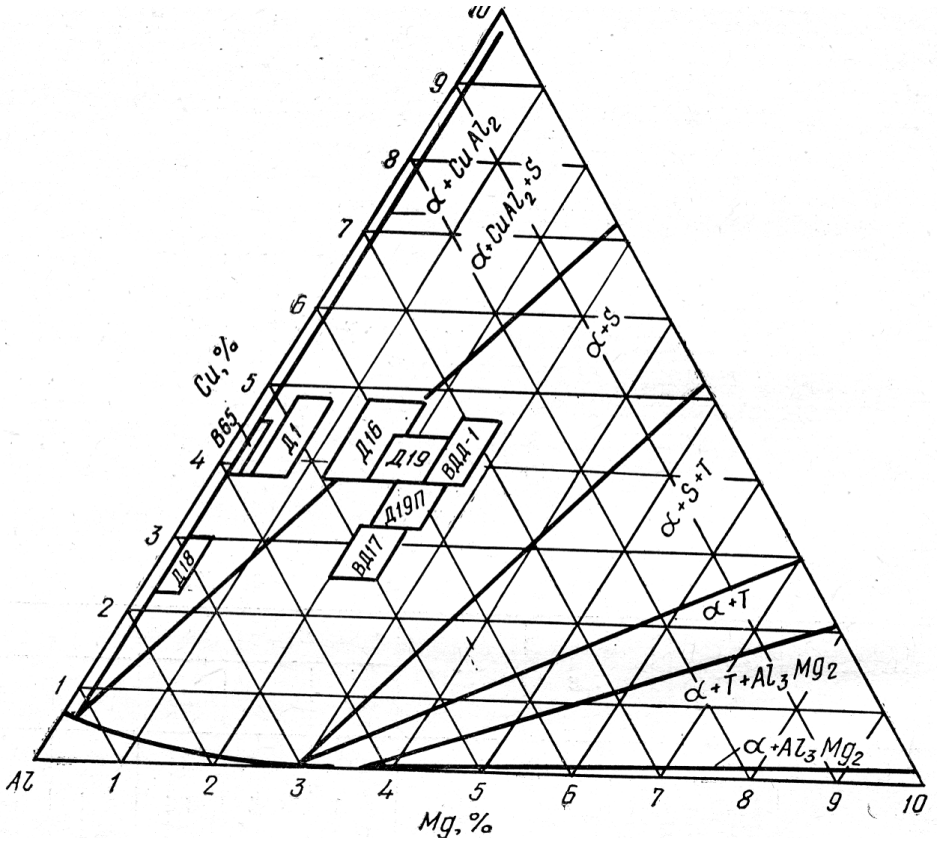


Рисунок 3.14 - Розташування промислових сплавів у системі Al – Cu – Mg і розподіл фазових областей при 200^{O}C.

У злитках сплаву АД31 зазвичай присутня певна кількість нерівноважної потрійної евтектики α + $CuAl_2$ + S(Al_2CuMg), що плавиться при 507 °С. У сплаві 1163 кількість цієї потрійної евтектики мінімальна, а найлегкоплавкішою складовою є евтектика α + Mg_2Si + $CuAl_2$ з температурою плавлення 517 °С. Тому сплав 1163 менш схильний до перевитрат металу під час лиття порівняно зі сплавом АД31.

З цих сплавів відливають плоскі, круглі та порожнисті злитки. Макроструктура плоских і круглих злитків однорідна та дрібнозерниста (рис. 3.15). Порожні злитки демонструють деякі відмінності у макроструктурі: на макрошліфах помітні чергування зон з дрібним та крупним зерном, що можуть виникати внаслідок руху металу в лунці під час падіння порції рідкого металу. На периферії злитків, у поверхневому шарі, формуються ліквацийні наплави або продукти зворотної ліквації — зони, збагачені легкоплавкими компонентами.

Концентрація міді та магнію в цих ліквітах значно перевищує їх вміст у основному металі.

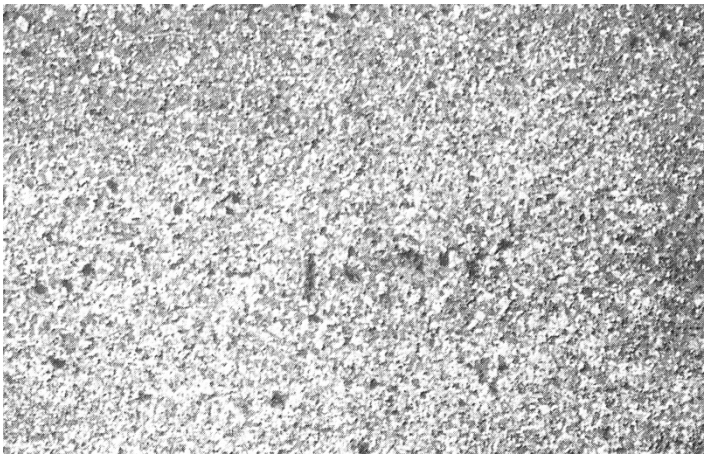
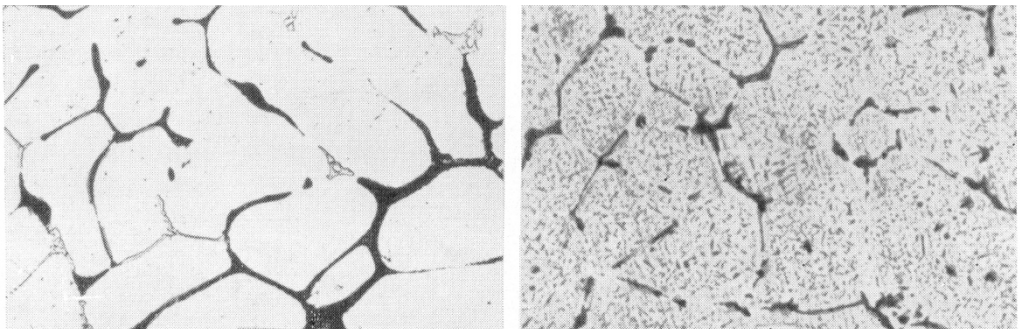


Рисунок 3.15 - Макроструктура плоского злитка сплаву АД31

На світлинах мікроструктури помітні світлі великі ділянки, що відповідають дендритним осередкам твердого розчину на основі алюмінію. По межах цих осередків розташовані складні нерівноважні евтектики, що включають основні фази: CuAl2, S, Mg2Si, T (AlCuMn) та α (AlFeSi).

Для досягнення більш однорідної структури та підвищення пластичності злитки піддають гомогенізуючому відпалу. Під час гомогенізації частки фаз CuAl2 та S розчиняються в твердому розчині, що призводить до вирівнювання складу твердого розчину всередині окремих зерен (рис. 3.16).



а *б*

Рисунок 3.16 - Мікроструктура плоского сплаву Д16: а - без гомогенізації, ×200; б - після гомогенізації, ×200

При гомогенізації відбувається також розпад пересиченого твердого

розчину марганцю в алюмінії з виділенням дисперсних часток фази Т (AlCuMn). Величина й форма залізистих фаз – α (AlFeSi) - у процесі гомогенізації практично не міняється.

