

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім Ю.М. Потебні

( назва факультету )

Кафедра Обробки металів тиском

( повна назва кафедри )

## Пояснювальна записка

до магістерської роботи

До журнату  
09.12.2021р  
[підпис]

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_

(другий (магістерський) рівень)

на тему Розробка температурно- деформаційних режимів пресування високолегованих алюмінієвих сплавів

Виконав: студент 2 курсу,

групи 8.1360-омт-д

Бутирін Микита Олегович

(ПІБ)

[підпис]  
(підпис)

спеціальності

136 Металургія

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

обробка металів тиском

(шифр і назва)

Керівник Белоконь Ю.О.

(прізвище та ініціали)

[підпис]  
(підпис)

Запоріжжя - 2021 року



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

Кафедра Обробки металів тиском

Рівень вищої освіти другий магістерський рівень  
(перший (бакалаврський) рівень, другий (магістерський) рівень)


Спеціальність 136 Металургія  
(шифр і назва)

Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма обробка металів тиском  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ОМТ

 Ю.О. Белоконь

“ 01 ” 07 2021 року

**ЗАВДАННЯ**  
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Бутирін Микита Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка температурно-деформаційних режимів пресування високолегованих алюмінієвих сплавів

керівник проекту (роботи) Белоконь Юрій Олександрович д.т.н, доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “30” 06 2021 року № 974-с

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 01.12.2021

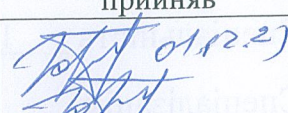
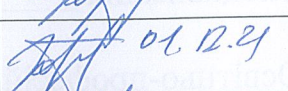
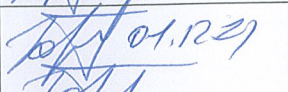
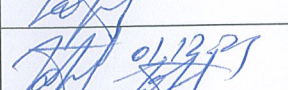
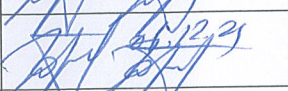
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Розробка температурно-деформаційних режимів пресування високолегованих алюмінієвих сплавів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Аналіз наукової інформації та стан проблеми, Дослідницько-розрахункова частина, Обробка і обговорення результатів досліджень, Охорона праці та техногенна безпека, Економічні аспекти проблеми, Висновки. Перелік посилань



5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Презентаційний матеріал 12 слайдах (на 12 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

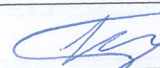
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
Аналіз наукової інформації та стан проблеми	Белоконь Ю.О., доцент	 01.12.21
Дослідницько-розрахункова частина	Белоконь Ю.О., доцент	 01.12.21
Обробка і обговорення результатів досліджень	Белоконь Ю.О., доцент	 01.12.21
Охорона праці та техногенна безпека	Белоконь Ю.О., доцент	 01.12.21
Економічні аспекти проблеми	Белоконь Ю.О., доцент	 01.12.21

7. Дата видачі завдання 01.07.2021

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	до 06.09.2021	випов.
2	Реферат	до 13.09.2021	випов.
3	Аналіз наукової інформації та стан проблеми	до 27.09.2021	випов.
4	Дослідницько-розрахункова частина	до 18.10.2021	випов.
4	Обробка і обговорення результатів досліджень	до 01.11.2021	випов.
5	Охорона праці та техногенна безпека	до 15.11.2021	випов.
6	Економічні аспекти проблеми	до 19.11.2021	випов.
7	Висновки	до 29.11.2021	випов.

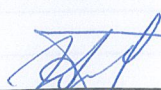
Студент

  
(підпис)

Бутирін М.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

  
(підпис)

Белоконь Ю.О.  
(прізвище та ініціали)



## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної роботи: 98 с., \_\_\_\_\_ частин  
11 таблиць, 29 джерел.

Об'єкт розробки - гідравлічний прес зусиллям 10 МН.

Метою цієї роботи є експериментальне визначення впливу відстані тонкостінного каналу від центра матриці при різних співвідношеннях розміру форкамери й температури заготівлі на нерівномірність витікання для випадку багатоканального пресування алюмінієвого сплаву.

Метод дослідження - аналітичний розрахунок із застосуванням методів математичної статистики.

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.

У розділі практична цінність розглянута своєрідність процесу пресування і характер зміни напружено-деформованого стану.

ПРЕС, ПРЕСУВАННЯ, МАТРИЦЯ, ФОРКАМЕРА, МЕТАЛ



## THE ABSTRACT

Explanatory note to final work: 98 c., \_\_\_\_\_ parts 11 tables, 29 sources.

Object of working out - a hydraulic press effort 10 MH.

Experimental definition of influence of distance of the thin-walled channel from the matrix centre at different parities of the size of the chamber and preparation temperatures on non-uniformity of the expiration for a case of multichannel pressing of aluminium alloy AA6060 is the purpose of this work.

Research reception - analytical calculation with application methods of mathematical statistics.

In work the offered mathematical dependence for definition of a parity of speeds of the expiration of metal at multichannel pressing of thin-walled profiles also is experimentally confirmed possibility of its use.

In section metall researches studied structure and phase composition of aluminium alloys.

In section practical value process of pressing and character of change of the is intense-deformed camp is considered.

PRESS, PRESSING, A MATRIX, METAL



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА СТАН ПРОБЛЕМИ.....	10
1.1 Загальні положення процесу пресування металу .....	10
1.2 Аналіз вимог стандартів до пресованих профілів і причини їхнього невиконання .....	13
1.3 Особливості гарячого пресування профілів із прямим витіканням .....	17
1.4 Аналіз розвитку сучасної науки і техніки щодо питань моделювання процесу пресування .....	23
2 ДОСЛІДНИЦЬКО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА .....	29
2.1 Задачі дослідження .....	29
2.2 Регресійне математичне моделювання .....	32
2.3 Дослідження спільного впливу геометричних параметрів інструмента на кінематику витікання металу при пресуванні .....	35
2.4 Математичне моделювання течії металу при об'ємному напружено-деформованому стані .....	39
3 ОБРОБКА І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	49
3.1 Результати математичного планування .....	49
3.2 Вплив технологічних факторів процесу на розміри поперечного перерізу тонкостінних прес-виробів .....	54
3.3 Структура та фазовий склад досліджуваних металів і сплавів .....	62
3.4 Режими термічної обробки сплавів .....	72
3.5 Нагрівальний пристрій .....	78
3.6 Практична цінність отриманих результатів .....	83
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА .....	84



4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища .....	84
4.2 Заходи захисту від небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища .....	86
4.3 Нормування освітлення .....	88
5 ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ПРОБЛЕМИ.....	91
5.1 Економічні аспекти дослідницької проблеми .....	91
5.2 Розрахунок економічного ефекту .....	93
ВИСНОВКИ.....	95
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	96



## ВСТУП

Протягом останнього десятиріччя кількість пресових ліній для виробництва профілів з алюмінієвих сплавів зросла в Україні з 5 до 15. В останній час зростає потреба у виготовленні пресованих напівфабрикатів, що використовуються для виготовлення спеціальних виробів для транспортного машинобудування (залізничного і автомобільного), хімічної промисловості, холодильного устаткування та медицини. Прикладами таких напівфабрикатів із алюмінієвих сплавів є комбіновані суцільні і порожнисті теплоізолюючі профілі складного поперечного перерізу, довгомірні (понад 1 км) тонкостінні труби малого діаметру в бухтах, товстостінні труби для гвинтового оребріння; з магнієвих сплавів – капілярні труби для стентів, що використовуються в судинній хірургії, порожнисті профілі для кісткових імплантатів, які розчиняються в біосередовищі, тонкостінні труби для гідроформовки, а також вироби великого поперечного перерізу з дрібнозернистою структурою для подальшої обробки тиском і різанням. Такі прес-вироби можуть бути виготовлені на існуючих в Україні горизонтальних гідравлічних пресах з прямим витіканням металу. Вимога зниження ваги й ціни прес-виробів передбачає пресування профілів із зниженими товщинами стінок і в звуженому полі їх допустимих відхилень.

Для гарячого прямого пресування без змащення характерна велика нерівномірність деформації по об'єму металу, що пресується. Це може привести до порушення геометрії профілю внаслідок нерівномірного розподілу швидкостей по периметру каналу. Виготовлення перемінної по периметру каналу довжини калібруючого паска дозволяє компенсувати вказану особливість процесу, однак відомі формули для розрахунку довжини паска ґрунтуються лише на геометричних принципах і отримані для плоских матриць. В той же час сьогодні найбільш широко застосовується пресування алюмінієвих сплавів в режимі "заготовка за заготовкою" з великими

коефіцієнтами витяжки та використанням форкамерних матриць і комбінованих матриць з плоским розсікачем. Відомі формули для визначення розмірів форкамери і зварювальної камери отримані у зв'язку з окремими параметрами конструкції матриці. До того ж існуючі методи розрахунку пресового інструменту не враховують комплексний вплив на точність профілів таких технологічних факторів, як переднє натягіння, позаконтактна пластична деформація, пружна деформація інструменту, його знос та ін. Крім того, можливості розрахунку інструменту та сили пресування обмежені через відсутність відомостей про реологічні властивості сплавів системи Mg-Ca та їх недостатній об'єм в температурно-швидкісному діапазоні, характерному для пресування сплаву AA6060, що може привести до суттєвого зниження точності прес-виробів і продуктивності процесу.

Споживачі ставлять високі вимоги до пластичності, якості та чистоти поверхні прес-виробів, регламентують глибину залягання грубокристалічного ободка, розмір зерна тощо. Відомі рекомендації дають дуже широкий температурно-швидкісний діапазон обробки вказаних виробів і без зв'язку з іншими важливими технологічними факторами й параметрами конструкції інструменту. Це потребує визначення раціональних деформаційних і температурно-швидкісних режимів пресування, які забезпечують досягнення високих показників якості спеціальних профілів з алюмінієвих і магнієвих сплавів.



# 1 АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА СТАН ПРОБЛЕМИ

## 1.1. Загальні положення процесу пресування металу

Пресування являє собою один зі способів обробки металів тиском, що полягає у видавлюванні металу із замкнутої області контейнера через отвір матриці, що відповідає перетину профілю, що видавлює (рис. 1.1).

Заготівля 2 (у холодному або гарячому стані), поміщена в контейнер 1, видавлюється пуансоном 4 через отвір матриці 3, утворює виріб 5. Вихідною заготівлею для пресування є або злиток, або прокат круглого, а іноді навіть квадратного перетину.

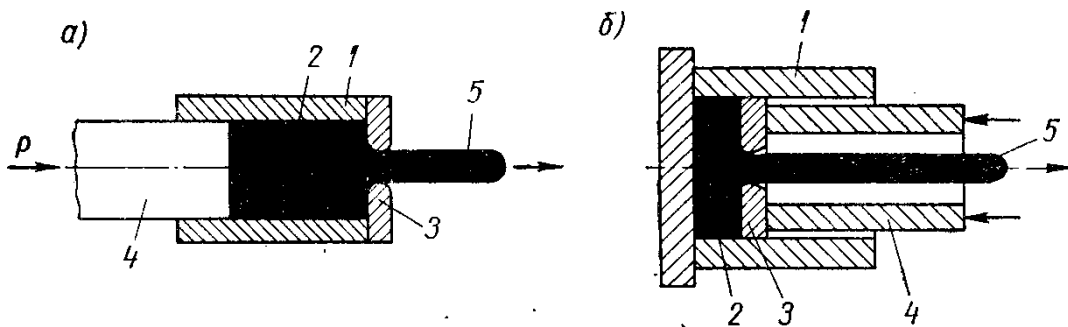


Рисунок 1.1 - Схеми прямого (а) і зворотного (б) методів пресування

Гарячим пресуванням виготовляється різноманітний сортамент виробів з кольорових металів і сплавів, що включає прутки діаметром від 3 до 250 мм, труби діаметром від 20 до 400 мм із товщиною стінки від 1,5 до 12 мм. Точність пресованих виробів виходить більш високою, ніж при прокатці, що дає можливість звести до мінімуму наступну холодну обробку заготівлі. Виготовлення пресуванням складних профілів є більше економічним, ніж вилівок або штампування їх з наступною механічною обробкою.

Пресуванням можуть виготовлятися профілі такої складної форми, що не може бути отримана іншим способом обробки металів тиском. При виготовленні з кольорових металів труб діаметром менш 50 мм спосіб

пресування є більше економічним, ніж прокатка, і незамінним при виготовленні труб діаметром менш 20-30 мм.

Тому що пресування протікає в умовах схеми всебічного нерівномірного стиску, те деформований метал придбав високу пластичність. Ця обставина дає можливість пресувати мідь, всі мідно-цинкові сплави (латуні, томпаки й томпаки), мідно-нікелеві сплави (мельхіору й нейзильбери), алюмінієві бронзи різного складу, олов'яні бронзи алюміній і його сплави, магнієві сплави, цинкові сплави.

Останнім часом пресуванням успішно обробляють багато спеціальних сталей, титанові сплави й інші малопластичні метали, що є одним з основних переваг пресування перед іншими способами обробки металів тиском. Пресування відрізняється більшою гнучкістю процесу при одержанні різних профілів, ніж інші методи обробки тиском. Замінивши деталі робочого інструмента (матрицю при пресування прутків або матрицю й оправлення при пресуванні труб), можна легко перейти від виготовлення одного профілю (виробу) до іншого.

При цьому зміна інструмента при пресуванні значно простіше зміни валків при прокатці. Завдяки цьому дрібні серії профілів більш економічно виготовляти пресуванням, ніж прокаткою. Пресування здійснюється головним чином по двох методах - прямому й зворотному.

Прямий метод (рис. 1.1, а) застосовується для виготовлення т прутків, профілів і полягає в тім, що плин металу через отвір матриці й рух пуансона, що давить на заготівлю, відбуваються в одному напрямку.

Зворотний метод (рис. 1.1, б) застосовується для приготуванню прутків, профілів, іноді для виготовлення труб великого діаметра й характеризується тим, що плин металу й рух пуансона з матрицею відбуваються у зворотних напрямках тобто назустріч один одному. Тому що при прямому методі пресування заготівля переміщається усередині контейнера, а при зворотному - залишається нерухомою, то в другому випадку внаслідок зменшення тертя зусилля пресування менше.



Пресування виробів з алюмінієвих і магнієвих сплавів класифікується по типі одержуваних виробів, напрямку витікання металу, умовам контактної взаємодії й температурних умов [1].

По типі прес-виробу розділяються на профілі, труби й прутки. Вимоги до деяких видів профілів (куточок, швелер, зетовий профіль і ін.) і безшовним трубам регламентуються окремими стандартами. Однак, більшість вироблених сьогодні на пресових лініях виробів ставляться до терміна профілі, які, у свою чергу, діляться на суцільні, напівзамкнуті й порожні. Профілі характеризуються досить більшим відношенням діаметра описаної окружності до товщини стінки елемента профілю - до 40 і більше.

Надалі будемо розглядати в основному профілі й труби з поздовжнім звареним швом, пресуємі через комбіновані матриці із плоским розсікачем. Вимоги до них відповідно до різних українських і міжнародних стандартів описані в роботах [2] і розглянуті в підрозділі 1.2.

По напрямку витікання й умовам контактної взаємодії виділяють такі види пресування: пряме (у тому числі в режимі "заготівля за заготівлею"); зворотне, з активною дією сил тертя, з бічним витіканням (у т.ч. рівноканальне кутове) і гідропресування. Пряме пресування можна вести зі змащенням, однак, як правило, для забезпечення кращої якості зовнішньої поверхні при виробництві профілів з алюмінієвих і магнієвих сплавів її не використовують.

По температурних умовах існують різні критерії для класифікації процесу. Найбільш простий і розповсюджений - по гомологічній температурі [3]. Відповідно до цього критерію розглянуті нижче процеси ставляться до гарячої деформації: температура металу вище 0,7 температури плавлення (у градусах Кельвіна).

На промислових підприємствах України використовується тільки пряме гаряче пресування прутків, профілів і труб з поздовжнім звареним швом. Прутки займають лише малу частку загального виробництва прес-виробів і процес їхнього пресування досить добре вивчений. Тому надалі в дисертації основна увага буде приділено питанням пресування профілів, і додатково

будуть вивчатися інші процеси (пресування труб малого діаметра на довгому оправленні, а також рівнокутове пресування), легко реалізовані на наявному в Україні встаткуванні.

На сьогоднішній день в Україні профілі з алюмінієвих сплавів роблять ЗАТ "Донецький завод алюмінієвих профілів" (м. Донецьк), "Київський завод алюмінієвих будівельних конструкцій" (м. Бровари), ЗАТ "Дніпровський завод "АЛЮМАШ" (м. Дніпропетровськ), ВАТ "Завод "Эфкон" (м. Київ), ТОВ "ФРУНЗЕ-ПРОФІЛЬ" (м. Суми), НП "Профільні системи" (м. Київ) і ВАТ "Запорізький виробничий алюмінієвий комбінат" (м. Запоріжжя) і ін. Заводи оснащені горизонтальними гідравлічними пресами зусиллям від 3,2 до 25 МН, причому все – тільки прутково-профільні із прямим витіканням. Число пресових ліній за останні 10 років виросло з 5 [4] до 15. Більша (до 90%) частина їхньої продукції - тонкостінні профілі зі сплаву АД31 для конструкцій, що обгороджують (вікон, дверей і т.п.), застосовуваних в основному в будівництві; також випускаються труби й профілі підвищеної точності для машинобудування.

## **1.2. Аналіз вимог стандартів до пресованих профілів і причини їхнього невиконання**

До основних стандартів, по яких випускають прес-вироби українські виробники ставляться ГОСТ 8617-81, EN 755-9 (уведений замість DIN 1748), EN 755-8, EN 755-2, ДСТУ Б В.2.6-3-95 (ГОСТ 2223393) і DIN 17615. Перші п'ять стандартів ставляться до виробів з різних алюмінієвих сплавів, а останні три - до профілів зі сплаву АД31 або подібних йому по хімічному складі й відрізняються більше твердими вимогами по граничних відхиленнях геометричних розмірів і якості поверхні.

До розмірів профілів ще на етапі конструювання профілю пред'являються вимоги, пов'язані з обмеженнями, які можуть виникнути через неможливість отпресувати профіль необхідної якості або труднощами при виготовленні інструмента. Зокрема, DIN 1748 регулює мінімальні значення товщини стінки й



мінімальну масу профілю, величину округлень між елементами поперечного перерізу й допускається співвідношення, що, між геометричними розмірами порожнин суцільних, напівзамкнутих і порожніх профілів. Деякі із цих вимог висуває й ДСТУ Б В.2.6-3-95.

З іншого боку, споживач прагне наскільки можливо зменшити товщину стінки  $s$  і масу профілю. Так сьогодні нормальною промисловою практикою є пресування суцільних профілів з  $s=1,2...1...1,5$  мм при діаметрі описаної окружності  $D_{оп}=50...80...80$  мм, тоді як по ДСТУ Б В.2.6-3-95  $s_{min}=1,7$  мм, (по DIN 1748 – 1,5 мм); аналогічним образом для порожніх профілів при тім же  $D_{оп}$   $s_{min}=2$  мм, тоді як на практиці пресують профілі з  $s_{min}=1,5$  мм і нижче. Очевидно, із цієї причини в EN 755 мінімальна товщина стінки не регламентується.

Всі стандарти регламентують граничні відхилення поперечних розмірів перетину профілю: лінійних і кутових розмірів, радіусів закруглення, поперечної кривизни.