Металографічні характеристики фаз, що є присутнім у сплавах даної групи, наведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Металографічні характеристики та щільність фаз, що є присутнім у сплавах системи Al - Cu - Mg

Фаза	Тип решіток	Форма кристала	Параметри ґрат, Å			Щільність *г/см³*
$CuAl_2$	тетрагональна	Голки (110)	6,052	–	4,878	–
Mg_2Si	кубічна	Октаедри (111), іноді зрізані по гранях куба (100)	6,391	–	–	–
Al_2CuMg	орторомбічна	Голки (0,10), (0,21)	4,00	9,23	7,14	–
Al_7Cu_2Fe	тетрагональна	Пластинки або лусочки (001)	6,32	–	14,78	4,1
AlCuMn	орторомбічна	Голки, часто двойнокові	–	–	–	3,70
AlFeSi	тетрагональна	Тетрагональні пластинки	6,11	–	9,46	3,43
$MnAl_6$	ромбічна	–	6,498	7,55	8,87	3,27
AlMnSi	кубічна	Куби (100)	12,63	–	–	3,55
Al_6Mg_4Cu	кубічна	Ромбічні додекаэдре (100), зрізані по гранях куби (100)	14,28	–	–	–
Al_3Mg_2	кубічна	–	28,16	–	–	2,24
$FeAl_3$	моноклінна	–	15,49	8,08	12,48	3,57
AlFeMnSi	кубічна	Ромбічні додекаедри (100)	12,63	–	–	–

3.4 Режими термічної обробки сплавів

З метою дослідження впливу хімічного складу алюмінієвих сплавів та умов їхньої термічної обробки на величину зерна було застосовано дробовий

факторний експеримент за методом Бокса-Вілсона, розглянутим у роботі [12]. Основним завданням було визначити оптимальний режим термообробки алюмінієвих сплавів, який забезпечує дрібнозернисту структуру із середнім розміром зерна не більше 90 мкм.

Параметром оптимізації (Y) обрано середній розмір зерна. Для оцінки впливу коливань хімічного складу в межах технічних умов були досліджені алюмінієві сплави різних систем: технічний алюміній (А5М), алюмінієвий сплав з марганцем (АМц2), конструкційні дуралюміни з різним вмістом міді та магнію (АД31 і 1163).

Величину зерна визначали методом січних згідно з ДСТ 21073.3-75. Для цього поверхню шліфа переглядали в не менше ніж двох типових місцях і на кожному проводили не менше двох одиничних вимірів. Збільшення підбирали таким чином, щоб у полі зору перебувало від 80 до 200 зерен. Січні лінії наносилися у вигляді двох непаралельних прямих або окружності; пряма мала перетинати не менше 10 зерен, окружність – не менше 20. Лінії накладалися на зображення досліджуваного місця, що спостерігалося на матовому склі мікроскопа, на мікрофотографії або безпосередньо через окуляр.

Для роботи використано горизонтальний мікроскоп МІМ-8 з окуляром, оснащеним шкалою та зображеннями, які застосовувалися як січні. Термообробку здійснювали в електропечі СНОЛ-1,6.2,0.0,8/9-М1, що була доступна в лабораторії кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки.

Результати дослідження та їхній аналіз

Вплив хімічного складу на розмір зерна. Зміна вмісту Mn у межах 0,005–1,4 % (відповідно до технічних умов) практично не впливала на середній розмір зерна листів товщиною 0,5–0,8 мм, прокатаних зі ступенем холодної деформації ε = 25 % та ε = 75 %. Аналогічно, варіація вмісту Fe від 0,13 % (сплав 1163) до 0,7 % (сплав АМц2) не демонструвала чіткої кореляції зі зміною середнього

розміру зерна. Проте підвищений вміст заліза у сплаві АМц сприяв частковому здрібненню зерна за рахунок утворення дисперсних інтерметалічних фаз.

Найбільш значний вплив на розмір зерна мають кремній і магній. Різке збільшення сумарного вмісту Si + Mg від 0,065 % (сплав А5М) до 1,5 % (сплав АД31) помітно відобразилося на величині зерна. Середній розмір зерна складав 27–79 мкм для АД31 та 32–84 мкм для А5М.

Водночас, аналіз показав, що у межах стандартних відхилень хімічного складу сплавів А5М, АМц, АД31 і 1163 на формування середнього розміру зерна істотніше впливають технологічні параметри виробництва листів, зокрема режими відпалу та ступінь холодної деформації. Проблема крупного зерна в алюмінієвих листах відома та досліджувалася в численних роботах [2–3].

Вплив пластичної деформації та термічної обробки на розмір зерна. Дрібнозерниста структура стабільно формується у загартованих листах при різних ступенях деформації, тоді як крупне зерно може з’являтися при невідповідних режимах відпалу. Аналіз результатів досліджень (рис. 3.17–3.20) показав, що збільшення ступеня холодної деформації призводить до зменшення розміру зерна, особливо при $\varepsilon > 50\,\%$. Режим остаточного відпалу має вирішальне значення: відпал при 360 °С забезпечує більш дрібне та однорідне зерно порівняно з відпалом при 420 °С.

Отже, визначальним фактором, що контролює величину зерна в листах, є температура та тривалість остаточного відпалу. Оптимальні параметри термічної обробки для стабільного дрібнозернистого зерна – температура 360–390 °С із достатньою витримкою.

З огляду на проведений аналіз, можна зробити висновок, що для забезпечення дрібнозернистої та однорідної структури листових алюмінієвих сплавів вирішальним є комплексний вплив технологічних параметрів: оптимальна хімічна композиція, контроль ступеня холодної деформації та правильний режим остаточного відпалу. Виконання цих умов дозволяє мінімізувати крупне зерно, покращити механічні властивості матеріалу та підвищити якість кінцевої продукції.

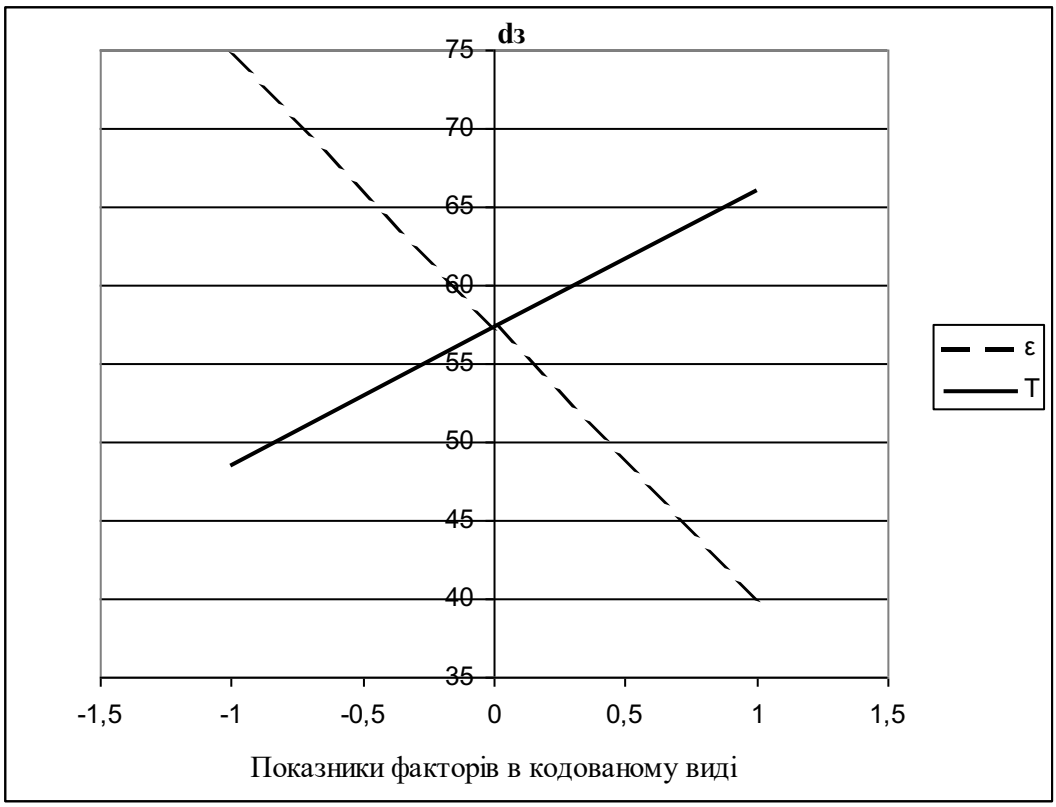


Рисунок 3.17 – Графічна залежність середнього розміру зерна ($\overline{d}_3$) від температури відпалу (Т) і величини відносного обтиснення (ε) для сплаву А5М