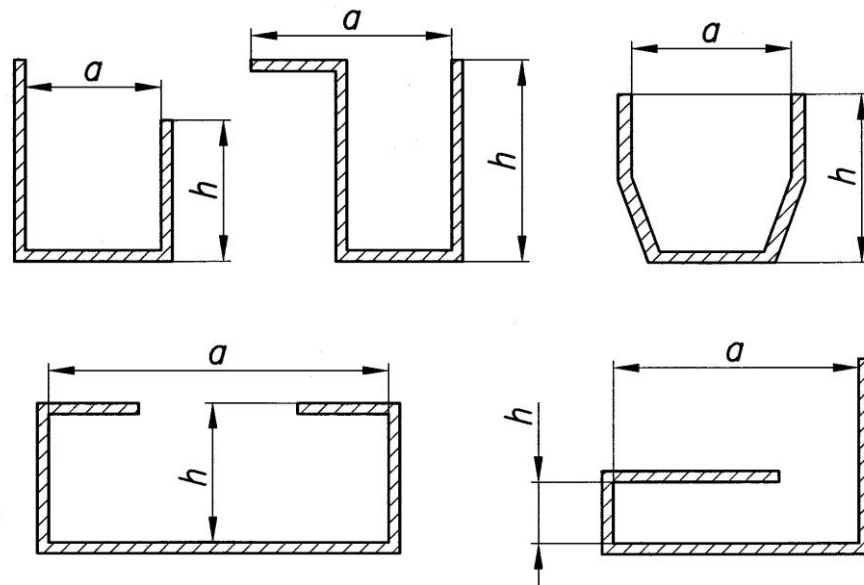


Рисунок 1.2 - Характеристики профілей П- и С-образного типу

Найважливішим параметром, що визначає реальну масу погонного метра профілю, є товщина стінки. Найбільш тверді вимоги до профілів підвищеної точності по ДСТУ Б В.2.6-3-95 передбачають відхилення  $s\pm 10\%$ , але не більше

1,2 мм. Таким чином, маса погонного метра профілю може коливатися майже в тих же межах - порядку 20%. Вимоги DIN 17615 перебувають приблизно на тім же рівні, а EN 755-9 припускають можливість ще більших відхилень. У собівартості профілю до 70% займає ціна заготівлі, тому вартість погонного метра профілю може змінюватися в межах 10-15% залежно від його точності профілю й зношування матриці при експлуатації.

Точність розмірів монолітного металу (ширини елементів профілю) забезпечується при пресуванні досить легко. Набагато більш складно досягти точності розміру "a" у швелерах і інших профілях П-П- і З-образного типу (рис. 1.2). Цей розмір важливий, тому що звичайно саме він визначає точність складання з іншими профілями або виробами – наприклад, як у парі рамний профіль – штапик у віконних системах.

У той же час, неправильний розрахунок параметрів конструкції матриці приводить у першу чергу до зміни розмірів саме цього типу. Наприклад, у П-Образному профілі, якщо метал полиць профілю прагнути придбати більшу швидкість, профіль "розкриється", розмір "a" перевищить припустимий. Цей дефект може бути виправлений наступним виправленням розтяганням, але при занадто великій деформації подовження на поверхні профілю може з'явитися "апельсинова кірка", а товщина стінки зменшиться нижче припустимого значення. Якщо ж, навпаки, швидкість полиць нижче, ніж стінки, і профіль "закритий", цей дефект уже не може бути виправлений виправленням розтяганням.

Згідно ДСТУ Б В.2.6-3-95 припустима поперечна кривизна полиць ширини  $b$  підвищеної точності 1%  $b$ , особливої точності 0,5%. Причина виникнення цього дефекту - гальмування металу в тупиках і кутах профілю. У першому наближенні можна вважати, що поперечна кривизна пропорційна різниці швидкостей витікання в середині й на краю полиці. Найбільш актуальна ця проблема на панелях і широких полках порожніх профілів.

Стандарти також регламентують поздовжнє відхилення від прямолінійності й кут скручування навколо поздовжньої осі. Перше дорівнює 1

мм на 1 м довжини профілю для профілів підвищеної точності й 0,5 мм/м – особою точності; кут скручування – 1,5 і 1 °/м, відповідно. До цих дефектів приводить неузгодженість швидкостей витікання по окремих елементах профілю.

Більшість дефектів поверхні (неметалічні включення, корозійні плями, раковини, механічні ушкодження й т.п.) профілів не ставляться безпосередньо до процесу пресування. Поява міхурів обумовлена точністю настроювання встаткування й культурою виробництва. Відповідно до ГОСТу 8617-81 допускається крупнокристалічний ободок (ККО) по периметрі, якщо глибина його залягання не перевищує 5 мм.

Варто враховувати, що наявність ККО може привести до зниження механічних властивостей нижче вимог стандартів. Розмір зерна стандартами, як правило, не регламентується. Більше важливим є досягнення необхідної міцності й пластичності. Незважаючи на те, що вимоги стандартів до рівня відносного подовження  $\delta_5$  можуть бути легко досягнуті в промисловій практиці (наприклад 20% за ДСТ 8617 для АД0 або 23% для сплаву 1050 по EN 755-2), споживач часто висуває вимоги до  $\delta_5$  на 50% вище зазначених стандарті. Це особливо стосується труб, що піддаються наступній роздачі, розвальцьовуванню та ін. (наприклад, для зазначених вище сплавів - не менш 30%).

Таким чином, що існують стандарти припускають широкий спектр вимог до профілів по точності геометричних розмірів, якості поверхні, механічним властивостям і структурі металу прес-виробів. Споживачі, як правило, пред'являють більше тверді вимоги, які відбиваються в технічних умовах. Наприклад, необхідно, щоб труби  $\varnothing 8...10...10$  мм і  $s=1...1...1,25$  мм для холодильної техніки мали відхилення по зовнішньому діаметрі  ${}^0_{-0,15}$  мм, по товщині стінки  $\pm 0,1$  мм, тоді як EN 755-8 припускає припустимі відхилення  $\pm 0,25$  мм і  $\pm 0,20$  мм відповідно. Труби повинні витримувати випробування на роздачу оправленням з кутом конусності 60( до збільшення зовнішнього



діаметра на 40%, а також пневматичне випробування на герметичність. Поздовжніх рисок повинне бути не більше двох на 10 мм периметра глибиною не більше 0,040 напівтемний. Крім того, пред'являються вимоги по забрудненню внутрішньої поверхні труб, середньому розміру зерна й відсутності крупнокристалічна структура.

Виконанню вимог стандартів і технічних умов перешкоджають неправильний вибір конструктивних параметрів пресового інструмента й технологічних параметрів процесу пресування.

### **1.3. Особливості гарячого пресування профілів із прямим витіканням**

Пресування із прямим витіканням – один із самих старих способів обробки металів тиском з більш ніж столітньою історією. Розвитку теорії й технології цього процесу присвячені роботи радянських вчених М.С. Гильденгорна, С.І. Губкіна, М.З. Ерманка, В.В. Жолобова, Г.І. Зверева, І.Л. Перлина, Л.В. Прозорова, Л.Х. Райтбарга, В.Н. Щерби, а також закордонних дослідників – таких як R. Akeret, A. Ames, M. Bauser, K. Muller, P.K. Saha, H. Valberg та ін.

Процесу гарячого пресування алюмінієвих сплавів властиві дві основні особливості, що роблять протилежний вплив на характер плину металу[5].

1. Висока адгезія пресуємих сплавів до матеріалу інструмента обумовлює значні напруги контактної тертя, що наближаються до величини максимально, що зрушує напруги (границі текучості на зрушення). Це викликає більші розходження між величинами зсувних деформацій у периферійних і центральних шарах заготовлі й приводить до підвищення нерівномірності деформації в порівнянні із пресуванням металів і сплавів, що характеризуються меншою адгезією до матеріалу інструмента.

2. Відносно невисокі температури деформації алюмінієвих сплавів дозволяють забезпечити невеликі перепади температури нагрівання заготівлі й інструмента. Це в сполученні з високими теплоємністю й теплопровідністю пресуємих сплавів дозволяє зменшити градієнт температурного поля по перетині й довжині заготівлі й у такий спосіб знизити нерівномірність деформації в порівнянні із пресуванням інших металів і сплавів, у яких розходження в температурі нагрівання заготівель і інструмента більше істотні (мідні й титанові сплави, сталі).

Пресування із прямим витіканням має ряд кінематичних і деформаційних особливостей, що відрізняють його від інших різновидів процесу [6].

1. Сили тертя між заготівлею й контейнером загальмовують рух периферійних шарів металу при переміщенні прес-штемпеля. Ці шари осаджуються, коротшаючи в поздовжньому напрямку й, уширяясь у поперечному - до осі заготівлі (розширенню в протилежному напрямку перешкоджають стінки контейнера). Найбільше розширення периферійних шарів спостерігається в частині заготівлі, що прилягає до прес-шайби, оскільки тут діють максимальні осьові напруги, що зростають у міру збільшення довжини контакту заготівлі з контейнером і значень напруги тертя. Це приводить до утворення загальмованої ("мертвої") зони металу в кутах сполучення контейнера й матриці (рис. 1.3).

2. Стала стадія процесу відсутній. Деформація й периферійних, і центральних шарів по ходу процесу пресування постійно наростає. Це обумовлює розходження механічних властивостей по перетині й по довжині відпресованого профілю.

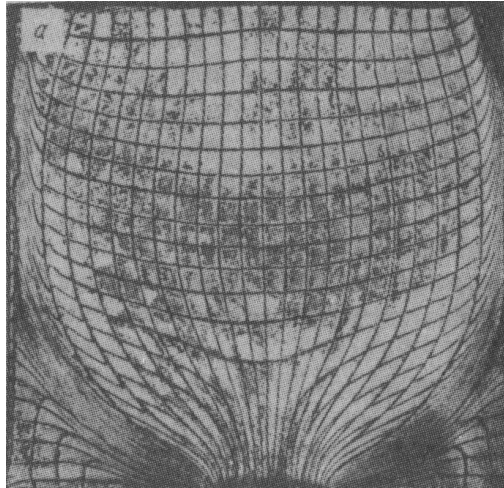


Рисунок 1.3 - Характер течії металу в контейнері при прямому пресуванні алюмінієвого сплаву

3. Більші сили тертя на контакті заготівлі з контейнером і металом загальмованої зони утрудняють витікання тонких периферійних шарів заготівлі в канал матриці, що сприяє одержанню високоякісної поверхні прес-виробів. Це особливо важливо при виробництві профілів, що піддаються не після пресування механічній обробці.

У роботі [7] вказано, що незалежно від форми матриці поверхні пружних (мертвих) зон мають опуклість спрямовану до місця сполучення контейнера й матриці. Ці поверхні обмежують так звану частину, що обжимає, пластичної зони (ОЧПЗ). Існують різні думки із приводу величини кута щодо осі матриці, що характеризує нахил границі між мертвою зоною й ОЧПЗ. За даними Ю.П. Глебова (див. [8]) "середньозважена" величина цього кута у звичайних умовах пресування ( $\mu \geq 10$ ) близька до  $60^\circ$ . По даним [9] її варто приймати рівним  $45^\circ$ . По дослідженнях С.Н. Тарантова (див. [10]) цей кут зростає при збільшенні коефіцієнта витяжки й становить для випадку пресування дюралюмінію без змащення при коефіцієнті витяжки  $\mu=4$  –  $35^\circ$ , при  $\mu=20$  –  $70^\circ$  і при  $\mu=40$  –  $80^\circ$ . Підвищення питомих сил тертя приводить до збільшення пружної зони [11]. Крім того, по ходу процесу величина мертвої зони міняється (див. рис. 1.3).

У роботі [Ошибка! Закладка не определена.] на основі аналізу макроструктури прес-залишків при пресуванні через комбіновані матриці

зроблений вивід про відсутність яких-небудь принципових особливостей у характері плинину металу (крім поділу на потоки і їхнє наступне зварювання) у порівнянні із плинном при пресуванні суцільного профілю. Щодо плинину при пресуванні в комбіновану матрицю із плоским рассекателем відзначено, що до входу металу у зварювальну камеру воно аналогічно плинину при пресуванні круглих прутків у многоканальную матрицю. Цю точку зору розділяють і німецькі автори [**Ошибка! Закладка не определена.**] (рис. 1.4).

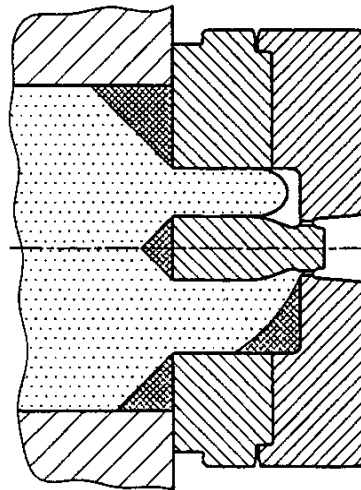


Рисунок 1.4 - Утворення мертвих зон на плоском рассекачі комбінованої матриці

Однак з експериментальних даних, отриманих Ф.В. Журавльовим і Л.С. Скобловим і наведених у роботі треба, що наявність виступаючого рассекателя істотно змінює характер плинину металу – внаслідок інтенсивного плинину, металу в радіальному напрямку відбувається впровадження периферійних шарів заготівлі у внутрішні шари і їхнє затікання у зварювальну зону, а потім у прес-виріб. Через це для забезпечення надійного зварювання шва й належної якості поверхні профілю необхідне ретельне очищення поверхні заготівлі при підготовці її до пресування й пресування потрібно вести з досить більшим прес-залишком. Цей недолік, поряд з іншими обумовив відхід від застосування таких матриць. Далі в роботі розглядаємо тільки комбіновані матриці із плоским рассекателем, які дають



можливість стійкого здійснення пресування в режимі " заготівля-за-заготівлю".

Основною загальною особливістю пресування суцільних профілів складної форми із круглих заготівель є виникнення додаткових у порівнянні із круглими прес-виробами деформацій і напруг, що приводять до перекручування форми профілю, а в деяких випадках навіть до появи тріщин на його поверхні. Виникнення таких дефектів пояснюється наявністю наступних, практично неминучих причин [Ошибка! Закладка не определена.].

1. Порушення геометричної подоби початкових і кінцевого поперечних перерізів.

2. Збільшення нерівномірності температури й напруги плинності по поперечних перерізах частини, що обжимає, пластичної зони внаслідок порушення геометричної подоби поперечних перерізів і зміни величини й форми пластичної зони.

3. Відсутність симетрії поперечного перерізу.

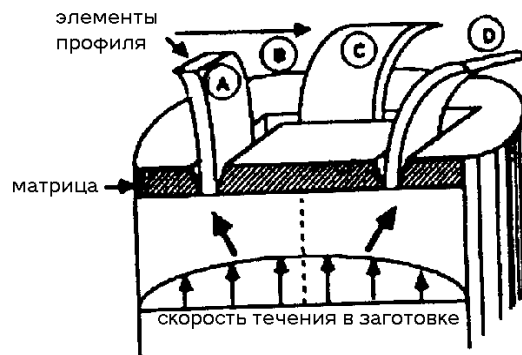


Рисунок 1.5 - Вплив нерівномірності деформації на «поділянкову» теченію металу П-образного профілю

За винятком круглого, у всіх профілів траєкторії плинуну елементарних часток неоднакові, що також свідчить про додаткові деформації. Збільшення нерівномірності деформацій і напруг викликає зміна швидкостей плинуну в окремих ділянках частини, що обжимає, пластичної зони, що приводить до жолоблення прес-виробів і навіть розривів на його окремих ділянках [8]. На

рис. 1.5 схематично показаний вплив нерівномірності деформацій на "поділянкове" плин металу на прикладі пресування розбитого на елементи П-Образного профілю.

Для зменшення виникаючих додаткових напруг і поліпшення процесу витікання необхідно максимально можливе зменшення осьової асиметрії деформацій і нерівномірності витікання пресуємого металу. Перше досягається максимально можливим наближенням форми поперечного перерізу заготівлі до поперечного перерізу пресуємого профілю – так, наприклад, пресування панелей здійснюють із прямокутного контейнера. Для виконання другої умови необхідно забезпечити прямолінійність і рівномірність пластичного витікання пресуємого металу з каналу матриці по кожному з його елементів. Для цього необхідно компенсувати різницю у швидкостях витікання, що прагнуть придбати елементи профілю ще на стадії проектування матриці. Оптимізації конструкції матриці присвячено багато робіт і питання цей розглянуте нижче.

Відхилення геометричних розмірів, яких не вдалося уникнути на стадії проектування матриці, у багатьох випадках дозволяє усунути виправлення (на лініях для пресування профілів - виправлення розтяганням). Однак вирівнювання профілю по довжині часто веде до виходу з поля допуску значень товщини стінки, кутів між елементами профілю й збільшенню шорсткості поверхні.

Навіть якщо геометричні характеристики готового профілю перебувають у межах припустимих відхилень, нерівномірність деформації при пресуванні може привести до істотної різниці в структурі металу, що відбивається на механічних властивостях профілів і їхньої корозійної стійкості.

На сучасних пресових лініях у лінії преса встановлені спрейери й вентилятори для охолодження й загартування профілів. Загартування в лінії преса й термообробка в цілому як засіб одержання заданих механічних властивостей розглянуті нижче. Охолодження на виході із преса може проводитися так, щоб знизити залишкові напруги, що приводять до жолоблення профілів. Для цього, наприклад, розроблена система BICS, у якій охолодження

регулюється з різних сторін профілю відповідно до товщини елементів і формою профілю з використанням бази даних для відомого сортаменту преса.

Таким чином, нерівномірність деформації, властивому процесу прямого пресування приводить до відхилення розмірів профілю від заданих, а також до невиконання вимог по механічних властивостях і структурі металу прес-виробів. Одержання необхідної геометрії профілю досягають, як правило, на етапі проектування матриці і її коректувань, вимоги по властивостях і структурі виконують, регулюючи технологічні параметри процесу. Розглянемо докладніше принципи проектування інструмента й вплив параметрів процесу пресування на якість прес-виробів.

#### **1.4. Аналіз розвитку сучасної науки і техніки щодо питань моделювання процесу пресування**

Комп'ютерні програми, що дозволяють проводити моделювання процесів пресування, можна підрозділяти на двовимірні (осесиметричне й плоскі) і об'ємні (тривимірні). Ці програми можуть бути спеціалізованими й призначеними винятково для розрахунку параметрів процесу пресування або універсальними. Більшість теоретичних рішень, що з'являються останнім часом у літературі, отримані з використанням універсальних програм. Зупинимося на деякі з них.

Автори [5] за допомогою FORGE2 досліджували механізм тертя на прикладі пресування прутка зі сплаву AA2024. Зроблено виводи про те, що:

- 1) представляється адекватним завдання прилипання на контактні металу з контейнером (показник тертя дорівнює 1),
- 2) необхідно ввести фактор, що коректує температурні умови на контактних поверхнях;
- 3) перекручування, що виникають на контактні металу з контейнером, локалізуються у вузькій (100...300мкм) зоні.

Аналіз розподілу деформацій по перетині контейнера з використанням FORGE2 дозволив авторам [6] зробити вивід про те, що застосування пружно-

пластичної й грузлої-пластичної моделі середовища дають практично однакові результати при обчисленні сили пресування, але при цьому друга значно прискорює процес розрахунку.

Та ж програма використовується в [6] для моделювання еволюції поверхневих складок при різних температурах і швидкостях пресування.

Відзначимо недолік FORGE2 - фізично неможливе накладення ("наїзд") трикутного елемента на зовнішні кути інструмента, наприклад, на крайку паска. Крім того, двовимірне завдання природно не дозволяє моделювати особливості об'ємної формозміни металу.

Є приклад [7] використання пакета FORGE2 при розрахунках нормальних і дотичних напружень виникаючих у комбінованій матриці з метою подальшого використанні при розрахунку напруг, що виникають у матриці. Розглядалися перетини містка (плоске завдання) і живильного каналу розсікач – так званого "вікна" (плоска й осесиметрична завдання). Розрахунки показали, що для розглянутого профілю (прямокутної труби  $72,5 \times 20 \times 1,4$  мм), пресуємої з коефіцієнтом витяжки 73, що стискають нормальні напруги максимальні на торці розсікача (430 МПа), на вихідній поверхні містка становлять 346 МПа, на дні матриці – 370 МПа, а дотичні напруження були максимальні на робочому паску – 38 МПа. Розподіл напруг і деформацій у пресуємом металі в [8] на жаль не наведено.

З використанням DEFORM 3D в [9] також розглянутий важливе питання про співвідношення швидкостей витікання металу із двох однакових каналів з різними форкамерами. Показано як впливає різниця в умовних кутах форкамер на співвідношення швидкостей витікання (рис. 1.6a). Однак, автори [10] варіювали кут форкамери, одночасно міняючи і її глибину й ширину. До недоліків описаного ними чисельного експерименту також варто віднести те, що відстань між стінками сусідніх форкамер бути менше відстані від каналу до стінки матриці, а також те, що коефіцієнт витяжки був малий ( $\mu=5$ ), що не характерно для пресування алюмінієвих профілів. Теза авторів про істотний вплив обсягу форкамери на відміну від умовного кута форкамери, може бути



покритувають, тому що різниця швидкостей витікання, при зміні різниці обсягу однієї із двох сусідніх форкамер у діапазоні від 1 до 3,5, склала від 3 до 15%, тоді як коливання цієї величини мали той же порядок (рис. 1.6б). Інтерес представляють спроби авторів оцінити вплив кількості щаблів у східчастій матриці, однак щабля мали однаковий умовний кут, причому малий - порядку 45.

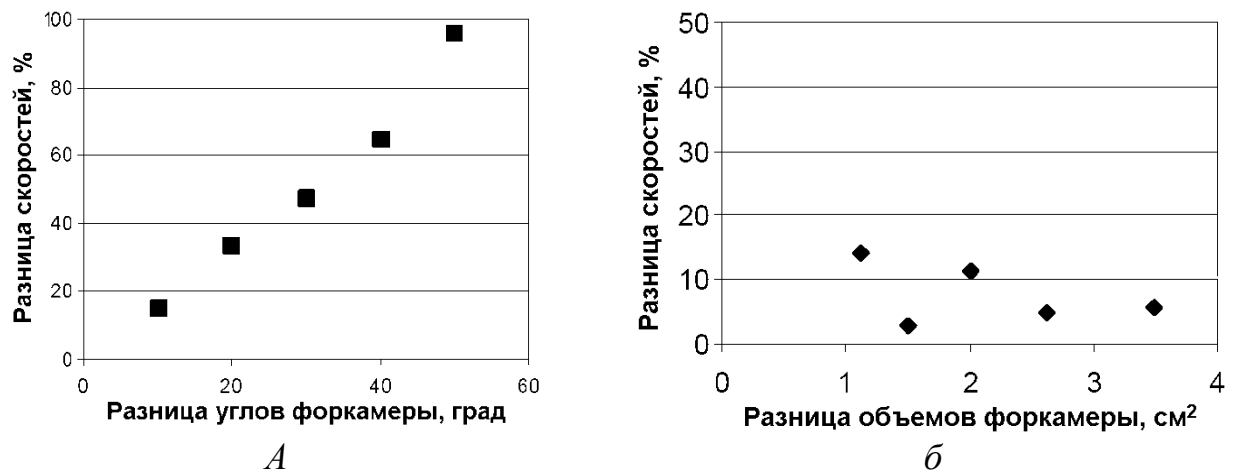


Рисунок 1.6 - Зміна співвідношення швидкостей витікання при варіюванні умовного кута форкамери (а) і її обсягу (б)

У роботі [11] DEFORM 3D використовується для оцінки зварюваності на прикладі двутаврового профілю. Однак автори [12] були змушені помістити віртуальний прошарок - площина товщиною 0,1 мм на стику двох потоків щоб уникнути збою програми при злитті елементів цих потоків. Тому оцінка вироблялася тільки візуально по заповненню зварювальної камери й по формозміні металу на виході з каналу матриці.

Автори [13] застосовують DEFORM 3D для оптимізації конструкції матриці для пресування профілю, що має форму незамкнутого циліндра. Однак, у зазначеній роботі не наведені вихідні дані, використовувані в розрахунках.

Останнім часом з'являються й інші програми для розрахунку напружено-деформованого стану й оптимізації параметрів процесу пресування [14-15].

Наприклад, в [16] з використанням програми HyperExtrude( оптимізується довжина паска по периметрі профілю, однак мова йде про бесфоркамерной матрицю. Відомо також рішення з так званими авторами [17] сполученим із МКЕ методом верхньої оцінки, що дозволяє до деякої міри прискорити процес моделювання, однак, мабуть, знижує точність розрахунків.

Результати чисельних експериментів, узагальнені у вигляді формул, залежать від теоретичних передумов, покладених в основу математичних моделей. Так при одержанні співвідношення розглядається пружно-в'язкопластична задача, де загальна деформація складається із пружної й пластичної частини, а для врахування умови нестисливості матеріалу при рішенні в'язкопластичної задачі використовується метод штрафних функцій. Точність рішення при такому підході знижується, оскільки пружна деформація металу заготівлі при пресуванні становить у порівнянні із пластичної вкрай малу величину, а використання методу штрафних функцій при більших пластичних деформаціях дає значну погрішність, що показано в статті [18]. Опис математичної моделі в роботі [19] є неповним і не дозволяє провести її аналіз.

Інтерес також представляють роботи [20-21]. Однак, дослідження в них проводилися для окремих конкретних профілів зі складною формою поперечного перерізу. Отже, результати аналізу не можуть бути систематизовані й перенесені на прес-вироби іншої форми.

Крім зазначених праць, можна виділити роботи Гуна Г.Я. і А.Ф. Аверченко [22] по двовимірному й А.А. Миленина [23] по об'ємному моделюванню пластичного плину металу при пресуванні з наступним узагальненням його результатів з метою оптимізації конструкції форкамерних матриць.

В основу робіт Гуна Г.Я. і А.Ф. Аверченко покладене припущення, що швидкість плину металу в напрямку пресування на виході з каналу матриці можна розрахувати в крапці перетину профілю по формулі:

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

де  $v_{1i}$ ,  $v_{2i}$ ,  $v_{3i}$  – рішення рівняння Пуассона на перетинах контейнера, форкамери й профілю відповідно;

$K_i$  – поправочні коефіцієнти.

Знаючи вплив геометричних розмірів форкамери на швидкість металу по різних перетинах, пропонується управляти пластичним плином. Швидкості визначаються, використовуючи гідродинамічну аналогію, - плин грузлої рідини в системі циліндрів. Таким чином, при обліку реологічних властивостей матеріалу приймається досить грубе допущення. Крім того, математична модель у такому виді не може враховувати впливи на пластичний плин довжини робочих пасків і дія напруг тертя.

З метою ослаблення впливу при розрахунках швидкості зазначених вище допущень у формулу (1.1) уведені поправочні коефіцієнти  $K_i$ . Ці коефіцієнти виходять методом найменших квадратів, виходячи з відхилень між величинами швидкості, розрахованими по формулі (1.1), і даними, отриманими експериментально для деяких пробних розташувань каналу матриці.

Очевидно, що такий підхід у вихідному виді не враховує впливи на характеристики формозміни більшості параметрів конструкції інструмента й не дозволяє ефективно оптимізувати його розміри й форму. Однак дана робота була однією з перших, у якій аналіз пластичного плин металу через плоску форкамерну матрицю виконувався за допомогою математичного моделювання.

Робота [24] з погляду закладених теоретичних передумов навпаки є більше сучасною. Використовувані в ній математичні залежності для опису об'ємного плин металу при пресуванні профілів докладно освітлені в ряді праць [25]. Так і в роботі [26] розглядався процес пластичної деформації при пресуванні суцільного товстостінного профілю через плоску форкамерну матрицю. Параметрами були обрані глибина й площа поперечного перерізу форкамери, а також відстань від осі контейнера до центра ваги каналу. Вплив на формозміну металу паска, що калібрує, розміру контейнера й зсуву середньої лінії каналу щодо середньої лінії

форкамери не враховувалося. Розміри каналу матриці й варіанти форми поперечного перерізу форкамери показані на рис. 1.4. Моделювання проводилося для технічного алюмінію й алюмінієвого сплаву AlCuMg, перший з яких рідко застосовується при виробництві профілів через низьку міцність, а другий - низкою корозійної стійкості. Як критерій оптимізації використовувалася умова відсутності вигину вихідного з матриці прес-виробу. Для цієї умови були отримані значення емпіричних коефіцієнтів і оптимальних значень параметрів. Однак прямий перенос результатів даної роботи на випадки пресування профілів іншої форми або з інших сплавів не представляється можливим.

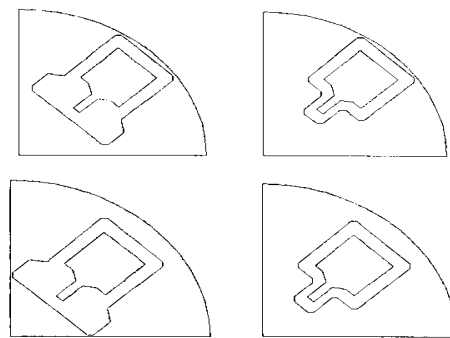


Рисунок 1.7 - Варіанти положення каналу на дзеркалі матриці й форми поперечного перерізу форкамери

Розвитком робіт зазначених вище робіт, зокрема, рішень А.А. Миленина, є програма QForm, розроблена фірмою QuantorForm. Принципи, закладені в блок розрахунку формозміни при пресуванні такі ж, як і у використовуваній надалі програмі Extrusion 3D.

Однак, як уже було відзначено вище, об'ємні математичні моделі рідко використовуються для множинних розрахунків з метою наступного статистичного аналізу отриманих даних. Такі розрахунки вигідніше проводити на двовимірних моделях, як це було пророблено в роботах, оскільки рішення тривимірною завдання завжди є лише одним з окремих випадків. Застосування об'ємних моделей необхідно для аналізу кінематики плинину в контейнері й матриці при дослідженні взаємного впливу плинину в різних елементах каналу або окремих каналів матриці.

## 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 2.1. Задачі та методи дослідження

1. Дослідження утворення нерівномірного витoku 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 AA6060.
4. Побудувати математичну модель для визначення співвідношення швидкостей витікання металу при багатоканальному пресуванні тонкостінних профілів.

В даному проекті методика експериментального дослідження розділяється на три логічно обґрунтованих етапи: підготовку експериментального дослідження, методику його проведення та методику обробки експериментальних даних.

Необхідність у науковій організації експериментальних досліджень процесів о. м. т. викликається всі зростаючими вимогами до глибини проникнення в сутність досліджуваних об'єктів та якості інформації. Обґрунтовані судження про перелік іспитових заходів, їхньої раціональної послідовності, сукупності величин, що реєструються вимогах до точності вимірів і частоті реєстрації можна мати лише, маючи у своєму розпорядженні кількісні співвідношення, що зв'язують шукані техніко-економічні характеристики випробуваного об'єкта з його параметрами. Тому найважливішим принципом організації складних експериментів у сучасних умовах є системний підхід, що припускає розгляд всіх засобів, що беруть участь

в експерименті, як єдиної системи, що має математичну модель і функціонує відповідно до певного алгоритму.

Після вивчення всіх матеріалів, що ставляться до мети та предмета дослідження, я вирішив його головне завдання - розробив робочу гіпотезу, тобто наукове припущення про розвиток (протіканні) досліджуваного явища і його ймовірне пояснення. У робочій гіпотезі виділяю найбільш важливі, вирішальні, а також можливі причинні: зв'язку та взаємодії, імовірний напрямок і хід розвитку явища в цілому.

Якщо передбачуваний розвиток явища або зміни факторів, його зумовлюючих, піддаються аналітичному поданню, тобто математичному вираженню у вигляді певних фізико-механічних закономірностей, то вони можуть привести до створення так названої моделі явища (процесу), у якій явища замінені системою математичних формул.

Види моделей, застосовуваних на практиці, досить різноманітні. Це та фізичні моделі, що представляють собою геометрично подібні або масштабно змінені оригінали, і символічні моделі, тобто опису властивостей за допомогою символів (у вигляді рівнянь, графіків функцій, таблиць, графів та ін.), і, нарешті, математичні, або аналогові, моделі, коли замість дослідження якого-небудь явища на самому об'єкті або в реальних умовах його протікання імітують його на установці, що відтворює фізично інше явище, але описуване такими ж рівняннями, що і явище в оригіналі. Як при математичному, так і при фізичному моделюванні доцільно використати теорію подоби, що допомагає узагальнити результати експерименту, принципи розмірностей, визначити кількість незалежних змінних і контактуючих параметрів.

Після розробки робочої гіпотези я перейшов до планування науково обґрунтованого та найбільше ощадливо здійснюваного дослідницького процесу: вибрав метод дослідження, устаткування, пристосування та вимірювальну апаратури; проаналізував та врахував погрішності апаратур і методу дослідження, встановив помилку та невизначеність експерименту в цілому; прийняв рішення щодо способів обробки експериментальної інформації,



визначив інтервали та необхідне число відліків; розробив план експерименту, на основі якого визначають кількість дослідів; установив послідовність проведення дослідів, витрати часу і засобів[27].

Вибір методу дослідження визначив, головним чином, кількістю і якістю інформації, яку потрібно одержати. При цьому я не керувався особистими схильностями або сформованою практикою, інакше міг би одержати надлишкову або, навпаки, недостатню інформацію, ускладнити експеримент та збільшити його вартість, а іноді та одержати недостовірні результати.

Ціль експерименту значною мірою визначає фізичний зміст результатів виміру, а це у свою чергу впливає на вибір методу. Так, якщо вивчається зміна геометричних параметрів процесу (наприклад, витяжка та розширення при куванні та прокатуванні), те первинні дані доцільно одержувати у вигляді переміщень, використовуючи геометричні методи дослідження. Завдання про глибину проникнення пластичних деформацій, нерівномірності розподілу деформації і їм подібні припускають оцінку деформованого стану. Тут первинні дані бажано одержувати у вигляді деформацій, наприклад за допомогою поляризаційно-оптичного методу.

Вибираючи метод дослідження, звернув увагу на можливість застосувати той або інший спосіб обробки первинних дослідних даних. У зв'язку з інтенсивним розвитком обчислювальної техніки та прикладної математики зараз широко використовують аналітичні методи, що створюють передумови для автоматизації експериментальних досліджень. Однак зберігають своє значення графічні та графоаналітичні методи, що володіють достатньою точністю та простотою. Розвитку та удосконалюванню цих методів сприяє створення автоматизованих систем керування експериментом, що включають візуальні засоби відображення інформації, у тому числі дисплеї.

Вибір методу тією чи іншою мірою визначає склад устаткування для проведення експерименту. Вибираючи встаткування, я не прагнув до максимально можливої точності, тому що та на унікальному встаткуванні можна одержати тривіальні результати. Точність вимірювальних приладів

повинна відповідати необхідній вірогідності результату. Також пам'ятав, що більше висока точність вимірів - це або витрати на більше дороге встаткування, або витрати часу на повторення дослідів. Рациональне співвідношення того та іншого потрібно визначити в кожному конкретному випадку. Нарешті, високої ефективності експериментальних досліджень я домогся ретельно продумуючи та обгрунтовано сполучаючи натурні дослідження з лабораторними, виконаними на фізичних, електричних та інших моделях.

Заключний етап експериментальних досліджень - обробка та узагальнення отриманих результатів експерименту. Для цього використовують всі матеріали спостережень: результати вимірів, опису розвитку процесів, спостережувані під час дослідів закономірності можливі відхилення і їхні причини, нові фактори, не передбачені при плануванні дослідження, зразки, фотографії, таблиці, графіки та ін.

Спочатку знайшов функціональні зв'язки між дослідними даними, представленими звичайно у вигляді таблиць або графіків. Після відповідної обробки ці дані вивчив, для того щоб найбільш повно розкрити закономірності розвитку досліджуваного процесу, його зв'язок і взаємодію із супутніми явищами. Установив функціональні зв'язки між окремими параметрами, перейшов до аналізу процесу в цілому, його теоретичному узагальненню та вираженню дослідних закономірностей емпіричними формулами [28].

## **2.2. 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 значеній « $x_0$ » - 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:

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

де  $b_j$  – значення  $j$ -го коефіцієнта регресії;

$x_{jn}$  – значення  $j$ -го чинника в  $n$ -ом досліді в кодованому вигляді;

$Y_n$  – 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 розраховуємо довірчий інтервал коефіцієнтів:

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

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

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

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

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

### **2.3. Дослідження спільного впливу геометричних параметрів інструмента на кінематику витікання металу при пресуванні**

Дослідження проведене за допомогою скінчено-елементної математичної моделі і розробленої на її основі програми розрахунку параметрів напружено-деформованого стану при пресуванні, створеної на кафедрі ОМТ. В основу математичної моделі покладені такі припущення: деформований стан при видавлюванні матеріалу з контейнера, у тому числі круглого, приймається плоским; процес прямого пресування вважається умовно сталим (квазістаціонарним) і ізотермічним; матеріал, що деформується, нелінійно-в'язкий і нестисливий, напруження текучості його залежить від ступеня, швидкості деформації й температури. Для дискретизації площини поперечного перерізу металу в контейнері, форкамері, зоні калібруючого паска та вільному кінці профілю використано прямокутний мультиплекс-елемент.

Задача пошуку полів дійсних швидкостей та напружень вирішується виходячи з умови стаціонарності функціонала варіаційного принципу Маркова, який для випадку плоскої деформації має вигляд:

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

де  $\mu'$  – умовна в'язкість металу;

$H$  – інтенсивність швидкості деформації зсуву;

$F$  – площа поперечного перерізу тіла, що деформується;

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

$\sigma_0$  – середнє гідростатичне напруження;

$\sigma_\tau$  – напруження тертя;

$V_\tau$  – швидкість ковзання металу по інструменту;

$l$  – довжина поверхні контакту металу з інструментом.

Умовна в'язкість металу визначається за формулою:

$$\mu' = T_s (H, \Lambda, T) / H, \quad (2.2)$$

де  $T_s$  – інтенсивність напружень зсуву;

$\Lambda$  – 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:

$$\sigma_{ij} = 2T_s \dot{\epsilon}_{ij} / H + \delta_{ij} \sigma_0 = 2\mu' \dot{\epsilon}_{ij} + \delta_{ij} \sigma_0. \quad (2.3)$$

Для врахування нелінійності реологічних властивостей матеріалу використаний метод гідродинамічних наближень. На кожному кроці ітераційного процесу вирішується лінеаризована крайова задача, що відповідає течії лінійно-в'язкої рідини. Використана модель тертя, отримана з експериментальних досліджень О.М. Леванова:

$$\tau = K_{\Pi} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1,25 \cdot \sigma_n}{\sigma_T}\right) \right] \cdot \tau_T, \quad (2.4)$$



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

$\sigma_n$  – нормальне контактне напруження;

$\sigma_T$  – напруження текучості;

$\tau_T$  – напруження текучості металу на зсув.