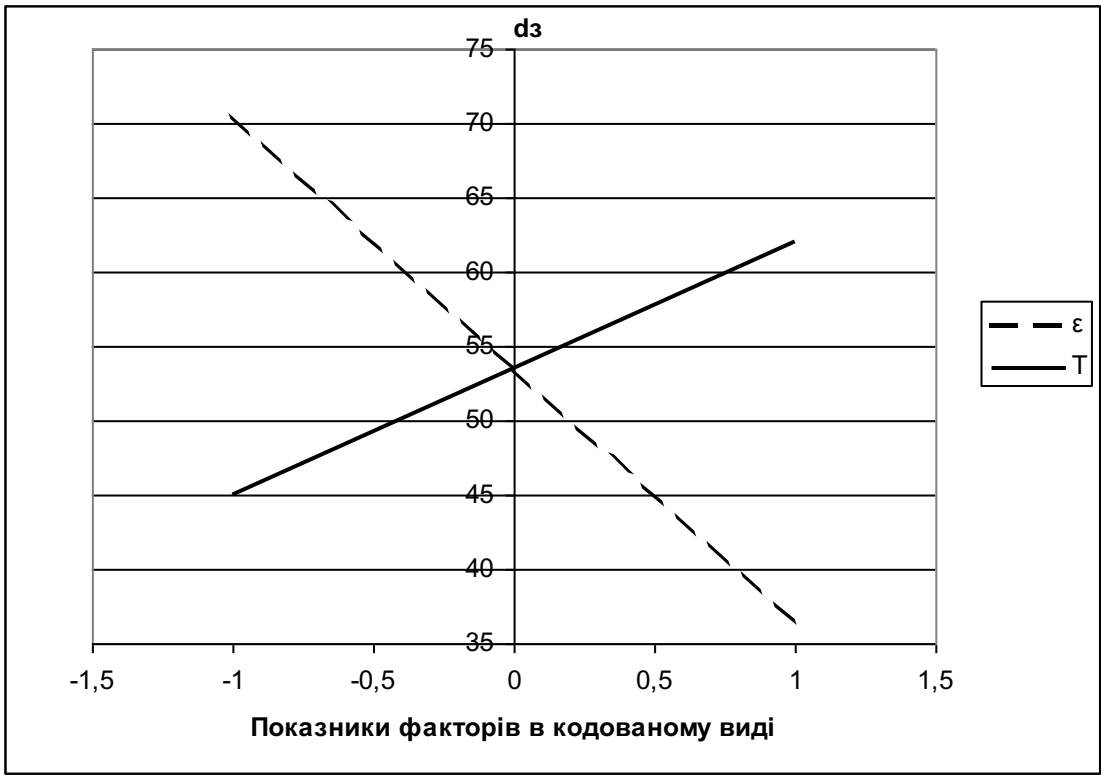


Рисунок 3.18 – Графічна залежність середнього розміру зерна ($\overline{d}_3$) від температури відпалу (Т) і величини відносного обтиснення (ε) для сплаву

Амц2.

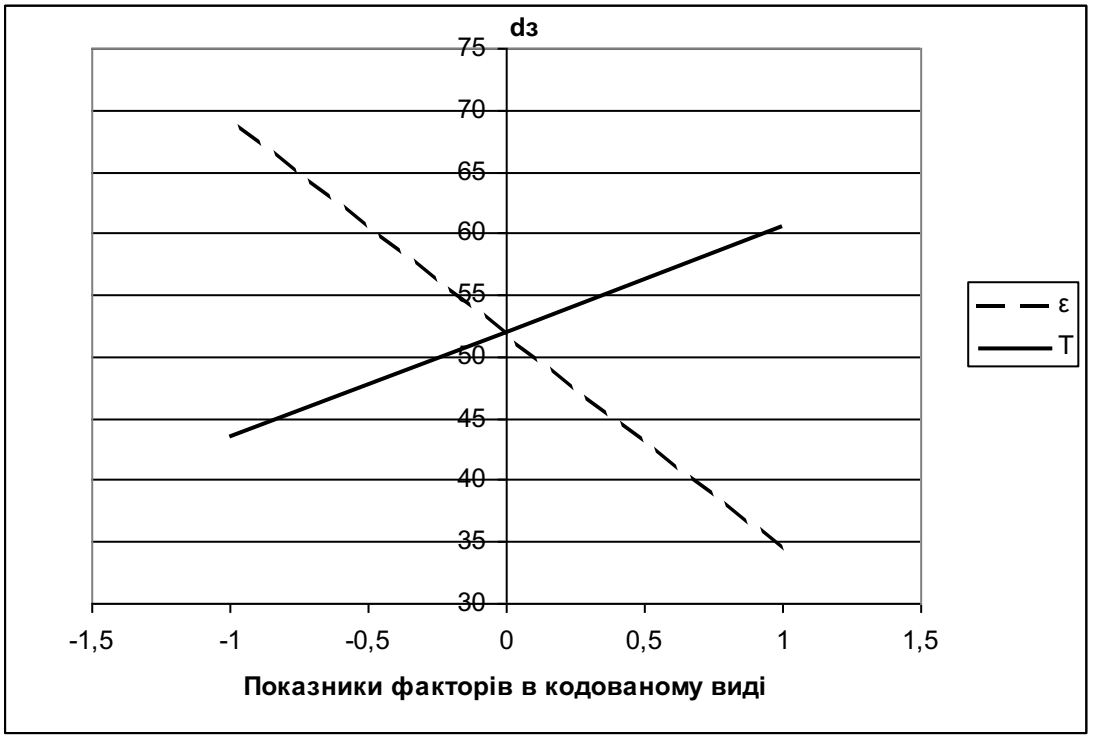


Рисунок 3.19 – Графічна залежність середнього розміру зерна ($\bar{d}_з$) від температури відпалу (Т) і величини відносного обтиснення (ε) для сплаву Д16.