Реологічні характеристики матеріалів, що були використані при моделюванні, описані або у вигляді полінома, отриманого на підставі апроксимації власних експериментальних даних, або за допомогою методу термомеханічних коефіцієнтів.

Використана модель розрахунку параметрів процесу пресування, адаптована зокрема до випадку використання ступінчастих форкамерних матриць, дозволяє визначати розподіл по елементах скінчено-елементної сітки значень швидкостей деформацій, ступеней деформацій, а також компонент тензора напружень.

В якості характерних параметрів зони деформації при використанні форкамерних матриць були виділені наступні розміри: діаметр (приведений поперечний розмір для двовимірної задачі) контейнера,  $D$ ; відстань від осі контейнера до осі профілю,  $E$ ; глибина  $H$  і ширина  $B$  форкамери (рис. 2.1); зміщення осі форкамери щодо осі каналу  $e$ ; товщина профілю (ширина каналу)  $s$ . Також для опису геометрії форкамери можуть бути використані: відстань від паска до стінки форкамери ( $a$  або в напрямку від осі контейнера  $c$ ); зміщення осі форкамери щодо осі каналу, середня відстань між стінками паска і форкамери  $b$  і умовний кут форкамери:

$$e = (c - a)/2. \quad (2.5)$$

$$b = (c + a)/2. \quad (2.6)$$

$$\operatorname{tg} \beta = H/b. \quad (2.7)$$

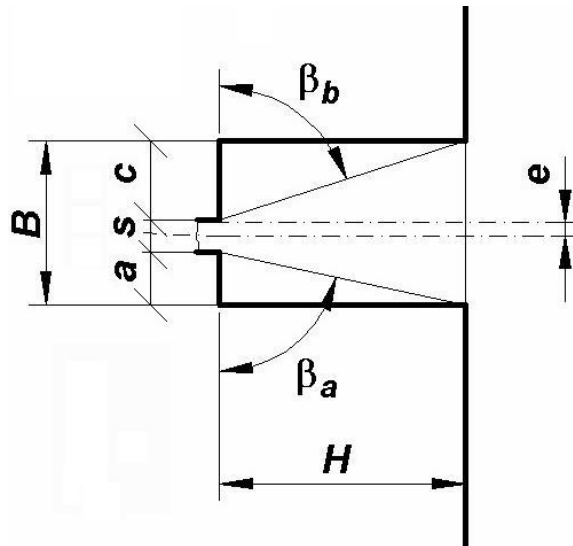


Рисунок 2.1 - Характерні геометричні розміри форкамери

Функцією відгуку є кривизна штаби  $\zeta$  або радіус вигину  $r$ . Інший важливий параметр – нерівномірність розподілу осьового компонента швидкості витікання  $\Omega$  (рис. 2.2).

$$\Omega = \frac{\sum_1^n \Delta V_{x,i} \Delta y_i}{\bar{V}_x} = \frac{n \sum_1^n \Delta V_{x,i} \Delta y_i}{\sum_1^n V_{x,i} \Delta y_i} \quad (2.8)$$

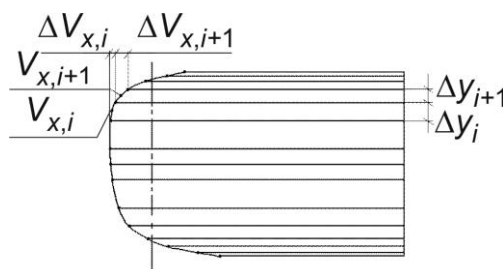


Рисунок 2.2 - Нерівномірність швидкостей по перерізу штаби

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 AA6060, AA6082 і AZ31 отримані коефіцієнти  $\lambda$ .

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

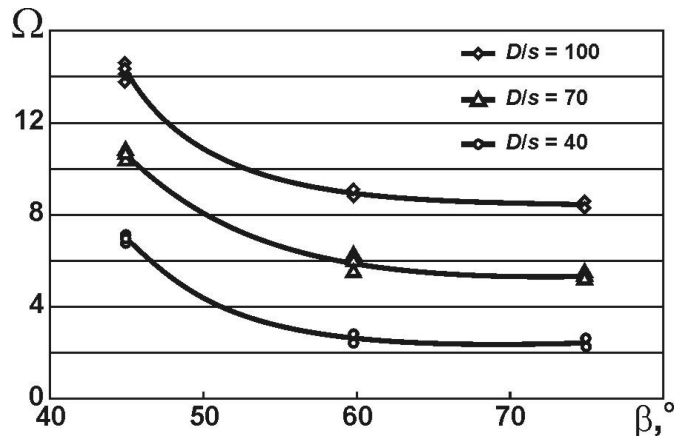


Рисунок 2.3 - Залежність  $\Omega$  від кута  $\beta$

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

#### 2.4. 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 ОМТ. У цьому випадку задача пресування розглядається як стаціонарна у формулюванні Ейлера. Для одержання рішення використаний модифікований функціонал варіаційного принципу Маркова:

$$J = \frac{1}{2} \int_{\Phi} \mu' H^2 d\Phi + \int_{\Phi} \sigma_0 \dot{\epsilon}_0 d\Phi - K_p \int_F (V_{\tau})^2 dF, \quad (2.10)$$

де  $F$  – площа поверхні контакту металу з інструментом;

$K_p$  – штрафний множник;

$\Phi$  – об'єм тіла, що деформується.

Нелінійність реологічних властивостей металу врахована за допомогою методу гідродинамічних наближень. Дискретизація об'єму металу, що деформується, і апроксимація поля швидкостей виконана за допомогою п'ятнадцятивузлових трикутних призм. Для апроксимації середнього напруження використовувались трикутні призми з 6 вузлами, які збігаються з кутовими вузлами елементів першого типу. При завданні граничних умов також використана модель тертя, отримана з експериментальних досліджень О.М. Леванова. Реологічні характеристики металу описуються в такий же спосіб, як і у двовимірній моделі.

Моделювання пресування рівнополкового куткового профілю, при варіюванні кута між полками (135, 90 і 45°) і умовного кута форкамери (75, 60 і 45°) при різній відстані від центра ваги профілю до центра матриці, дозволило визначити характерний вигляд розподілу швидкості витікання в напрямку осі контейнера й уздовж полки профілю й зв'язати кут нахилу епюри швидкостей з полярними координатами тупика і вершини полиць профілю.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta W_Z / 2W_{Z,\text{cp}}}{l/D_K}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \left[ k_1 \left( \frac{\rho_T^2 - \rho_B^2}{R_K^2} \right) + k_2 \right], \quad (2.11)$$

де  $\Delta W_Z$  – різниця осьових швидкостей витікання у вершині та тупику полиці,

$W_{Z,\text{cp}}$  – середня швидкість витікання з елемента;

$l$  – довжина полки;

$D_k$  і  $R_k$  – 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 ( $\gamma = 45, 90, 135^\circ$ ) 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  $\beta > 45^\circ$  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 дослідження характеру течії за допомогою спеціалізованого пакету елементного аналізу Deform3D було проведено моделювання процесу напівбезперервного пресування профілів із сплаву алюмінієвого сплаву.

У програмному комплексі DEFORM – 3D існують 3 основні етапи моделювання :

- 1) Препроцесор;
- 2) Вирішувач;
- 3) Постпроцесор.

Препроцесор служить для створення моделі об'єкту дослідження (геометрична і розрахункова), завдання параметрів моделі - сітка, температура, пластичність та ін., характеристики контакту - коефіцієнт тертя, коефіцієнт

теплопередачі, визначаються точки контакту інструменту із заготівлею, робиться налаштування вирішувача, здійснюється генерація баз даних.

У вирішувачі відбувається розрахунок поставленого завдання.

Постпроцесор служить для обробки результатів моделювання. У нім можливе графічне представлення результату обчислення по кроках (загальне, у вказаній точці, між двома точками), визначення напрямку течії матеріалу, виведення інформації в якості текстових, графічних і відео файлів.

Розглянемо кожен пункт детально, стосовно процесу пресування. В главі пов'язаної з розрахунками в Deform застосовуватиметься така ж послідовність дій, з особливостями для кожного випадку, які вказуватимуться.

Запускаємо Deform, і перед нами з'являється головне вікно (рис. 2.4). У нім відображаються все раніше створені бази даних (1), вікно балки (2), меню препроцесор (3), процесор (вирішувач) (4), постпроцесор (5).

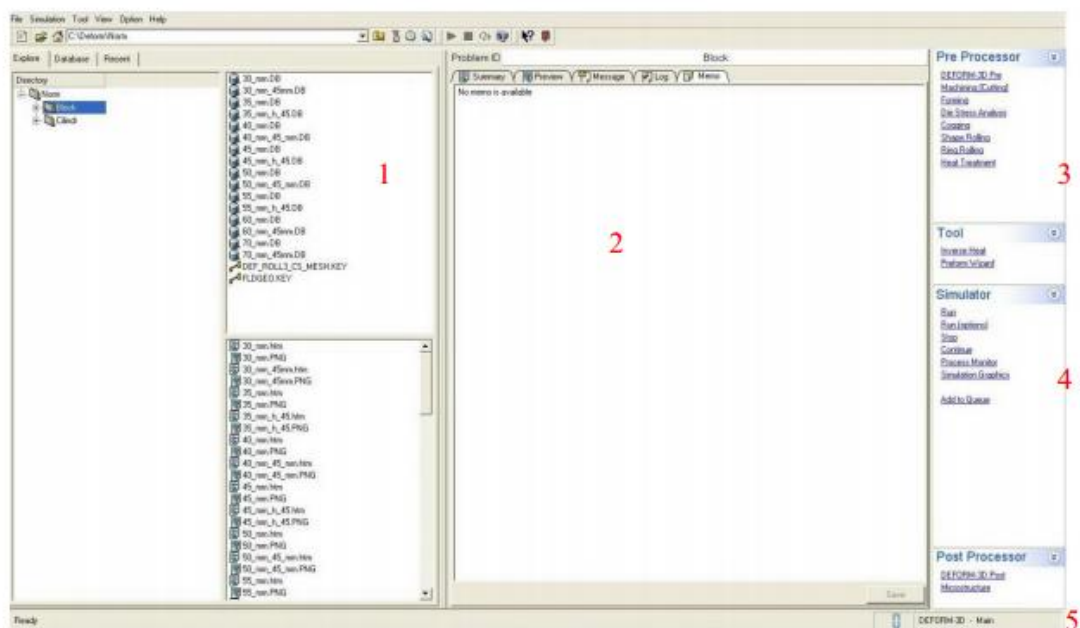


Рисунок 2.4 - Головне вікно Deform

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).

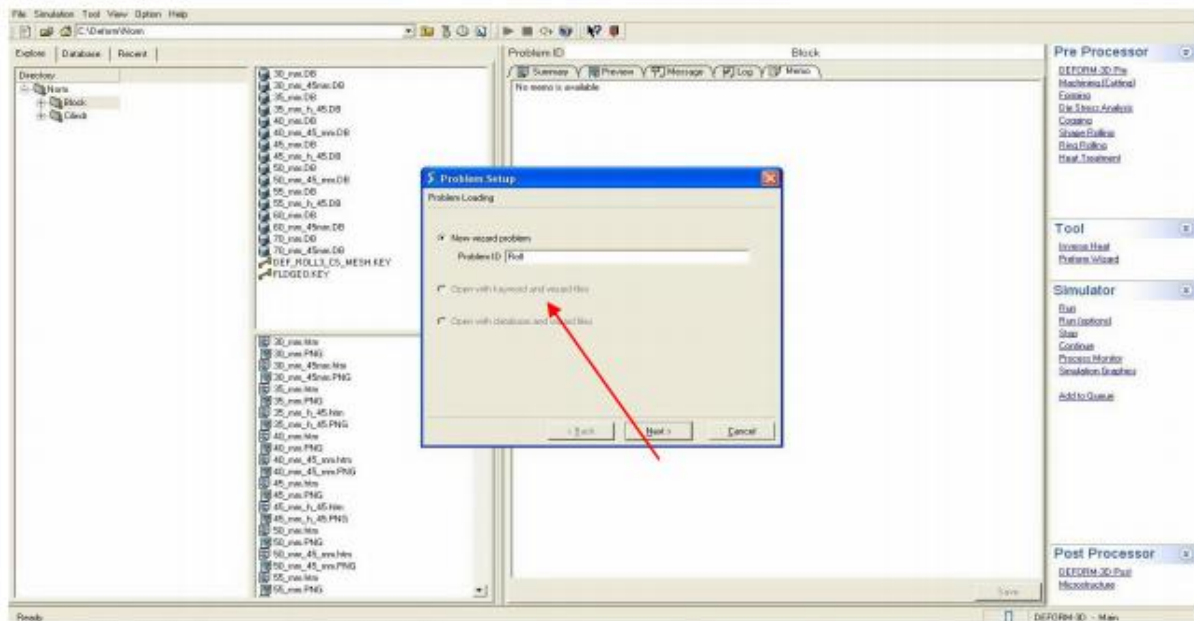


Рисунок 2.5 - Створення і привласнення імені новому завданню

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

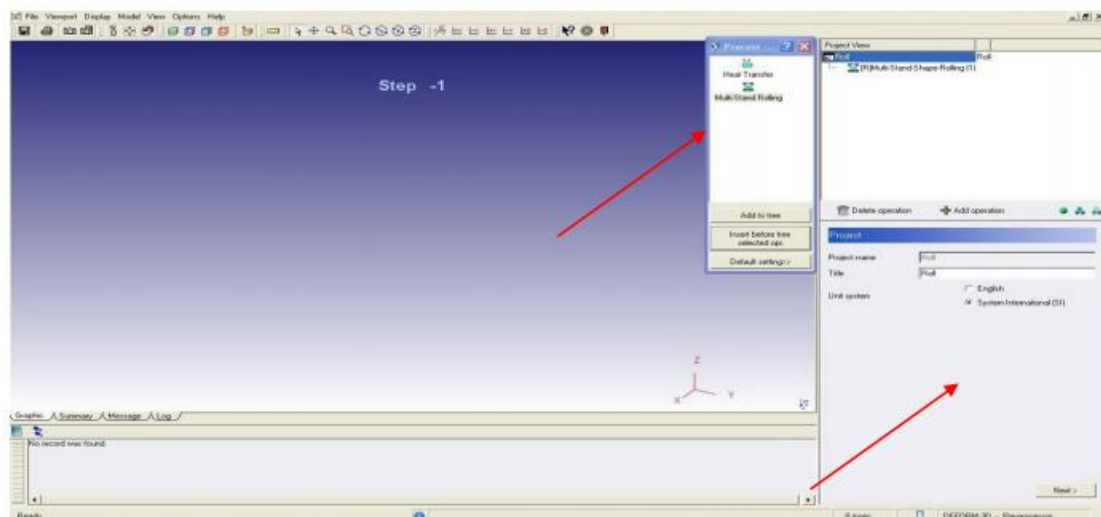


Рисунок 2.6 - Меню препроцесора

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

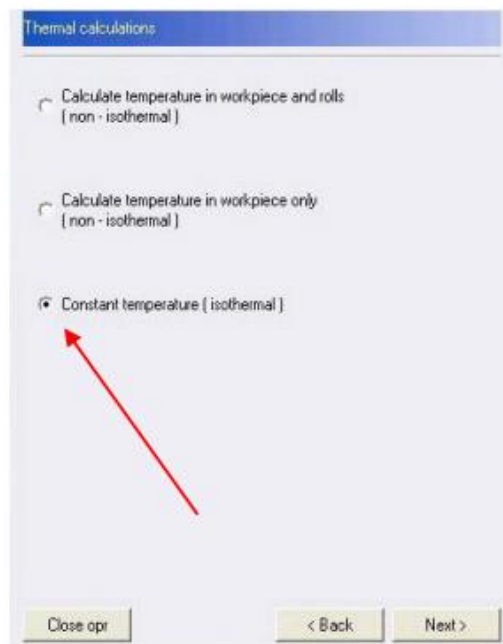


Рисунок 2.7 - Меню розрахунку температури

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

Для прискорення розрахунків вибираємо чверть (рис. 2.8).

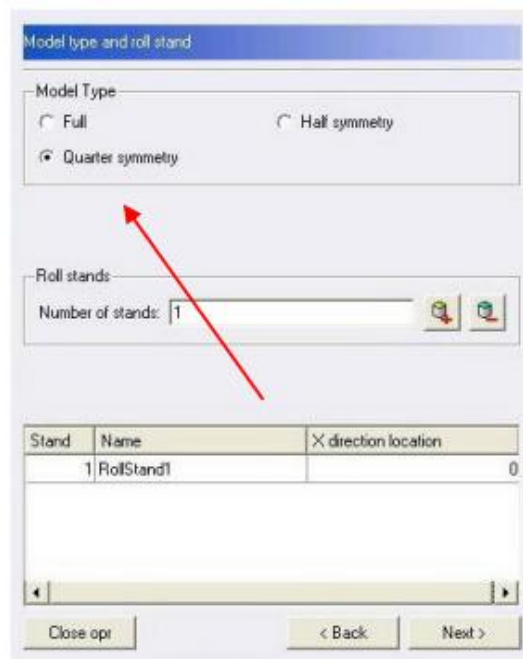


Рисунок 2.8 - Вибір моделі заготівлі

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

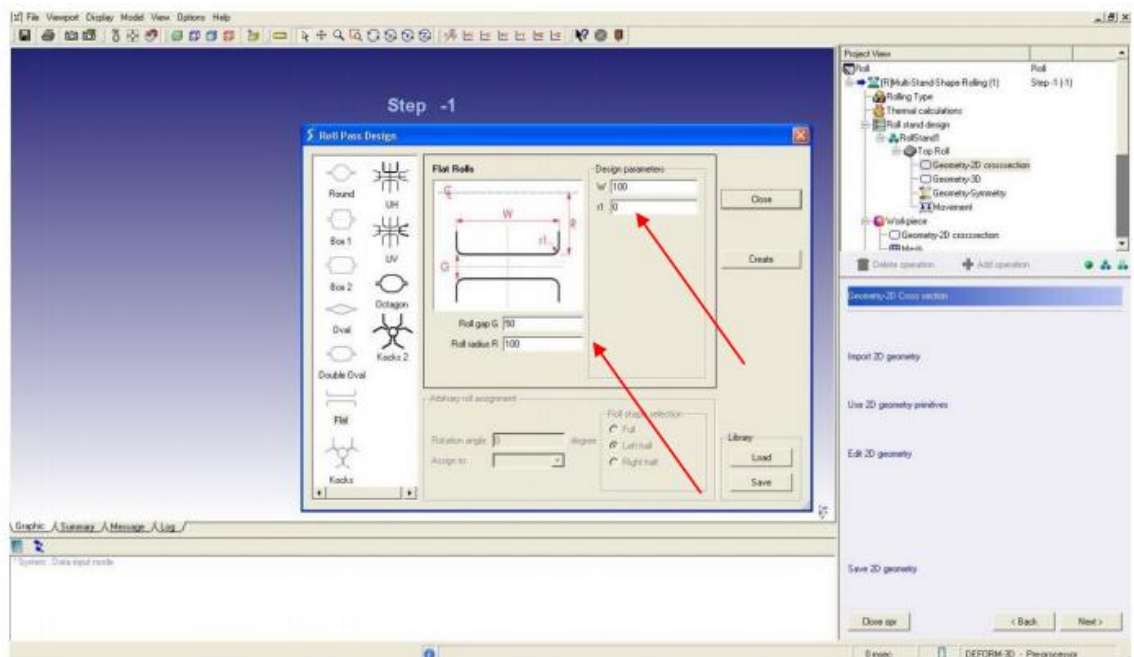


Рисунок 2.9 - Визначення геометрії форкамери і матриці

Форкамеру вибираємо циліндричної форми і натискаємо Next. З'являється контур форкамери (рис. 2.10), який шляхом обертання навколо своєї дасть нам 3d модель.

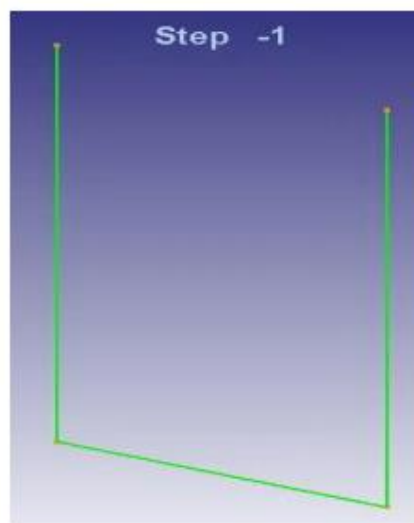


Рисунок 2.10 - Контур технологічного інструменту

Об'єктом моделювання був вибраний процес пресування штаби 10x180 мм із сплаву АД31 через форкамери з глибиною 8, 16, 20 мм і витяжкою 2.7, 4.2, 6.1. У розрахунках використовувалися характеристики горизонтального гідравлічного пресу зусиллям 25 МН з діаметром контейнера 225 мм. В якості заготівлі був вибраний зливочок діаметром 220 мм, завдовжки 350 мм, нагрітий до температури 460 °С.

При моделюванні були прийняті наступні допущення і спрощення. Оскільки процес пресування штаби був симетричним відносно вертикальній осі, розглядалася половина осередку деформації. Пресовий інструмент приймався як ідеально жорсткий. Температура металу приймалася незмінною упродовж стаціонарної стадії пресування, а швидкість руху пресс-штемпеля була постійна. В результаті моделювання процесу були отримані моделі витікання металу при напівбезперервному пресуванні. Якісний аналіз отриманих результатів показав що, як і при фізичному моделюванні, основні закономірності течії металу, виконуються і при схемі пресування з форкамерами. При цьому мертві зони спостерігаються як в контейнері (рис. 2.11, а), так і у форкамері (рис. 2.11, б). Проте величина їх неоднакова і залежить від геометричних параметрів форкамери і розмірів контейнера.

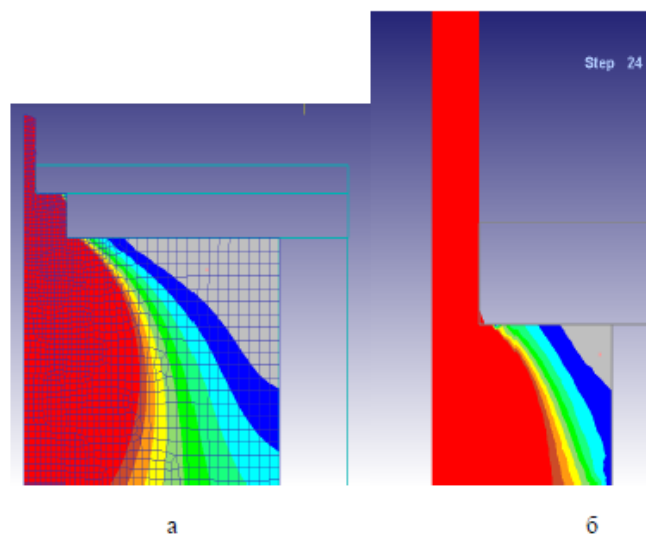


Рисунок 2.11 - Характер течії і мертві зони металу у форкамері (а) і контейнері (б): сірим кольором позначені зони металу із швидкістю переміщення, близької до нуля, а червоним з максимальними швидкостями

В цілому характер течії металу у форкамері (рис. 2.12) повністю повторює характер течії металу в контейнері. Зокрема центральні шари металу випереджають периферійні, відбувається затримка об'ємів металу в мертвій зоні. Спотворення координатної сітки у форкамері помітне менше, що може бути пояснено більшою рівномірністю деформації внаслідок менших сил тертя на контакті металу з форкамерою.

Графік зміни швидкості течії металу по центральному перерізу форкамери (рис. 2.13) дозволяє підтвердити висновок про те, що в об'ємі форкамери швидкість течії центральних шарів у багато разів перевершує швидкість течії периферійних шарів. Проте застосування форкамер дозволяє понизити нерівномірність деформації металу в контейнері, що істотно впливає на вибір величини калібруючого поясочка при проектуванні пресового інструменту.

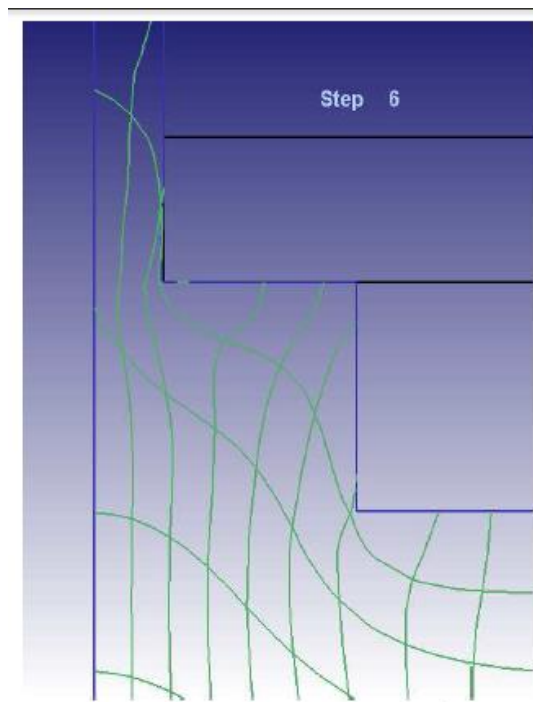


Рисунок 2.12 - Характер течії металу у форкамері

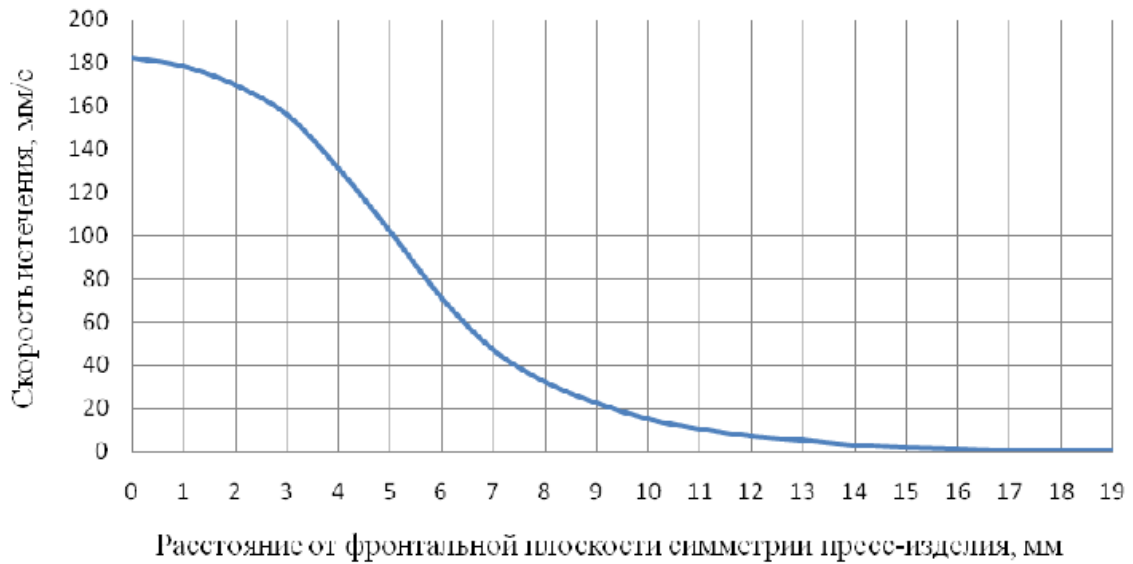


Рисунок 2.13 - Графік зміни швидкості течії металу у вертикальному перерізі форкамери

Таким чином, результати комп'ютерного моделювання дозволили встановити основні закономірності течії металу при застосуванні форкамерного інструменту, а також отримати кількісні характеристики різниці швидкостей центральних і периферійних шарів металу в об'ємі осередку деформації у форкамері. Це дає можливість враховувати особливості формозмінення металу у форкамері при створенні алгоритмів проектування пресового інструменту.



## 3 ОБРОБКА І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 3.1. Результати математичного планування

Метою цієї роботи є експериментальне визначення впливу відстані тонкостінного каналу від центра матриці при різних співвідношеннях розміру форкамери й температури заготівлі на нерівномірність витікання для випадку багатоканального пресування алюмінієвого сплаву АА6060.

Як основне встаткування використовувався вертикальний гідравлічний прес зусиллям 10 МН. Швидкість пресування постійна й дорівнює 0,5 мм/с. Для пресування алюмінієвих сплавів був виготовлений нагрівальний контейнер, що, із внутрішнім діаметром втулки 42 мм і довжиною 120 мм [29]. Експерименти проводили з використанням складеної матриці, ескіз якої наведений на рис. 3.14. Її конструкція дозволяє змінювати розміри (глибину) форкамери образом, щоб варіювати умовний кут форкамери  $\beta$ .

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

Методика проведення експерименту була побудована за планом 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 будемо називати зсув загального центра ваги каналів  $E_{\Sigma}$ ;
- умовний кут форкамери, що характеризує відношення її глибини до відстані від паска до стінки форкамери  $\beta = \arctg(H/a)$ ;
- температура заготівлі  $T_3$ , °С.

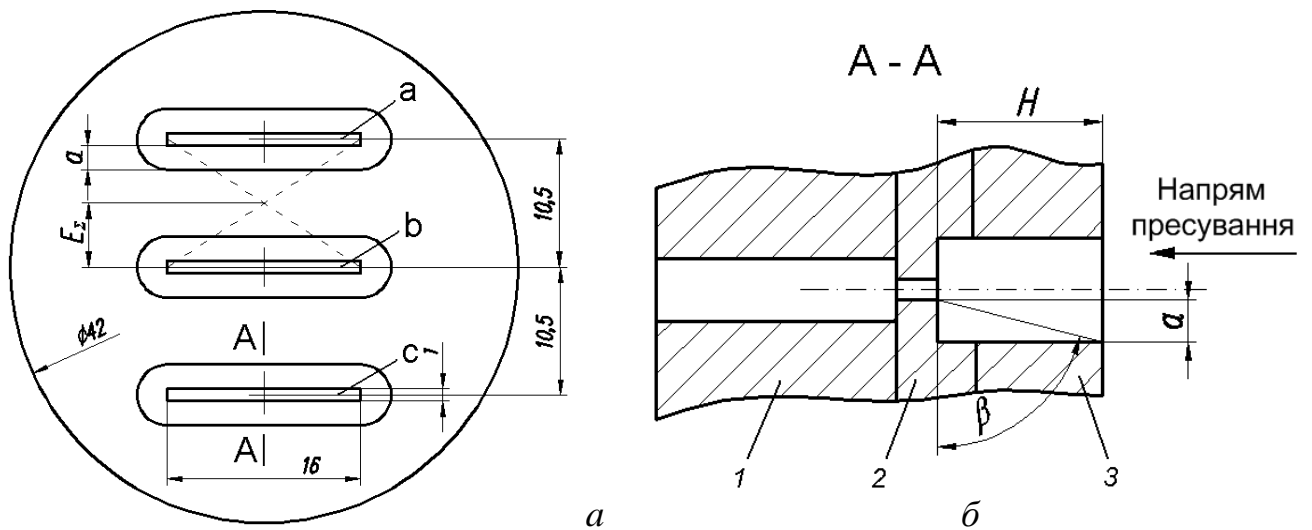


Рисунок 3.1 - Ескіз експериментальної матриці: *a* – дзеркало матриці; *б* – перетин форкамери й каналу (*1* – підкладка; *2* – матричне кільце; *3* – форкамерне кільце)

Зсув загального центра ваги каналів міняли, заглушаючи пробкою або звільняючи один із крайніх каналів. У результаті мінявся коефіцієнт витяжки, однак ця величина не враховувався як фактор, оскільки вона в цьому випадку залежний, а не керований параметр.

Умовний кут форкамери міняли шляхом зміни глибини форкамери.

Як об'єктивна характеристика нерівномірності витікання металу була обрана маса смуги, що випресована з кожного каналу, прямо пропорційна середнім за час пресування швидкостям витікання по каналах.

Рівні факторів, інтервали варіювання й план експерименту представлені в табл. 3.1. Діапазони значень температур і глибини форкамери обрані, виходячи з наявних у літературі даних і заводської практики. Для кожної крапки експерименту було проведено по 3 досліди, що є мінімальною статистично значимою вибіркою.

Функцією відгуку обране відношення маси профілю, що виходить із кожного каналу матриці, до сумарної маси всіх профілів, що виходять із матриці в даному досліді.

У табл. 3.2 представлені результати дослідів (наведені середні значення по трьох дублюючих дослідах) у порівнянні з теоретичними даними. Позначення профілів наведені на рис. 3.1.

Таблиця 3.1 – План повного факторного експерименту  $2^3$

Рівень/фактори		Умовний кут форкамери $\beta, ^\circ$	Відстань від центра матриці до центра ваги всіх каналів, $E_\Sigma$	Температура заготівлі, $T_3, ^\circ\text{C}$	
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 дослідів				
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  $E_\Sigma$ . 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  $E_\Sigma=0,25$ . Використовуємо відому формулу В.П. Альошина для визначення

розмірів паска [30]. Відповідно до цієї залежності, відношення довжини пасків визначиться по формулі:

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

де  $h$  – довжина паска;

$F$  і  $\Pi$  – площа й периметр каналу;

$\Psi$  – швидкісний коефіцієнт;

$\mu$  – поділянкова витяжка ( $\mu = \ln(F_i/F_k)$ );

$F_k$  – площа контейнера;

$i$  і  $0$  – індекси розглянутого й початкового елемента.

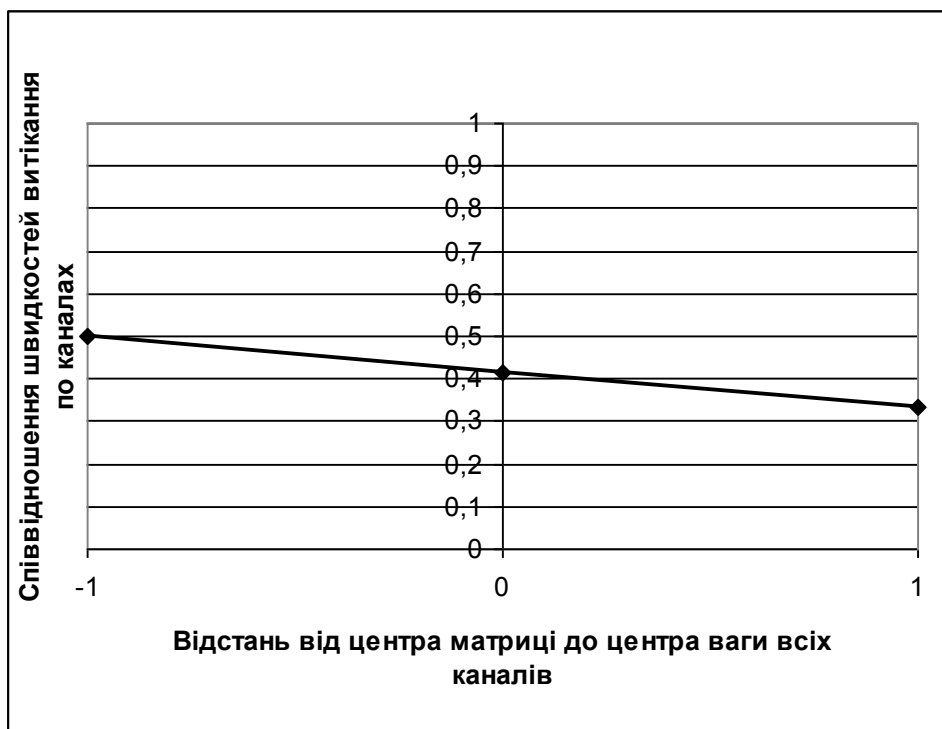


Рисунок 3.2 - Залежність співвідношення швидкостей витікання по каналах від відстані від центра матриці до центра ваги всіх каналів

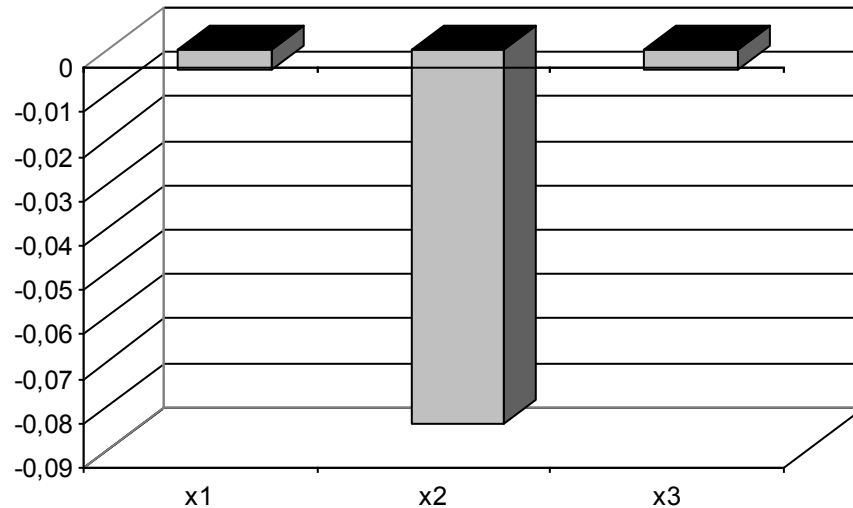


Рисунок 3.3 - Коефіцієнти регресії

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

№ досліджу	Сумарна маса профілів, що випресували ,г	Маса профілю, г			Відношення маси профілю до сумарної маси (експериментальні дані)			Відношення маси профілю до сумарної маси (теоретичні дані), $\Psi_i/\Sigma\Psi_i$		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
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 нашій 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:

$$\Psi = 1 - (\rho/R_k)^2. \quad (3.2)$$

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  $\Psi_i/\Sigma\Psi_i$  (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 багатоканальному 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 й розмірами поперечного переріза профілю відносять:

- 1) температурне розширення матеріалу матриці й пресуемого металу;
- 2) пружну деформацію матричного комплекту;
- 3) натяг, створюваний пулером;
- 4) подовження при виправленні розтяганням;
- 5) утягиваніє в тупикових елементах довгих полиць [5];

б) зношування матриці в процесі експлуатації.

Вплив температурного розширення на розміри профілю можна врахувати за даними, наведеним в [8]. Як показує практика, утягивання при пресуванні через сучасні форкамерні матриці з паском, що має істотно меншу довжину в області тупиків робочого каналу, не спостерігається. Інші фактори будуть розглянуті нижче.