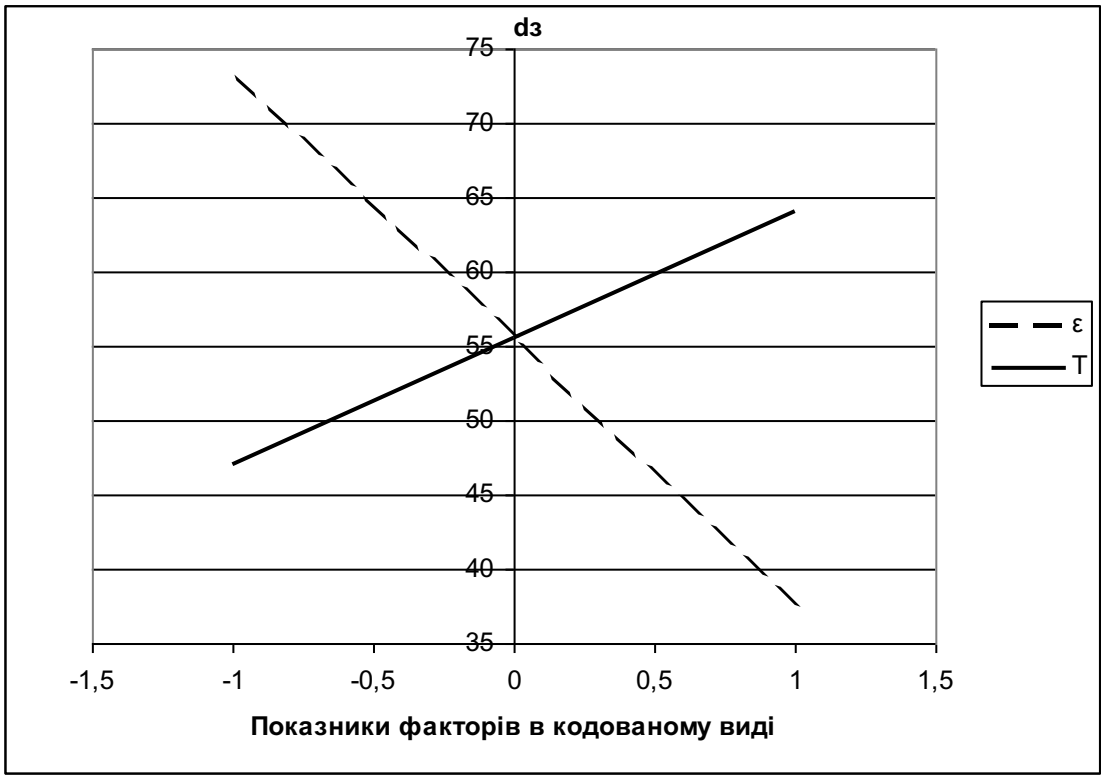
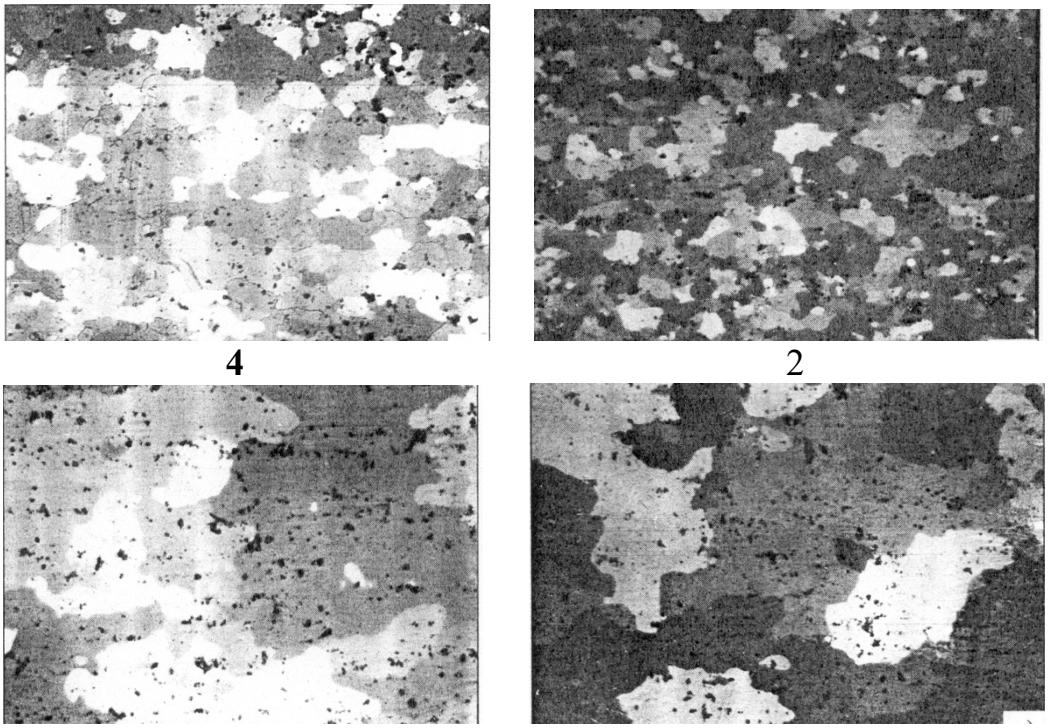


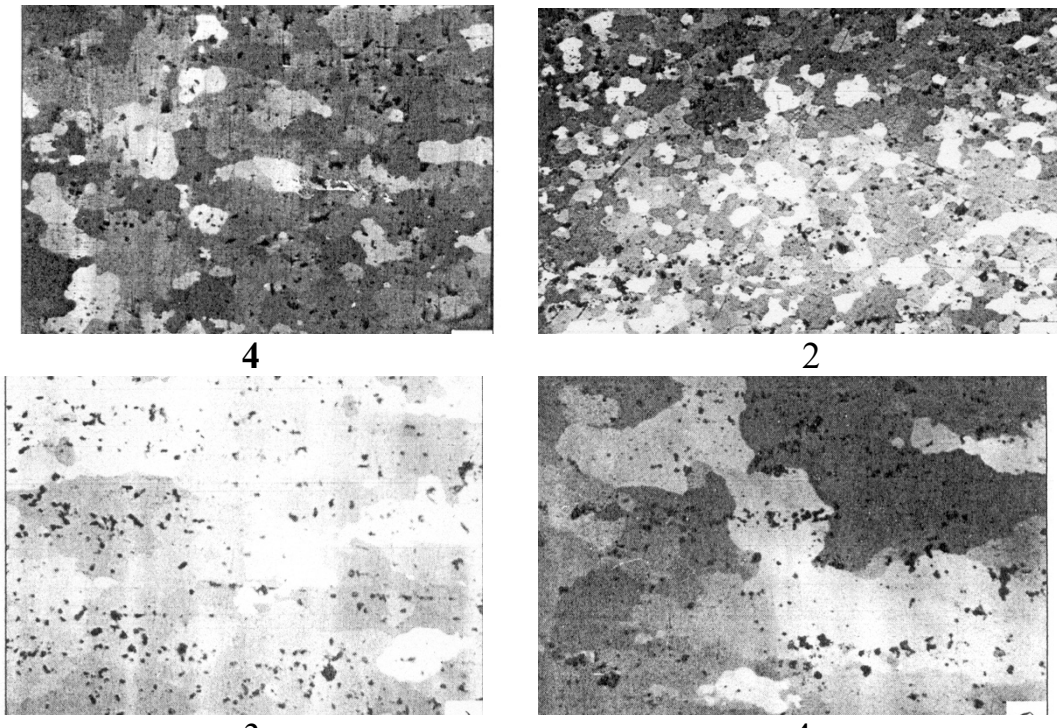
Рисунок 3.20 – Графічна залежність середнього розміру зерна ($\bar{d}_з$) від температури відпалу (Т) і величини відносного обтиснення (ε) для сплаву 1163.



4 2

3 4

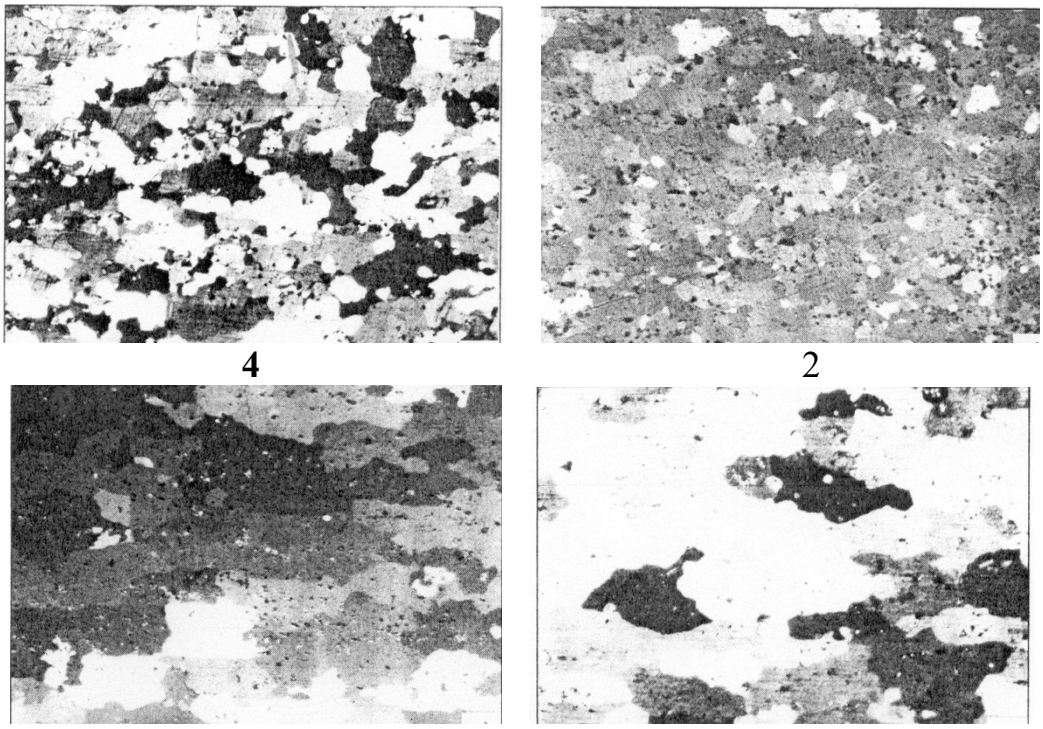
Рисунок 3.21 – Структура сплаву А5М після остаточного відпалу відповідно до проведеним дослідам у матриці планування



4 2

3 4

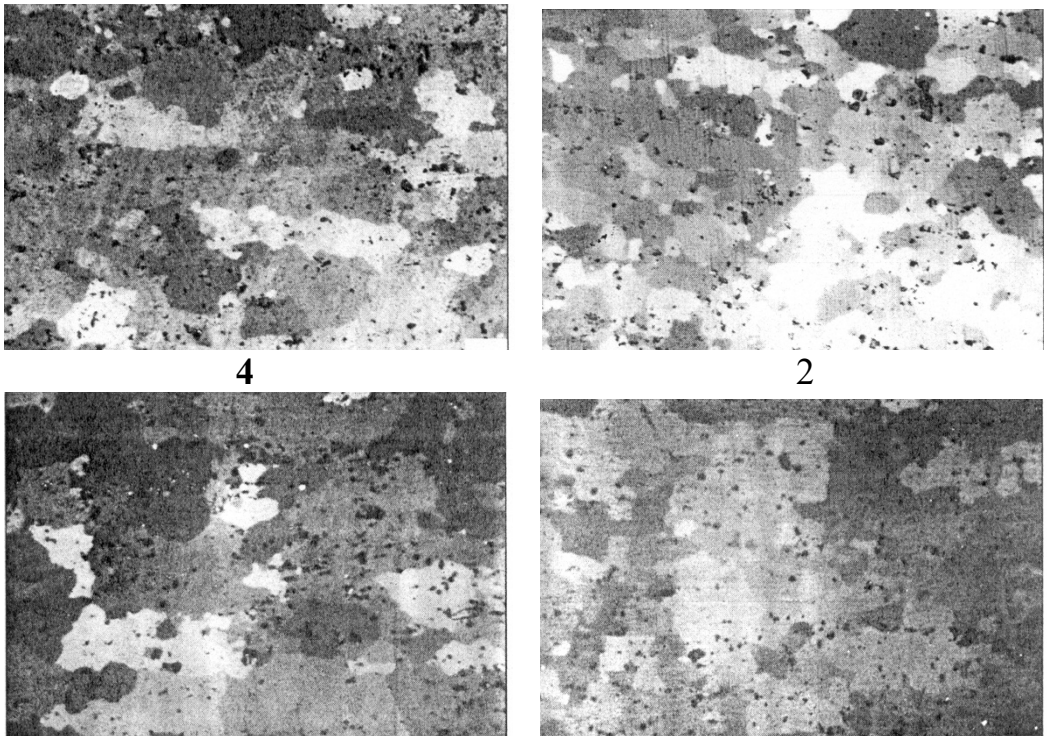
Рисунок 3.22 – Структура сплаву Амц2 після остаточного відпалу відповідно до проведеним дослідам у матриці планування



4 2

3 4

Рисунок 3.23 – Структура сплаву АД31 після остаточного відпалу відповідно до проведеним дослідам у матриці планування



4 2

3 4

Рисунок 3.24 – Структура сплаву 1163 після остаточного відпалу відповідно до проведеним досвідам у матриці планування

3.5 Нагрівальний пристрій

У роботі використалося виходячи з можливостей наявного в лабораторії кафедри термічного встаткування електропечі СНОЛ-1,6.2,0.0,8/9-М1.

Електропіч СНОЛ-1,6.2,0.0,8/9-М1 призначена для проведення різних видів термообробки. Технічні характеристики печі представлені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Технічні характеристики електропечі СНОЛ-1,6.2,0.0,8/9-М1

№	Технічна характеристика	Показник
1	Споживана номінальна потужність, кВт	2,5±0,25
2	Номінальна температура, ^{O}C	900
3	Розміри робочого простору, мм: довжина ширина висота	 200 160 80
4	Час досягнення номінальної температури (без садки), хв	100
5	Точність автоматичного регулювання при номінальній температурі, ^{O}C	±10
6	Середовище в робочому просторі	Повітря
7	Діапазон автоматичного регулювання температури, ^{O}C	300 ÷ 900
8	Номінальна напруга електричної мережі, В	220
9	Частота, Гц	50
10	Габаритні розміри, мм: довжина ширина висота	 630 485 700
11	Маса, кг	65

Контакти терморегулятора марки КМК-А31м СШ0516 і КМК-А31м ПШ0516 містять 0,3089 р. срібла Ср 999,9.

Електропіч складається з металевого корпуса 1 (рис.3.25), у верхній частині якого змонтована робоча камера, а в нижній частині – електричний блок 9.

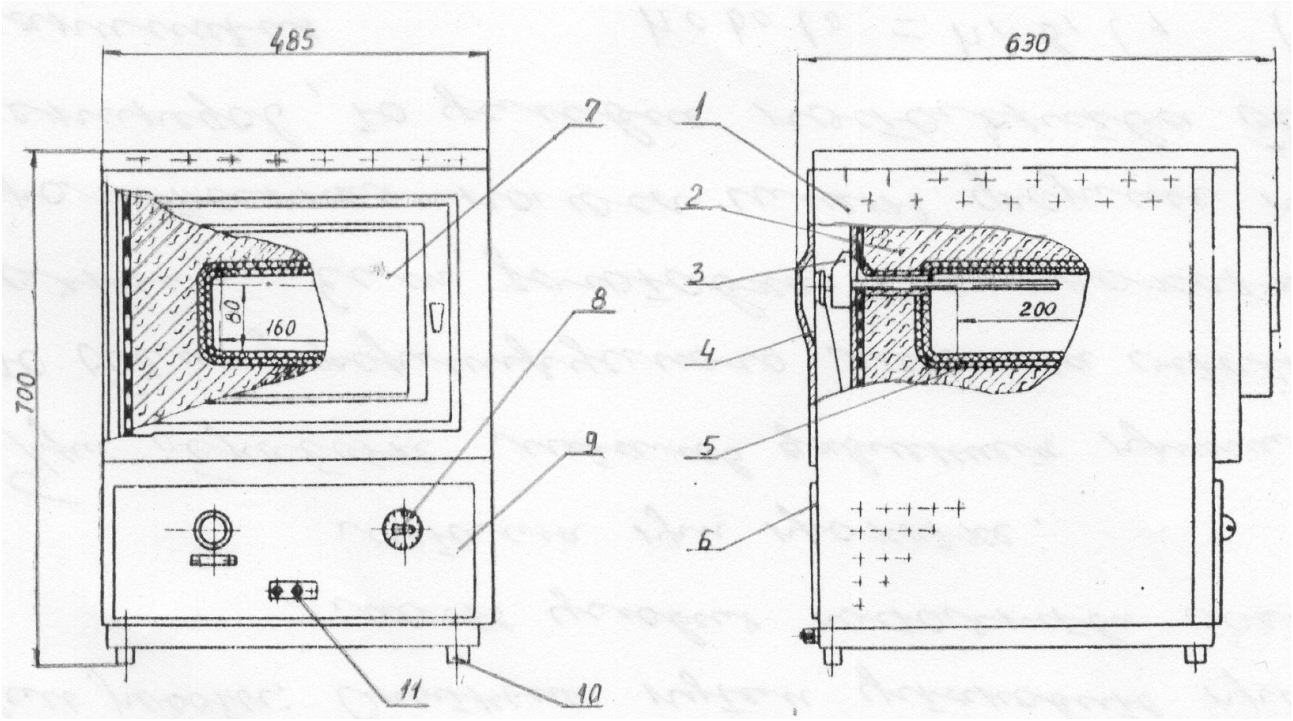


Рисунок 3.25 – Електропіч СНОЛ-1,6.2,0.0,8/9-М1 (габаритне креслення): 1 – корпус; 2 – теплоізоляція; 3 – терморегулятор; 4 – задній лист; 5 – вузол нагрівача; 6 – лист; 7 – дверцята; 8 – ручка терморегулятора; 9 – блок електричний; 10 – опора; 11 – перемикач.