Для того, щоб експериментально оцінити величину пластичної формозміни за виходом з паска, що калібрує, матриці (далі - "позаконтактної деформації") необхідно або усунути, або врахувати розрахунковим шляхом термічне розширення й пружну деформацію матричного комплексу. Експериментальні дослідження з визначення позаконтактної деформації, описані нижче, підрозділяються на дві групи:

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

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

В отриманій штаби вимірялася товщина переднього й заднього кінця й рівнялася із шириною каналу матриці. Виміри вироблялися на такій відстані від переднього торця прес-виробу, при якому плин матеріалу можна вважати сталої (приблизно 200 мм).

Наявність позаконтактної деформації за входом з паска, що приводить до збільшення товщини штаби в порівнянні з розмірами каналу матриці, підтверджується й характером плину матеріалу у форкамері й на виході з каналу (рис. 3.4). В обтискній частині пластичної зони у форкамері паралельні шари матриці утоняються й сходяться до осі штаби, а потім - на виході з паска - розходяться. Особливо це стосується центральних (осьових) шарів.

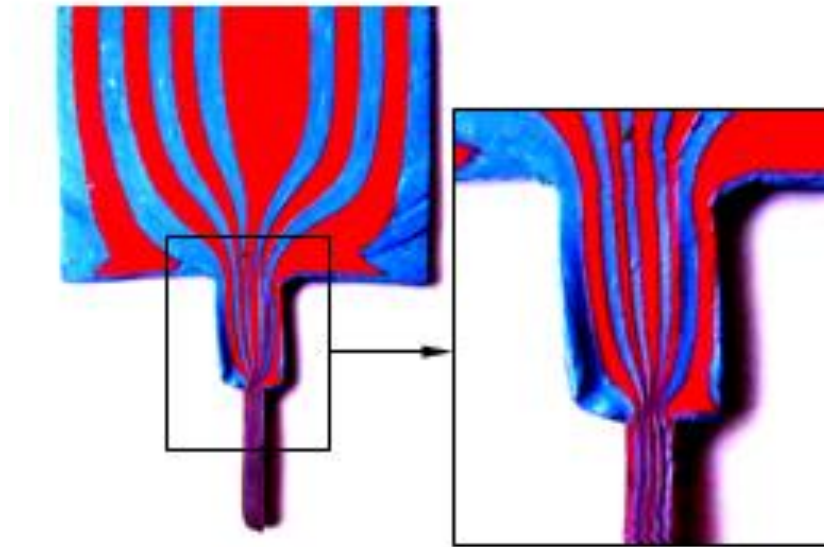


Рисунок 3.4 - Формозміна матриці в площині осі матриці, перпендикулярної каналу

На рис. 3.5 наведені значення відносини товщини штаби  $s_{II}$  до ширини каналу  $s_K$  залежно від відношення ширини форкамери  $B$  к її глибині  $H$ . Аналіз наведених графіків показує, що при різних абсолютних значеннях ширини форкамери залежності  $s_{II}/s_K(B/H)$  мають однаковий вигляд з мінімумом в області значень  $B/H = 1,2$ . Відзначимо, що саме в цьому діапазоні, за результатами математичного моделювання асиметричного пресування штаб з алюмінієвого сплаву АА6060, наведених у роботі [17], очікується мінімальне скривлення штаб на виході із преса.

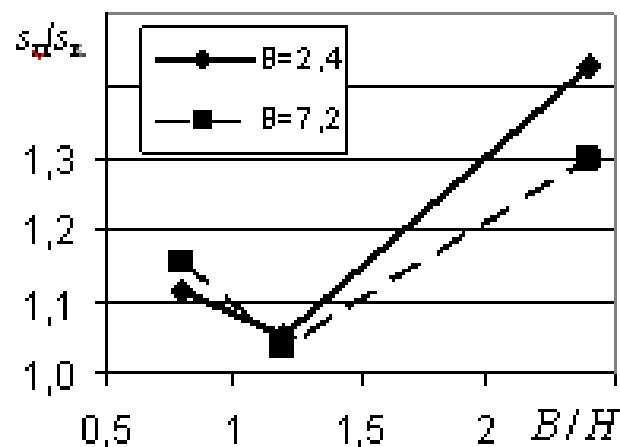


Рисунок 3.5 - Відношення товщини штаби до ширини каналу для різної



відносної ширини форкамери

Отримані при використанні як модельний матеріал пластиліну результати характеризуються більшими абсолютними значеннями відхилень товщини штаби і яскраво показують якісну картину явища.

На рис. 3.6 наведена форма переднього кінця штаби (т.зв. "виходи") для обох типів матриць і різних сплавів. Використання традиційної плоскої матриці зі змінною товщиною паска забезпечила практично пряму форму "виходу", що говорить про рівномірний розподіл швидкостей металу по ширині штаби. Пресування через форкамерну матрицю привело утворенню "мов" на краях штаби. Зв'язано це в першу чергу з тим, що матриця призначалася для пресування магнієвих сплавів, що мають менший коефіцієнт тертя в порівнянні з алюмінієм. Відзначимо, що для сплаву 6082 (рис. 3.6в) величина мов менше, ніж для 6060 (рис. 3.6б), а для магнієвого сплаву AZ31 вони взагалі відсутні. На практиці звичайно виникає інша проблема, коли середина штаби випереджає краї. Таким чином, застосування форкамерної матриці, щабля якої в середині каналу відстоять усього на 0,5 і 1 мм від крайки робочого паска, забезпечило істотне гальмування металу в цій зоні навіть для відносно товстої штаби при використанні ненульового паска з постійною товщиною 4 мм. Це дозволяє сподіватися на достатню зносостійкість такого типу матриці.

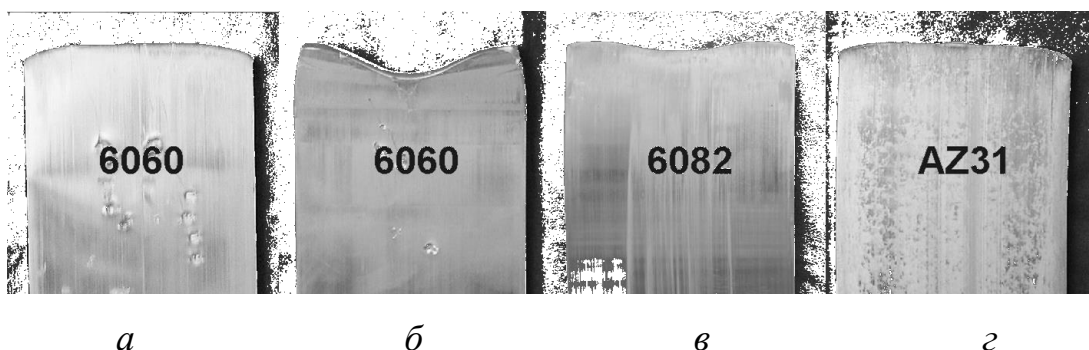


Рисунок 3.6 - Форма переднього кінця штаб: а - пресування через плоску матрицю; б-г - через форкамерну

Аналіз структури пресованих штаб 80х6 мм показує, що у всіх випадках є значна нерівномірність у величині зерна по перетині профілю (рис. 3.20-3.22).

Біля поверхні є так званий крупнокристалічний ободок (ККО). У ньому величина зерна коливається від 20 до 100 мкм. У центрі перетину зерно в середньому менше, але також може досягати 100 мкм. Між ними є перехідна зона з величиною зерна від 10 до 50 мкм. Подібний розподіл описаний і в [4]. Зі збільшенням швидкості пресування нерівномірність структури збільшується (рис. 3.7). Однак проблеми нерівномірності величини зерна стосуються тільки середини штаби. Біля краю її структура добре проробляється, зерно однорідне й досить дрібне (рис. 3.7в). Порівняння структури штаб зі сплаву 6060 отриманих із плоскої й форкамерної матриці показує, що при пресуванні в плоскій матриці біля поверхні прес-виробу зерно більше дрібне й витягнуте в напрямку пресування, однак різниця ця не значна (у межах того ж бала зерна). Глибина залягання ККО при використанні форкамерної матриці приблизно на 30% менше, ніж при застосуванні плоскої матриці.

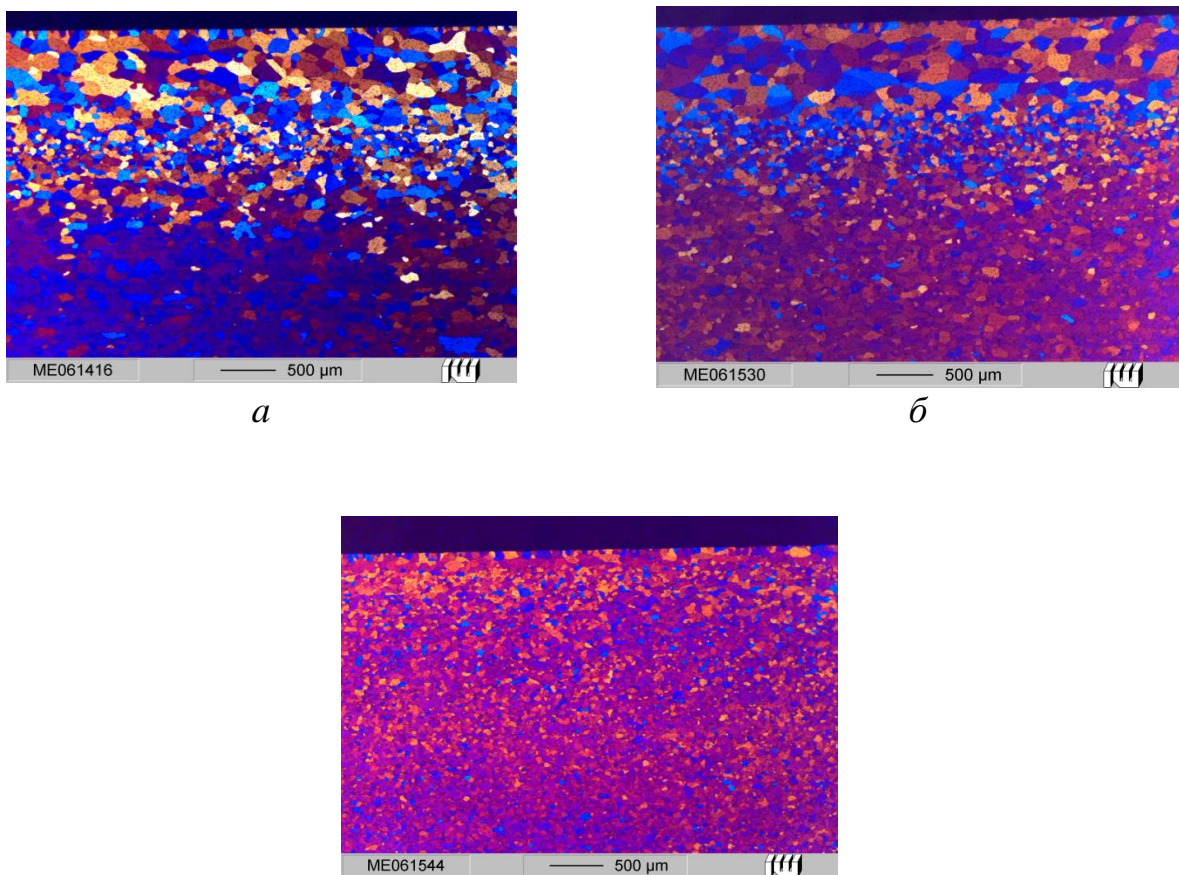


Рисунок 3.7 - Структура металу периферійної області штаб зі сплаву АА6060, пресованих при швидкостях 8 мм/с (а) і 16 мм/с (б и в) через форкамерну матрицю; поздовжній перетин: а й б - вісь штаби; в - крайка



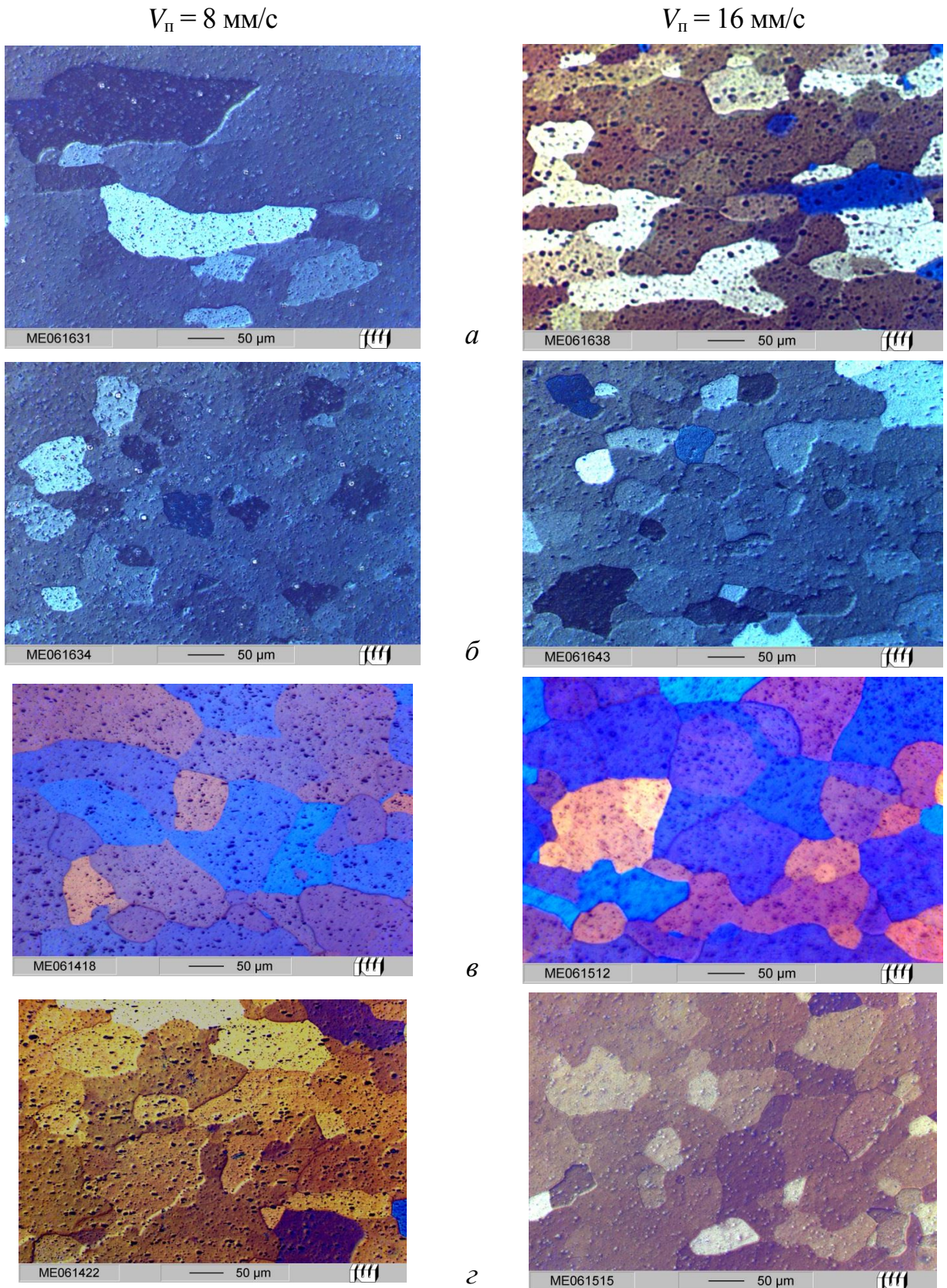


Рисунок 3.8 - Структура металу штаб, пресованих через плоскі (а й б) і форкамерні (у и г) матриці: а й в - периферія; б и г - центр. Поздовжній перетин. Сплав АА6060



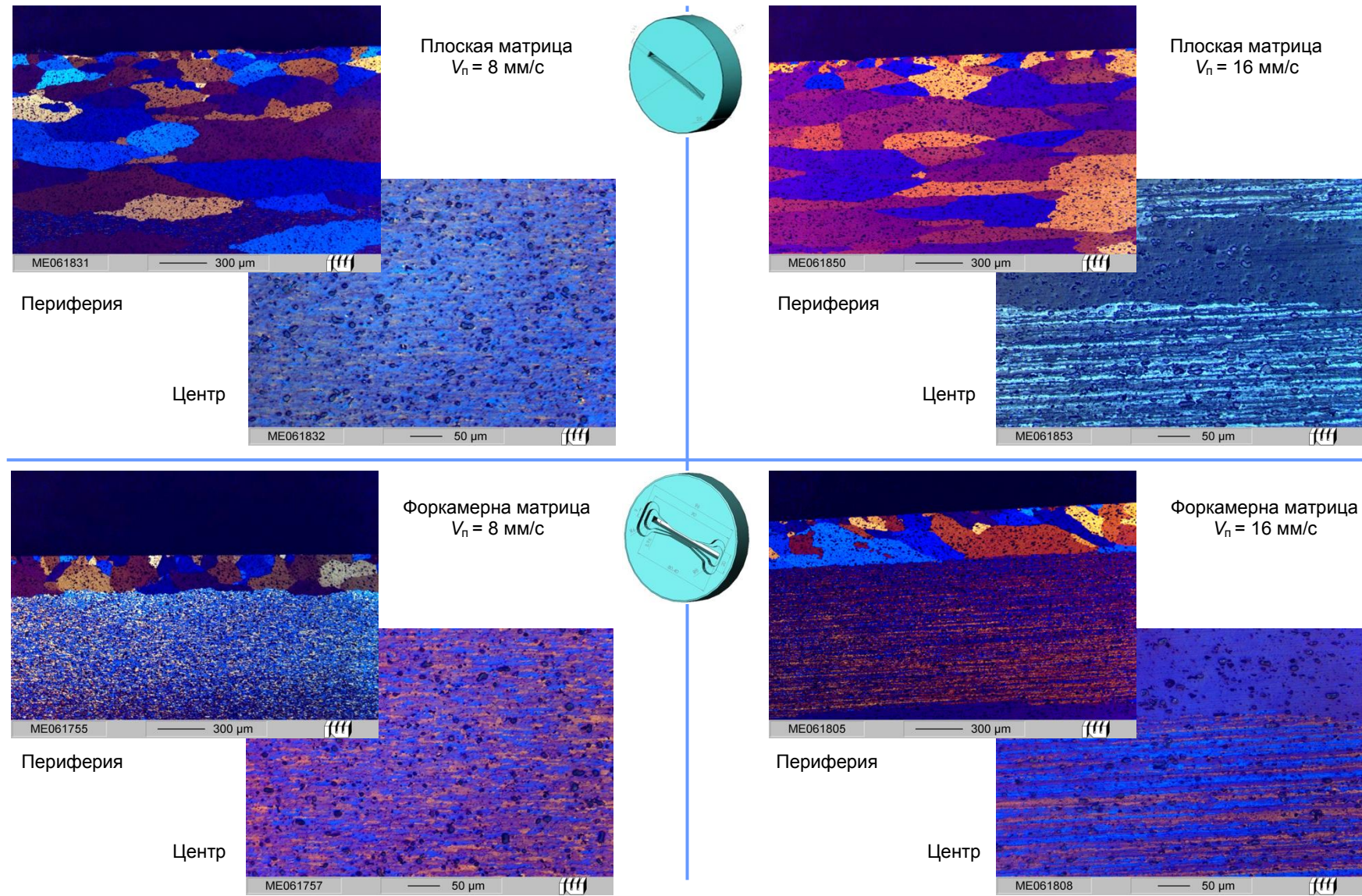


Рисунок 3.9 - Вплив типу матриці на структуру металу штаб зі сплаву АА6082

У штабах зі сплаву 6082 також є крупнокристалічний ободок (рис. 3.9). Для штаб пресованих через форкамерну матрицю границя ККО дуже чітка, товщина ККО 200...350 мкм. У штабах із плоскої матриці границя ККО розмита, а глибина його залягання набагато більше - 1,5...2 мм, розмір зерна в ККО більше (до 1000 мкм у напрямку пресування) у порівнянні з форкамерної матрицею (до 500 мкм). Зерно в центрі перетину штаби набагато дрібніше: 5...20 мкм і в обох випадках витягнуто уздовж напрямку пресування.

Для усунення цього дефекту можна рекомендувати наступне: збільшувати час гомогенізації злитка; підвищувати температуру заготівлі для зниження роботи деформації й підвищення температури рекристалізації (згідно з даними В.Н. Щерби); використати охолодження азотом на виході з матриці. Порівняння отриманих результатів з літературними даними показує наступне. Найпоширенішим є думка, що збільшення швидкості витікання приводить до росту температури й отже збільшенню зерна й глибини залягання ККО. Однак, автори встановили, що збільшення швидкості пресування для сплаву 6082 приводить до зниження глибини залягання ККО. Такі різночитання можуть із пов'язані з геометрією пресового інструмента й впливом інших технологічних параметрів. Традиційно в літературі мова йде про використання плоских або конічних матриць. Однак той факт, що форма західної частини матриці впливає на глибину паска підтверджують і дані роботи в якій розглянуте пресування через плоскі матриці з невеликий зворотної конусністю (у кілька градусів). Зокрема, мінімальна глибина ККО для сплаву 6063 спостерігається при конусності -4 .

Таким чином, було встановлено й знайшло непряме підтвердження в літературі наступне: для сплавів бxxx-й серії пресування через форкамерну матрицю приводить до зменшення глибини залягання ККО в порівнянні із пресуванням у плоскій матриці; збільшення швидкості витікання при використанні форкамерної матриці приводить до деякого зменшення глибини залягання ККО (для АА6060) або збереженню цієї величини на тім же рівні (для АА6082).

### 3.3. Структура та фазовий склад досліджуваних металів і 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.

#### *Сплави алюмінію*

Сплав алюмінію залежно від вмісту домішок підрозділяється на кілька марок. У роботі був використаний технічний алюміній марки - АА6060 (див. таблицю 3.3).

Таблиця 3.3 – Хімічний склад сплаву АА6060 за ДСТ 11069-2001

Марка	Хімічний склад, %						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
АА6060	0,3-0,6	0,1-0,3	0,1	0,1	0,35-0,6	0,15	0,1

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 3.10).

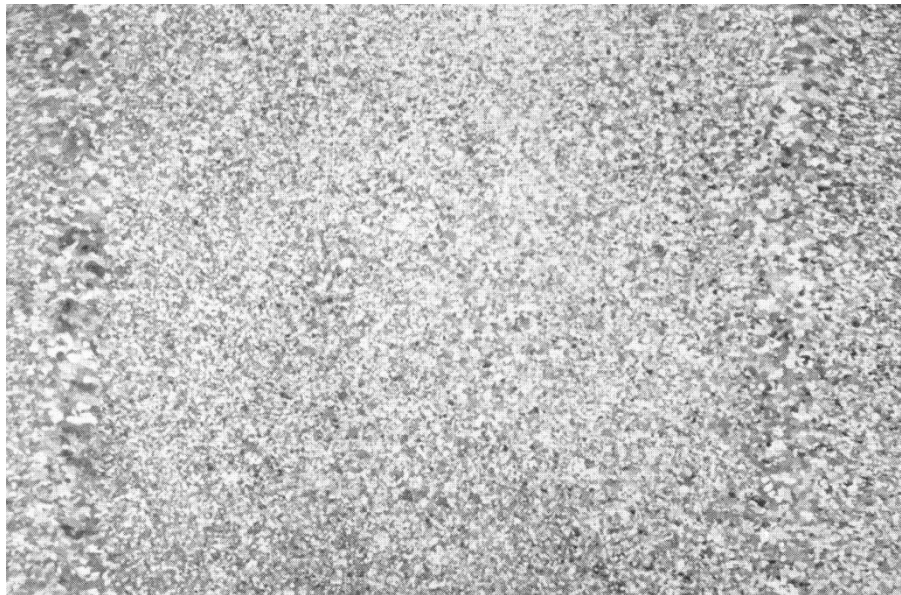


Рисунок 3.10 - Макроструктура плоского злитка алюмінію А5

Домішки заліза та кремнію утворюють із алюмінієм кілька хімічних з'єднань. При значному перевищенні вмісту заліза над вмістом кремнію по границях дендритних осередків спостерігаються голкоподібні кристали  $Al_3Fe$  (рис. 3.11), які виділяються з розплаву як складові евтектики  $\alpha$  (Al) +  $Al_3Fe$ . При інших співвідношеннях між залізом і кремнієм утворюються з'єднання  $\alpha$  (AlFeSi) і  $\beta$ (AlFeSi) (рис. 3.12). Фаза  $\beta$ (AlFeSi) спостерігається в технічному алюмінії при значному перевищенні вмісту кремнію над вмістом заліза. Потрійні з'єднання утворюються по перитектичеської реакції або виділяються безпосередньо з рідини у формі кістякообразних кристалів (фаза  $\alpha$ ) і пластинчастих кристалів (фаза  $\beta$ ). Фаза  $Al_3Fe$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  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.

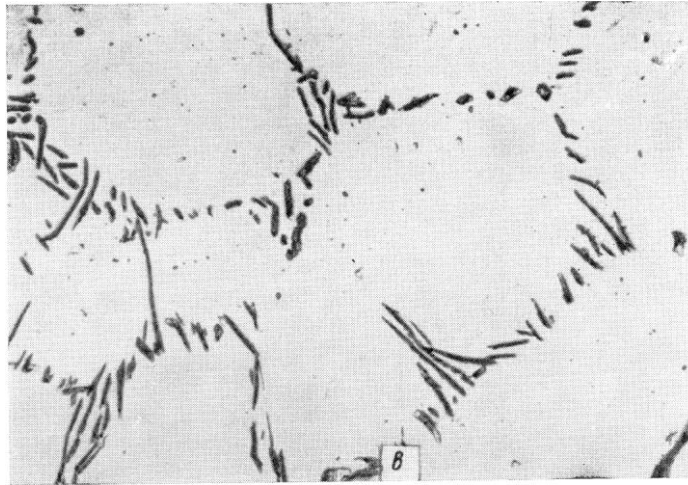


Рисунок 3.11 - Фаза  $Al_3Fe$  в алюмінії марки А5,  $\times 300$ ;

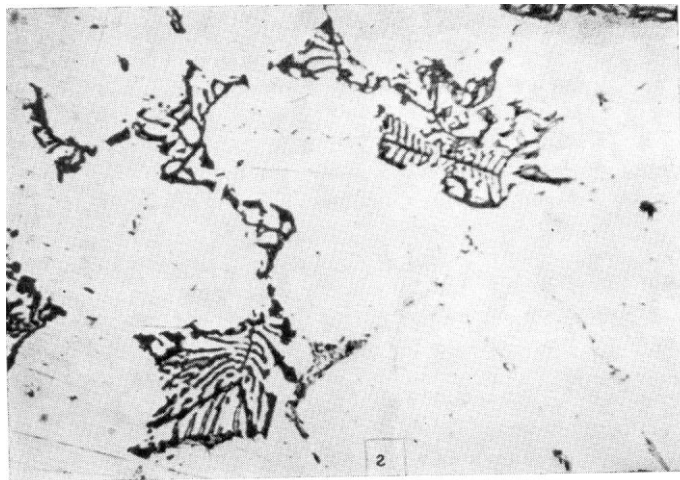


Рисунок 3.12 - Фаза  $AlFeSi$  в алюмінії марки А5,  $\times 150$ ;

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.3.13). 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: у край малий вертикальний інтервал кристалізації твердого розчину, що становить  $0,5 - 1^\circ \text{C}$ ; значна довжина горизонтального інтервалу кристалізації, що приводить при нерівновагих умовах кристалізації до усередині кристалітної ліквідації; відносно висока розчинність марганцю при евтектичній температурі і різке зниження цієї розчинності в області температур  $450-550^\circ \text{C}$ , що охоплює весь діапазон температур термічних обробок (рис.3.14).

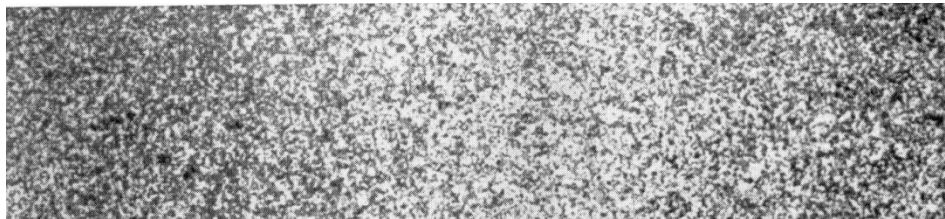


Рисунок 3.13 - Макроструктура плоского злитка сплаву АМц

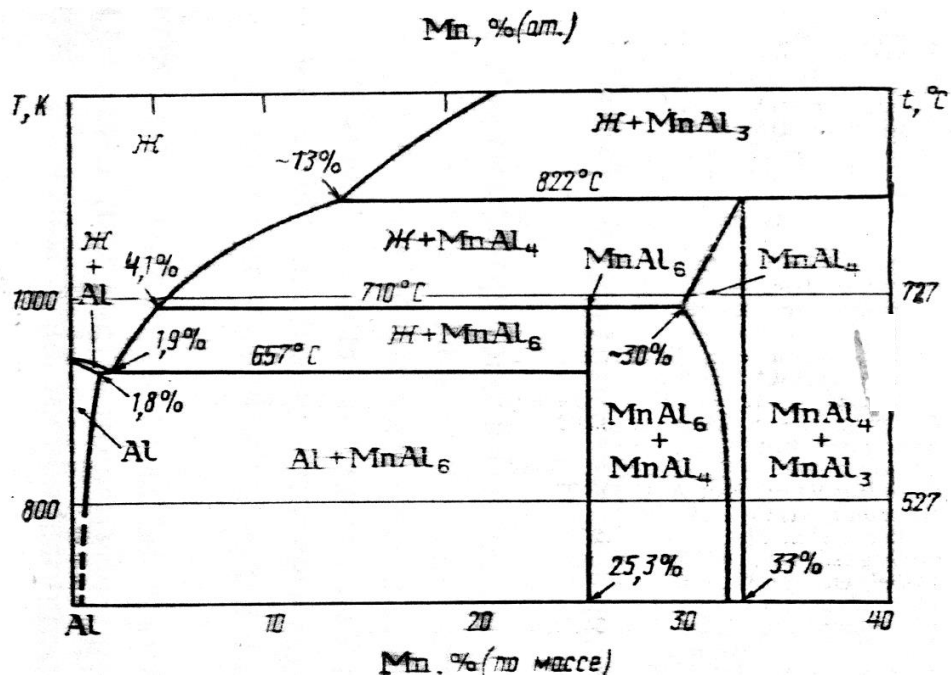


Рисунок 3.14 - Діаграма стану Al - Mn

При швидкому охолодженні та високих швидкостях кристалізації Al – Mn-сплавів відбувається перенасичення  $\alpha$ -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  $\alpha$ -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  $\alpha$ -твердому розчині.

Фаза  $Al_6Mn$  (25,34% Mn) (рис. 3.15) рівноважна з алюмінієм, має орторомбічну решітку з параметрами  $a = 6,49 \div 6,51 \text{ \AA}$ ,  $b = 7,54 \div 7,57 \text{ \AA}$ ,  $c = 8,86 \div 8,87 \text{ \AA}$ ;  $HV$  5400-5600  $\text{MN}/\text{mm}^2$  майже постійна до  $427^\circ\text{C}$  і потім швидко знижується. Теплота утворення становить 15  $\text{kJ}/\text{mole}$ . Фаза  $Al_6Mn$  утвориться по перитектичній реакції при  $710^\circ\text{C}$  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  $a = 28,4 \text{ \AA}$ ,  $c = 12,4 \text{ \AA}$ ; твердість фази 7800  $\text{MN}/\text{mm}^2$ . При більше високому вмісті марганцю утвориться кілька інших фаз.

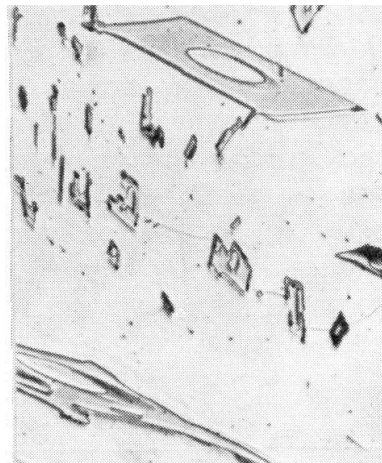


Рисунок 3.15 - Фаза  $Al_6Mn$  у модельному сплаві системи Al – Mn,  $\times 300$ .

Фаза  $Al_6Mn$  може розчиняти в собі значні кількості заліза; у результаті з'являються грубі пластинчасті кристали твердого розчину Fe і  $Al_6Mn$  – фаза

$Al_6(FeMn)$ , що різко знижує пластичні властивості сплаву. Якщо в сплаві домішки заліза і кремнію присутні одночасно, то поряд із кристалами  $Al_6Mn$  виявляється потрійне з'єднання кістякообразної форми  $\alpha$  ( $AlMnSi$ ) може виникнути також фаза  $\alpha$  ( $AlMnFeSi$ ).

При безперервному литті сплавів, що містять марганець, більша частина марганцю виявляється у твердому розчині, що первинно кристалізується, що не розпадається при охолодженні злитка. Такий твердий розчин є пересиченим щодо марганцю не тільки при кімнатній температурі, але й при температурних порядку  $400-500^{\circ}C$ , оскільки рівноважна розчинність марганцю при цих температурах не перевищує 0,3%.

В процесі гомогенізації, нагрівання злитка перед обробкою тиском, гарячої деформації відбувається розпад твердого розчину марганцю в алюмінії з виділенням часток марганцевистих хімічних сполук. Структура злитка, отриманого методом безперервного лиття, складається із зерен пересиченого  $\alpha$ -твердого розчину марганцю в алюмінії із включеннями алюмінієво-марганцевої фази по границях дендритних осередків. Периферія дендритних осередків містить значно більше марганцю, чим центральні зони. Тому при нагріванні злитків у результаті розпаду твердого розчину марганцю в алюмінії по границях осередків утвориться значно більше продуктів розпаду, чим у центрі (рис.3.16).

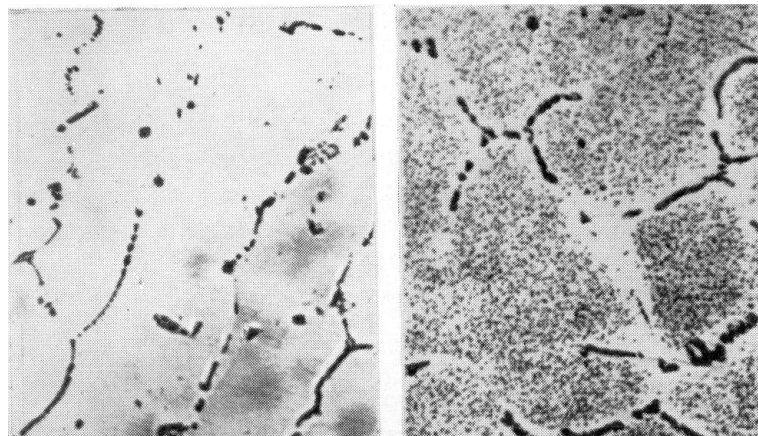
*a**б*

Рисунок 3.16 - Мікроструктура плоского злитка сплаву АМц: а - без гомогенізації,  $\times 300$ ; б - після гомогенізації,  $\times 300$ .

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 Д16 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
Д16	4,2	1,35	0,42	0,15	0,25	0,08	0,024	0,01
1163	4,3	1,42	0,45	0,09	0,13	0,08	0,025	0,01

Сплави цього типу сполучать у собі гарну оброблюваність тиском і високі механічні властивості, що досягають при зміцненні шляхом термічної обробки – загартування та природного старіння. Основну роль у процесах їхнього зміцнення відіграють роль фази:  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Фаза S робить більше ефективний вплив на зміцнення сплаву Д16, чим інші фази ( $\text{CuAl}_2$  або  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ). Кількість фази S у сплаві Д16 залежить від вмісту магнію. Для її утворення необхідно мати співвідношення міді й магнію, рівним 2,6:1. При надлишку міді буде утворюватися також фаза  $\text{CuAl}_2$ , а при значній кількості кремнію –  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . На рис. 3.17. показано розташування промислових сплавів у системі Al - Cu - Mg, а в табл. 4.3 дається ймовірний фазовий состав цих сплавів.

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

Марка сплаву	Стабільні фази	Метастабільні фази
Д16	$\text{Al}_2\text{CuMg}$ , $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,	$(\text{AlCu})_6$ , $(\text{MnFe})\text{Cu}$ , $\text{Al}(\text{MnFe})\text{Si}$ ,

	$\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ , $\text{Mg}_2\text{Si}$	$(\text{FeMn})\text{Al}_6$
1163	$\text{Al}_2\text{Cu}$ , $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ , $\text{Al}_2\text{CuMg}$ , $\text{Mg}_2\text{Si}$	$(\text{AlCu})_6$ , $(\text{MnFe})\text{Cu}$ , $\text{Al}(\text{MnFe})\text{Si}$ , $(\text{FeMn})\text{Al}_6$

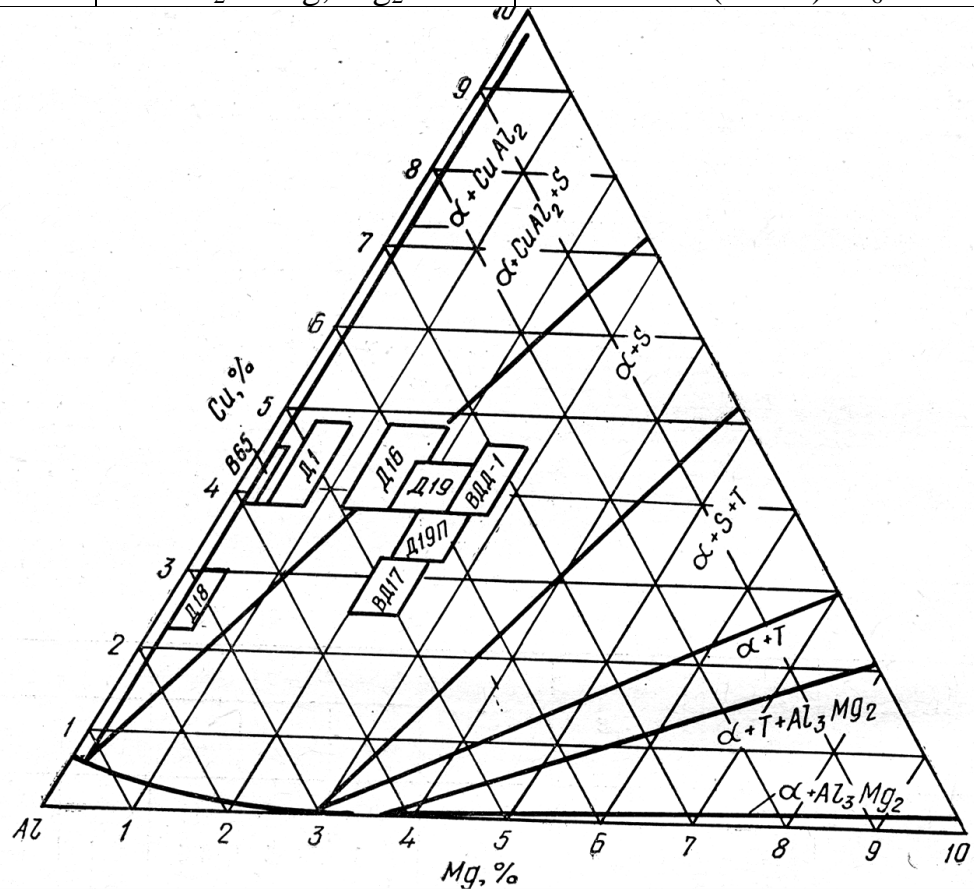


Рисунок 3.17 - Розташування промислових сплавів у системі Al – Cu – Mg і розподіл фазових областей при 200°C.