У робочій камері перебувати вузол нагрівача 5 (рис.3.26), що складається з керамічного муфеля з намотаними на нього нагрівачем. Для закріплення нагрівача по кінцях муфеля робляться бандажі. На муфель після навивки нагрівача наноситься обмазка наступного состава: технічний глинозем (40%); мелений шамот (40%); вогнетривка глина (20%). Просушку обмазаного муфеля здійснюється по наступному режимі:

а) при кімнатній температурі (у плині 3-5 годин);

б) при 70^{O}С (у плині 8-10 годин);

в) при температурі 150^{O}С (у плині 5-8 годин).

Технічні характеристики нагрівача наведені в табл. 4.6. Простір між нагрівачем і корпусом заповнено теплоізоляцією 2. Робоча камера вставляється в зовнішній корпус (каркас) печі. Завантаження електропечі виробляється через проріз, що закриває дверцятами 7.

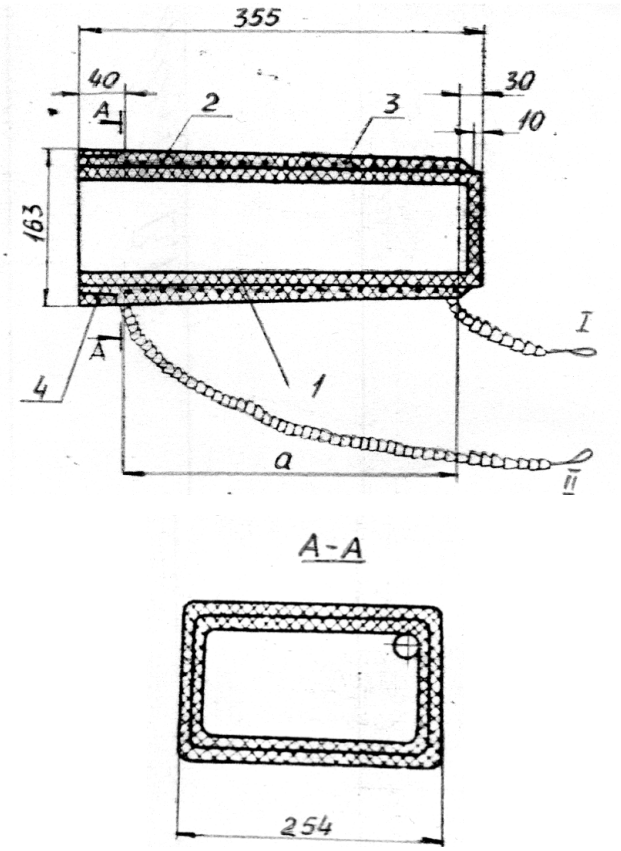


Рисунок 3.26 – Вузол нагрівача: 1 – муфель; 2 – нагрівач; 3 – обмазка; 4 – прокладка; а – зона намотування нагрівача; крок – 3,8 мм.

Таблиця 3.8 – Технічні характеристики нагрівача

№	Технічна характеристика	Показник
1	Матеріал	Дріт сплаву Х20Н80Н діаметром 2 мм ДСТ 12766-67
2	Загальна довжина дроту, м	58 (з бандажем і виводами)
3	Довжина робочої частини дроту (без довжини виводів), м	54
4	Довжина виводів (подвійний перетин), мм: першого (I) другого (II)	 250 500
5	Опір робочої частини нагрівача в холодному стані (без виводів), Ом	18,6±0,5
6	Крок навивки нагрівача, мм	3,8

Живлення електропечі здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В частотою 50 Гц. Клеми для приєднання до мережі розташовані

на задній стороні електричного блоку. В отвору для уведення проведення до клеммнику є табличка з написом «~220V».

Регулювання температури здійснюється дилатометричним терморегулятором, установленим на задній стінці робочої камери. Ручка управління терморегулятора виведена на лицьову панель. Нагрівач включається і відключається за допомогою магнітного пускача. Запалювання сигнальної лампи свідчить про подачу живлення на нагрівач. При автоматичному регулюванні температури електропечі сигнальна лампа періодично запалюється. В електропечі передбачена можливість виміру температури в робочому просторі за допомогою контрольної термопари, що вводить у робочу камеру через отвір у дверцятах електропечі.

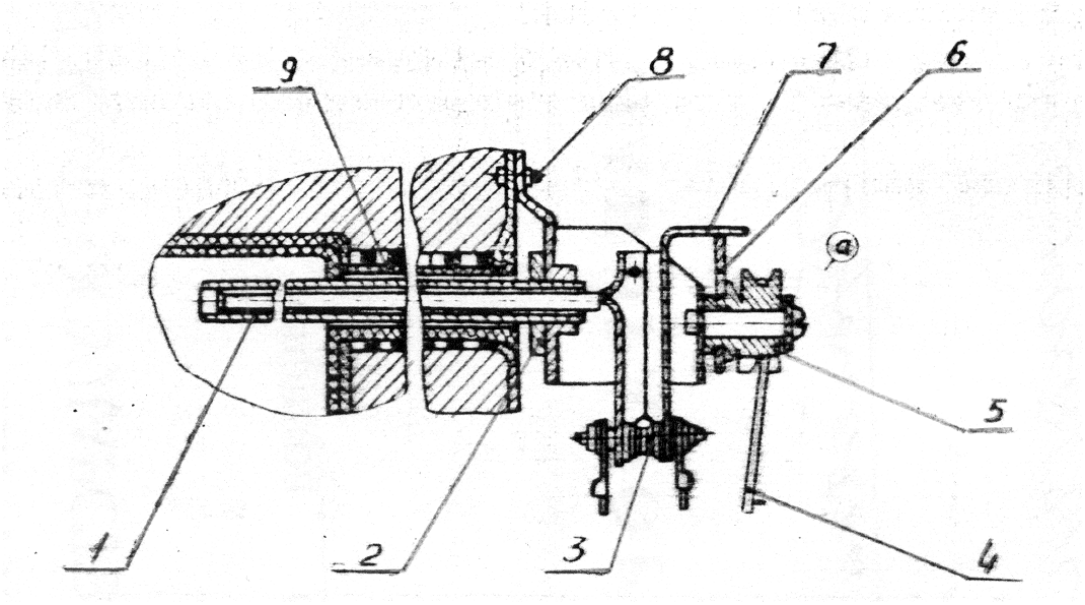


Рисунок 3.27 – Терморегулятор: 1 – трубка; 2 – контргайка; 3 – контакти; 4 – канат; 5 – шків; 6 – ексцентрик; 7 – важіль; 8 – гвинт; 9 – втулка керамічна.

До роботи з електропіччю допускається тільки спеціально навчений персонал, що знає конструкцію й правила обслуговування печі, принцип дії встановленої на ній електроапаратурі й схему її живлення, а також правила безпеки при експлуатації електроустановок до 1000 В.

Перед початком роботи з електропіччю необхідно переконатися в надійності кріплення та приєднання проводів в електричному блоці, а також у

правильності підключення до мережі та контору заземлення.

3.6 Практична цінність отриманих результатів

Отримало подальший розвиток теоретичне визначення розподілу швидкостей течії металу при прямому пресуванні алюмінієвих сплавів через плоскі форкамерні матриці. Математичне моделювання плоского напружено-деформованого стану з урахуванням реологічних властивостей алюмінієвого сплаву АД31 за температурних умов пресування дозволило провести детальний аналіз розподілу швидкостей у зоні деформації. Встановлено комплексний вплив безрозмірних параметрів конструкції плоских форкамерних матриць, зокрема ступінчастих, на нерівномірність швидкостей у вихідному перерізі та характеристики вигину пресованої штаби. Серед таких параметрів – співвідношення розмірів форкамери, ексцентриситет каналу, зміщення осі форкамери відносно осі каналу та коефіцієнт витяжки.

Застосування скінченно-елементного моделювання об’ємного напружено-деформованого стану дозволило визначити основні кінематичні характеристики складного формозмінення при пресуванні тонкостінних виробів через форкамерні матриці. Виявлено залежність розподілу швидкостей витікання від положення каналу на дзеркалі матриці з урахуванням кута між елементами профілю, співвідношення товщини його елементів та геометричних розмірів форкамери.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища

На підприємстві при виробництві поковок на пресах виділяють такі шкідливі та небезпечні фактори:

1. Шкідливі хімічні речовини;
2. Виробничий пил;
3. Вібрація;
4. Шум, що виникає під час роботи обладнання;
5. Теплове випромінювання при нагріванні металу до 400-500 °С;
6. Електричний струм;
7. Рухомі та обертові деталі механізмів.

Нагрітий до 500 °С метал створює додаткові шкідливі фактори – підвищене тепло та інфрачервоне випромінювання. За цеховими вимірами інтенсивність інфрачервоного випромінювання перевищує 2000 Вт/м² і відноситься до третього класу небезпеки.

Вплив теплозбитків на організм людини. Тривала дія високої температури за підвищеної вологості може призвести до накопичення тепла в організмі та розвитку гіпертермії – стану, коли температура тіла підвищується до 38–40 °С. При цьому виникають головний біль, запаморочення, загальна слабкість, порушення сприйняття світла, сухість у роті, нудота, блювота, потовиділення. Частота пульсу та дихання збільшується, підвищується вміст залишкового азоту та молочної кислоти в крові. Можливі блідість, синюшність шкіри, розширення зіниць, судоми та втрата свідомості.

Вплив виробничого пилу на організм людини. Виробничий пил має фіброгенні властивості – він сприяє розростанню сполучної тканини в легенях,

що порушує їх нормальну структуру та функції. Такий пил може викликати професійні захворювання легень, зокрема пневмоконіози.

Вплив вібрації на організм людини. Вібрація порушує фізіологічний та функціональний стан людини. Стійкі негативні зміни називають вібраційною хворобою. Її симптоми включають головний біль, оніміння пальців, біль у кистях та передпліччях, судоми, підвищену чутливість до холоду, безсоння. Функціональні порушення проявляються у погіршенні зору, змінах роботи вестибулярного апарату, появі галюцинацій та швидкій стомлюваності.

Вплив шуму на організм людини. Шум цехового обладнання за вимірами відноситься до другого класу з рівнем 100 дБ, тоді як допустимий рівень – до 80 дБ (при частоті 1000 Гц). Шум впливає на кору головного мозку, викликаючи дратівливість, прискорює стомлення, знижує увагу та уповільнює психічні реакції.

Дія електричного струму на організм людини. В цеху електричний струм становить небезпеку, зокрема через роботу електромостових кранів при завантаженні заготівок у колодязі охолодження та вагони. Порушення правил безпеки може призвести до травм.

Струм, проходячи через тіло, чинить термічну, електролітичну та механічну дію. Безпечними вважаються змінний струм 50 Гц до 0,01 А та постійний струм до 0,05 А; смертельною є сила струму 0,1 А.

Термічна дія проявляється опіками, перегріванням судин, нервів, серця, мозку та інших органів.

Електрична дія спричиняє розпад органічних рідин, у тому числі крові, зі зміною фізико-хімічного складу.

Механічна дія струму проявляється розшаруванням і розривами тканин, ураженням м’язів, стінок судин та легеневої тканини через електродинамічний ефект і миттєве утворення пари в рідинах організму.

4.2 Заходи захисту від небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища

На підприємстві використовуються різноманітні технічні засоби для забезпечення безпеки праці:

- Захисні пристрої, які створюють бар’єр між працівником і небезпечним чинником, гарантуючи захист незалежно від правильності дій людини;
- Запобіжні пристрої для аварійних ситуацій, що автоматично відключають обладнання при виході параметрів (температури, тиску, переміщення, струму чи напруги, зусилля) за межі норми;
- Гальмівні механізми, що забезпечують швидку зупинку рухомих частин машин та устаткування;
- Блокувальні пристрої, які фіксують механізми у певному стані;
- Сигналізація (світлова, звукова, кольорова та знакова), що попереджає про настання або наявність небезпеки.

Важливим є правильний розподіл функцій між людиною та машиною для зменшення фізичного навантаження.

Для відведення зайвого тепла від металу, нагрітого до 500 °С, застосовуються аераційні ліхтарі, встановлені у фермах перекриття виробничого приміщення. На робочих постах працюють кондиціонери КД-26, що подають охолоджене повітря оператору. Також пости обладнані тепловідвідними екранами для зменшення дії тепла.

Велика кількість електроустаткування створює ризик ураження електричним струмом. Усі електродвигуни та допоміжні пристрої, що працюють під високою напругою (до 1000 В), додатково фарбуються у застережні кольори, а на небезпечних ділянках встановлюються плакати та таблички, що попереджають про електричну небезпеку.

Для зниження рівня шуму працівникам надаються засоби індивідуального захисту – навушники або “беруші”. Все обладнання монтується на віброгасні підстави, а робочі пости обладнуються звукоізоляцією.

Для запобігання травмам від рухомих деталей та механізмів встановлюються огорожі та захисні кожухи, включно з верхнім перекриттям. Кожухи повинні бути міцними, щоб витримувати удари уламків. Вони обладнуються блокуваннями, що перешкоджають включенню механізму при знятій огорожі чи кожусі. Для обслуговування механізмів передбачені містки та майданчики.

Для попередження травматизму на підприємстві існує система проходів і пішохідних зон з відповідною розміткою, покажчиками, освітленням та мостками над небезпечними ділянками, наприклад над рольгангами.

Усі працівники забезпечуються спецодягом, спецвзуттям, касками та іншими засобами індивідуального захисту, а також засобами для миття та знешкодження шкідливих речовин.

4.3 Нормування освітлення

Незадовільне освітлення ускладнює виконання робіт, знижує продуктивність праці, стомлює робочих і є причиною травматизму і захворювання очей. У прольотах ковальсько-пресового цеху, розміри яких:

- поперечний: довжина – 183 м, ширина – 54 м, висоту -11м;

- подовжній: довжина – 300 м, ширина – 48 м, висоту -11м

необхідна зорова відмінність предметів від 1 м і більш. Контраст об’єктів і форм – середній.

На підставі цих даних знаходимо освітленість для прольотів цеху. Вона повинна бути E_{min} = 50 лк. Встановлюємо освітлювальні прилади марки СЗ4ДРЛ – 400. Висота підвісу світильників – Нр = 11 м. Коефіцієнт запасу приймаємо до = 1.3.

Визначаємо показник приміщення:

$$\varphi_1 = \frac{a \cdot b}{H_p(a+b)} = \frac{300 \cdot 48}{11(300+48)} = 3.76 \approx 4; \qquad (4.1)$$

$$\varphi_2 = \frac{a \cdot ь}{H_p(a+b)} = \frac{183 \cdot 54}{11(183+54)} = 3.79 \approx 4.$$

Коефіцієнт використання освітлювальної установки при Рст = 30% і Рп= 50%, приймаємо η = 0.46, відношення L / Нр приймаємо: L / Нр = 1.6. Оптимальна відстань між світильниками буде:

$$L=1.6 \cdot 11 = 17 \text{ (м)}.$$

Але оскільки цех високий і є електромостові крани приймаємо L=10 м. Світильники розташовуємо в 4 ряди уздовж прольотів:

а. у подовжньому прольоті 300/10 = 30 шт, всього 120 світильників (СЗ4ДРЛ – 400) ;

би. у поперечному прольоті 183/10 ≈ 18 шт, всього 72 світильники (СЗ4ДРЛ – 400) ;

Загальна кількість світильників - 192 шт.

Знаходимо світловий потік для однієї лампи:

$$F_{Л} = \frac{E_{\min} \cdot S \cdot k}{\eta \cdot n}, лм \qquad (4.2)$$

де S - освітлена площа;

n - кількість світильників.

Подовжній проліт:

$$F_{л.прод} = \frac{50 \cdot (300 \cdot 48) \cdot 1.3}{0.46 \cdot 120} = 16.956 лм.$$

Поперечний проліт:

$$F_{л.у} = \frac{50 \cdot (183 \cdot 48) \cdot 1.3}{0.46 \cdot 72} = 17.239 л.м.$$

Для обох прольотів приймаємо лампу ДРЛ400 потужністю 400Вт і світловим потоком F = 19000 лм . Тоді освітленість прольотів буде:

подовжній проліт:

$$E = E_{\min} \frac{19000}{16.956} = 56 лк;$$

поперечний проліт:

$$E = E_{\min} \frac{19000}{17.239} = 55 лк.$$

В результаті розрахунку набуте значення освітленості, що відповідає вимогам освітленості, не нижче встановлених норм, і що забезпечують достатню рівномірність і постійність рівня освітленості у виробничому приміщенні.

ВИСНОВОК

Огляд літературних джерел свідчить, що сучасні методи розрахунку пресового інструменту та технології виробництва спеціальних профілів з алюмінієвих і магнієвих сплавів не повною мірою задовольняють потреби пресової промисловості. Основною причиною є недостатнє забезпечення показників якості готової продукції, що обмежує ефективне застосування процесу гарячого прямого пресування та робить проблематику, розглянуту в роботі, актуальною та перспективною для досліджень.

Експериментальні дослідження нерівномірності деформації при багато-канальному пресуванні за різних температур нагріву заготовки показали, що співвідношення швидкостей витікання тонкостінних профілів через форкамерні матриці різної глибини може бути описане квадратичною залежністю від відстані між центром ваги каналу та віссю матриці.

Встановлено, що для тонкостінних профілів при пресуванні через форкамерні матриці з високими коефіцієнтами витяжки позаконтактна пластична деформація спричиняє збільшення товщини прес-виробу порівняно з шириною каналу матриці.

Дослідження температурного режиму показали, що при пресуванні через форкамерну матрицю температура штаби на 7…26 °С перевищує показники при використанні плоскої матриці. Такий нагрів спричиняє незначне зниження механічних властивостей: границі текучості – на 3,5…5,5%, відносного видовження після розриву – на 6…10%.

Також встановлено, що застосування форкамерних матриць сприяє зменшенню глибини залягання крупнокристалічного ободка в порівнянні з плоскими матрицями. Середній розмір зерна в ободку становить 14…15 мкм, тоді як у основному металі – 22…27 мкм, що свідчить про більш однорідну структуру пресованого профілю.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Середа Б.П. Обробка металів тиском : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2005. 250 с.

2. Welo T., Abtahi S., Skauvik I. An Experimental and Numerical Investigation of the Thermo-Mechanical Conditions on the Bearing Surface of Extrusion Dies. *Proceeding of 6 International Extrusion Technology Siminar*. Chicago: Editors Express, 1996. Vol. 1. P. 101-106.

3. Hamzah H. Weld integrity on a die. Proceeding of the Seventh International Aluminium Extrusion Technology Seminar. Chicago: Editors Express, 2000. Vol. II. P. 273-275.

4. Muller K.B., Wegener J. Direct Extrusion of AA 6060 Through Dies With Coated Bearing Lengths. *Proc. of the Sixth International Aluminum Extrusion Seminar*. Chicago: Editors Express, 1996. Vol. 2. P. 147-153.

5. Devadas C., Celliers O. Metal Flow During the Extrusion Process. *Proc. of Fifth International Extrusion Technology Seminar*. Chicago: Editors Express, 1992. Vol. 1. P. 359-368.

6. Hardouin J-P. Bearing Length Calculation by Control of Metal Flow Pressure. *Proc. of Fifth International Extrusion Technology Siminar*. Chicago: Editors Express, 1992. Vol. 1. P. 291-303.

7. Sereda B., Belokon Y., Kruhliak I., Sereda D., Kruglyak D. The effects of grain size on mechanical properties of Ti-Al intermetallic alloy. *Математичне моделювання*. 2023. 1 (48). С. 88-96. https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(48)2023.280148.

8. Belokon Y ., Zholobko B., Sahuliakin O., Kalashnik S. Analysis of the thermodynamic properties of special-purpose alloys for conditions of thermochemical pressing. *Математичне моделювання*. 2024. No 1 (50). С. 146-151. https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(50)2024.305581.

9. Sheyko S., Belokon Y., Hrechanyi O., Vasilchenko T. Thermoplastic processing of structural metallic materials. Experiments, theory and modeling. Cham: Springer, 2024. 112 p. ISBN 978-3-031-73895-1. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73896-8.

10. Belokon Y., Hrechanyi O., Vasilchenko T., Krugliak D. Thermochemical pressing of special purpose materials : monograph. Riga : Baltija Publishing, 2024. 156 p. ISBN 978-9934-26-508-2. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-508-2.

11. Бєлоконь Ю. О., Чейлитко А. О., Ільїн С. В., Воденнікова О. С. Теоретичні засади термохімічного пресування матеріалів спеціального призначення: монографія. Одеса : Гельветика, 2022. 148 с. ISBN 978-617-554-085-5.

12. Бєлоконь Ю. О., Кругляк Д. О., Калашник С. М., Сагулякін О. Є., Жолобко Б. О. Експериментальні дослідження процесів термохімічного пресування матеріалів спеціального призначення : монографія. Одеса : Гельветика, 2023. 154 с. ISBN 978-617-554-173-9.

13. Sereda B., Belokon Y., Krugliak D. Kinetics modeling in thermochemical pressing of powder intermetallic alloys. *Математичне моделювання*. 2022. 2(47). С. 90–97. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(47)2022.268399.

14. Belokon Y., Sereda D., Zholobko B., Sahuliakin O., Yavtushenko A. Modeling of local plastic deformation processes under extreme operating conditions. *Математичне моделювання*. 2024. No 2 (51). С. 169-176. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(51)2024.317635.

15. Бєлоконь Ю.О., Шапуров О.О., Гречаний О.М., Проценко В.М. Технології синтезу високоентропійних сплавів: сучасний стан і майбутні напрямки. *Металургія*. 2025. № 1(2025). С. 58-70. https://doi.org/10.26661/2071-3789-2025-1-06.

16. Belokon Y., Yavtushenko A., Protsenko V., Bondarenko Y., Cheilytko A. Mathematical modeling of physical properties of anisotropic materials. *METAL 2020 - 29th International Conference on Metallurgy and Materials*. (Brno, May 20 - 22, 2020). Brno, 2020. P. 440-445.

17. Бєлоконь Ю.О. Фізичні процеси при пластичній деформації : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 179 с.

18. Середа Б. П., Бєлоконь Ю. О., Оніщенко А. М. Теорія обробки металів тиском : навч.-метод. посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 129 с.

19. Обробка металів тиском при нестаціонарних температурних умовах : монографія / Б.П.Середа, І.В.Кругляк, О.А.Жеребцов, Ю.О.Бєлоконь. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 252 с. ISBN 978-966-8462-15-3.

20. Бєлоконь К. В., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Інформаційні технології в охороні праці : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 160 с.

21. Цифрова трансформація безпеки праці у виробництві: ергономіка, виробнича санітарія та вентиляція, електро- та пожежобезпека / К. В. Бєлоконь, Є. А. Манідіна, А. В. Вагін, В. Л. Ситий // Цифрова трансформація промислового менеджменту: теорія і практика : кол. монографія / за ред.: В. Г. Воронкової, Н. Г. Метеленко. Львів ; Торунь : Liha-Pres, 2023. С. 717-799.

22. Основи охорони праці : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА всіх спец. ден. та заоч. форм навчання / К. В. Бєлоконь, В. Г. Рижков, Ю. В. Куріс, Є. А. Манідіна ; ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 180 с.

23. Манідіна Є. Забезпечення безпеки технологічних процесів та обладнання під час проєктування металургійних цехів. Формування сучасних концепцій менеджменту організацій та адміністрування в умовах цифровізації : матеріали міжнар. н.-практ. конф., присвяч. 25-річчю створення каф. менеджменту орг. та упр. проектами, 23-24 вересня 2021 року / ред.-упоряд. В. Г. Воронкова. Запоріжжя : Гельветика, 2021. С. 675-679.

24. Манідіна Є. А., Грідяєв В. В. Пожежна безпека : курс лекцій для здобувачів ступеня вищ. освіти бакалавра спец. 263 "Цив. безпека" освіт.-проф. програми "Охорона праці". Запоріжжя : ЗНУ, 2024. 313 с.