У злитках сплаву Д16 звичайно є деяка кількість нерівновагої потрійний евтектики  $\alpha + \text{CuAl}_2 + \text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ , що плавиться при 507°C. Сплав 1163 має дуже мало потрійний евтектики  $\alpha + \text{CuAl}_2 + \text{S}$  і найбільш легкоплавкої складової в ньому є евтектика  $\alpha + \text{Mg}_2\text{Si} + \text{CuAl}_2$  з температурою плавлення 517°C. Тому сплав 1163 менш схильний до перевитрати, чим сплав Д16.

Із цих сплавів відливають плоскі, круглі та порожні злитки. Макроструктура плоских і круглих злитків однорідна, дрібнозерниста (рис.3.18). Спостерігається деяка відмінність у макроструктурі порожніх злитків. На макрошліфах видні пояси, що чергуються, дрібного та крупного зерна, які можуть бути викликані рухом металу в лунці за рахунок падіння

вступник у лунку металу. По периферії злитків (у поверхневому шарі) розташовуються ликваційні наплави або продукти зворотної ліквідації – зони, збагачені легкоплавкій складовій. Концентрація міді й магнію в ликвітах у кілька разів вище, ніж в основному металі.

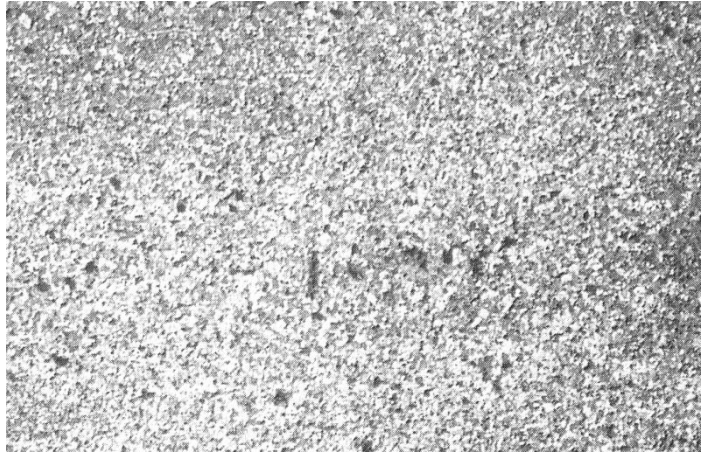
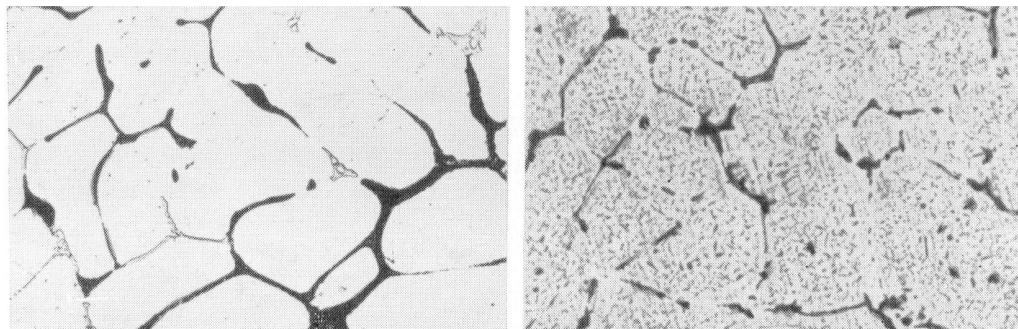


Рисунок 3.18 - Макроструктура плоского злитка сплаву Д16

На фотографіях мікроструктури видні світлі великі ділянки, що представляють собою дендритні осередки твердого розчину на основі алюмінію. По їхніх границях розташовуються складні нерівновагі евтектики, до складу яких входять наступні основні фази:  $\text{CuAl}_2$ , S,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , T (AlCuMn),  $\alpha(\text{AlFeSi})$ .

З метою одержання більше однорідної структури і, отже, підвищення пластичності злитки піддають гомогенізующому відпалу. У процесі гомогенізації частки  $\text{CuAl}_2$  і S розчиняються у твердому розчині й состав твердого розчину в межах одного зерна вирівнюється (рис. 3.19).



*a*

*б*

Рисунок 3.19 - Мікроструктура плоского сплаву Д16: а - без гомогенізації,  $\times 200$ ; б - після гомогенізації,  $\times 200$ .

При гомогенізації відбувається також розпад пересиченого твердого розчину марганцю в алюмінії з виділенням дисперсних часток фази Т (AlCuMn). Величина й форма залізистих фаз –  $\alpha$  (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 грат, Å			Щільність $г/см^3$
CuAl <sub>2</sub>	тетрагональна	Голки (110)	6,052	–	4,878	–
Mg <sub>2</sub> Si	кубічна	Октаедри (111), іноді зрізані по гранях куба (100)	6,391	–	–	–
Al <sub>2</sub> CuMg	орторомбічна	Голки (0,10), (0,21)	4,00	9,23	7,14	–
Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe	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 <sub>6</sub>	ромбічна	–	6,498	7,55	8,87	3,27
AlMnSi	кубічна	Куби (100)	12,63	–	–	3,55
Al <sub>6</sub> Mg <sub>4</sub> Cu	кубічна	Ромбічні додекаэдре (100), зрізані по гранях кубу (100)	14,28	–	–	–
Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>	кубічна	–	28,16	–	–	2,24
FeAl <sub>3</sub>	моноклінна	–	15,49	8,08	12,48	3,57
AlFeMnSi	кубічна	Ромбічні додекаедри (100)	12,63	–	–	–

### 3.4. Режими термічної обробки сплавів

З метою вивчення впливу хімічного складу алюмінієвих сплавів і умов проведення їхньої термічної обробки на величину зерна використано дробовий факторний експеримент по методу Бокса-Уилсона розглянутого в роботі [2].

Потрібно вибрати оптимальний режим термообробки алюмінієвих сплавів з метою забезпечення дрібнозернистої структури не більше 90 мкм.

Параметр оптимізації (Y) – середній розмір зерна ( $\bar{d}_3$ ).

Для визначення вплив коливань хімічного складу в межах технічних умов на величину зерна було використано в дослідженні алюмінієві сплави різних систем: технічний алюміній (А5М), сплав алюмінію з марганцем (АМц2), конструкційні сплави типу дуралюмін з різним вмістом міді й магнію (Д16 і 1163).

Розмір зерна оцінювали методом січних (ДСТ 21073.3-75). Для визначення величини зерна методом підрахунку перетинань зерен поверхня шліфа переглядають і вибирають не менш двох типових місць. На кожному місці роблять не менш двох одиничних вимірів. Визначення величини зерна робили при такій збільшенні, щоб у поле зору перебувало цілком 80-200 зерен. Для вимірів застосовують січні лінії у вигляді двох непаралельних прямих або окружності. Пряма січна повинна перетинати не менш 10 зерен, а січна у вигляді окружності - не менш 20 зерен. Січні лінії наносяться на зображення вимірюваного місця, спостережуване на матовому склі мікроскопа, на мікрофотографії або безпосередньо в окулярі мікроскопа. У роботі використався горизонтальний мікроскоп МІМ-8 з окуляром зі шкалою поставлений зображеннями, які використалися в якості січних.

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



### *Результати дослідження та їхній аналіз*

*Вплив хімічного складу на величину зерна.* Зміна вмісту Mn від 0,005 до 1,4 % (у межах технічних умов), не впливало на величину зерна листів товщиною 0,5-0,8 мм, прокатаних зі ступенем холодної деформації  $\varepsilon = 25\%$  і  $\varepsilon = 75\%$ .

При зміні вмісту Fe від 0,13% (у сплаві 1163) до 0,7% (у сплаві АМц2) також не виявлено закономірної зміни середнього розміру зерна в листах. Треба однак відзначити, що збільшений вміст заліза в сплаві АМц позитивно впливає на здрібнювання зерна.

Сильно впливають на здрібнювання зерна кремній і магній. Різка зміна сумарного вмісту Si+Mg від 0,065% (у сплаві А5М) до 1,5% (у сплаві Д16) сильно відобразилося на величину зерна. Середній розмір зерна перебував у межах 27-79 мкм для сплаву Д16 і 32-84 мкм для сплаву А5М.

Однак помітний вплив зміни хімічного складу сплавів А5М, АМц, Д16 і 1163 у межах, передбачених стандартом, на середній розмір зерен, а також великий розкид їхніх величин свідчить про те, що істотну роль у формуванні зернистої структури грають технологічні особливості виробництва листів, особливо режими відпалу і ступінь холодної деформації. Проблемі крупного зерна в листах з алюмінієвих сплавів присвячені численні роботи, наприклад [2-3].

*Вплив пластичної деформації та термічної обробки на величину зерна.* Дрібне зерно стабільно виходить у загартованих листах при всіх дослідженнях ступенях деформації, крупне зерно може утворитися при неправильно обраних режимах відпалу [2].

Аналіз результатів дослідження (рис. 3.20-3.21) показав, що зі збільшенням ступеня деформації розмір зерна в листах зменшується, особливо істотно при ступені деформації більше 50%. При цьому значний вплив робить режим остаточного відпалу. Зокрема відпал при 360<sup>0</sup>С дає істотно кращі результати, ніж відпал при 420<sup>0</sup>С.

Із сказаного виходить, що вирішальний вплив на величину зерна робить остаточний відпал, причому і у цьому випадку оптимальною термічною обробкою є температура 360-390 °С, особливо при досить тривалій витримці.

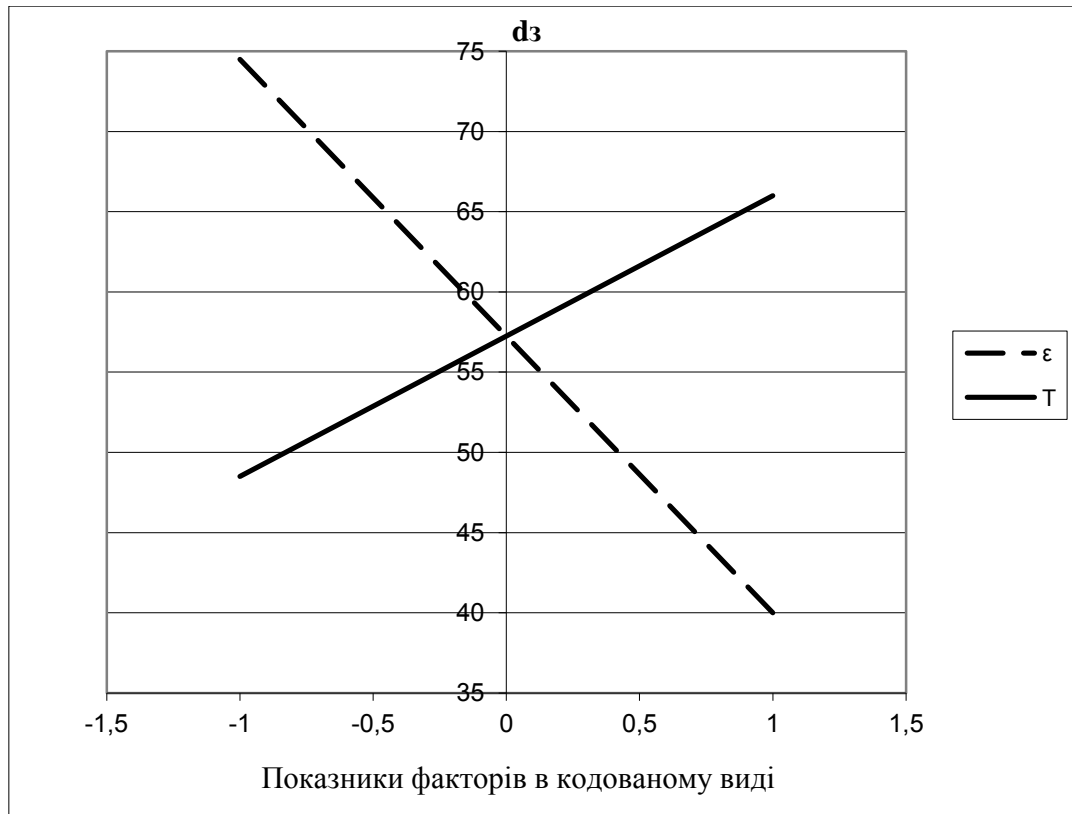


Рисунок 3.20 - Графічна залежність середнього розміру зерна ( $\bar{d}_z$ ) від температури відпалу (Т) і величини відносного обтиснення ( $\epsilon$ ) для сплаву А5М

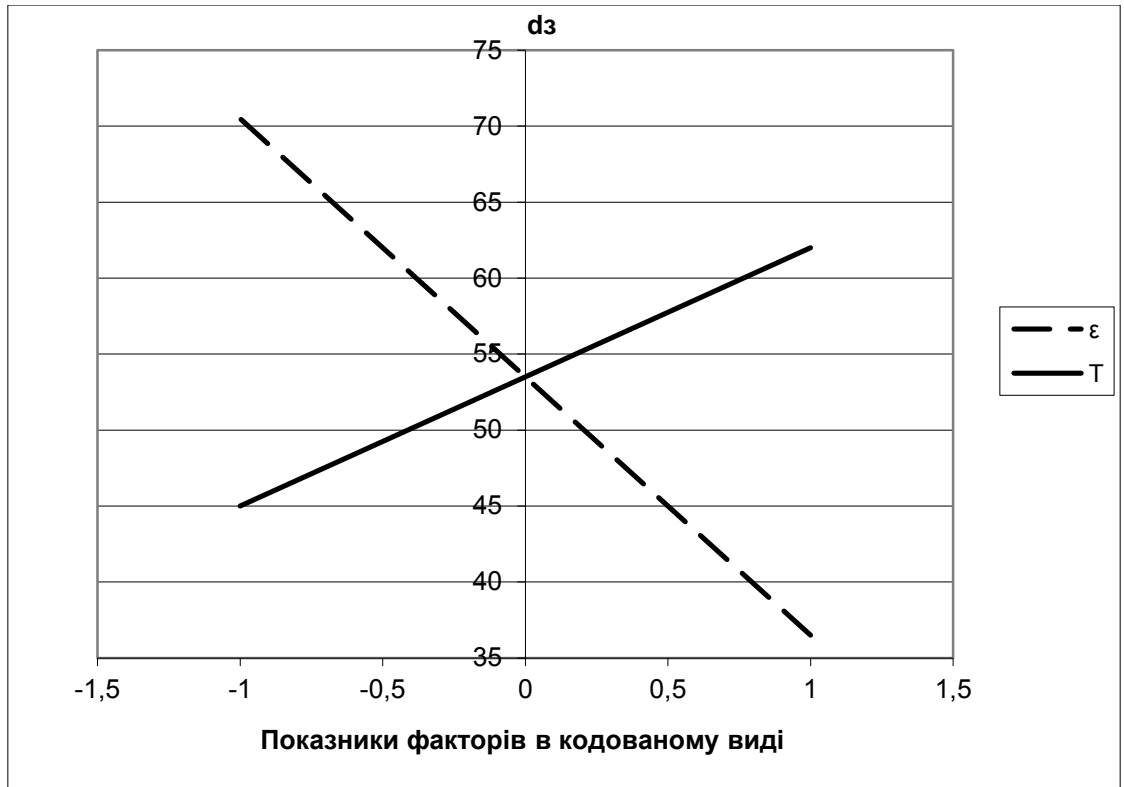


Рисунок 3.21 - Графічна залежність середнього розміру зерна ( $\bar{d}_3$ ) від температури відпалу (T) і величини відносного обтиснення (ε) для сплаву АМц2.

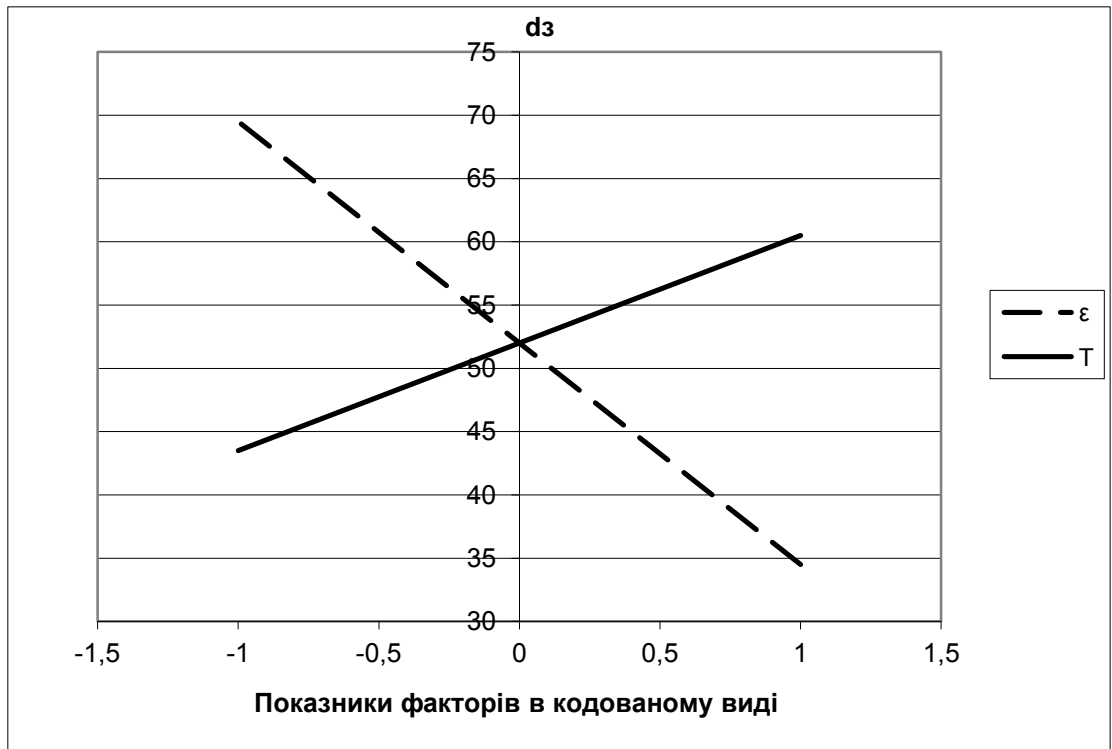


Рисунок 3.22 - Графічна залежність середнього розміру зерна ( $\bar{d}_3$ ) від температури відпалу (Т) і величини відносного обтиснення ( $\epsilon$ ) для сплаву Д16.

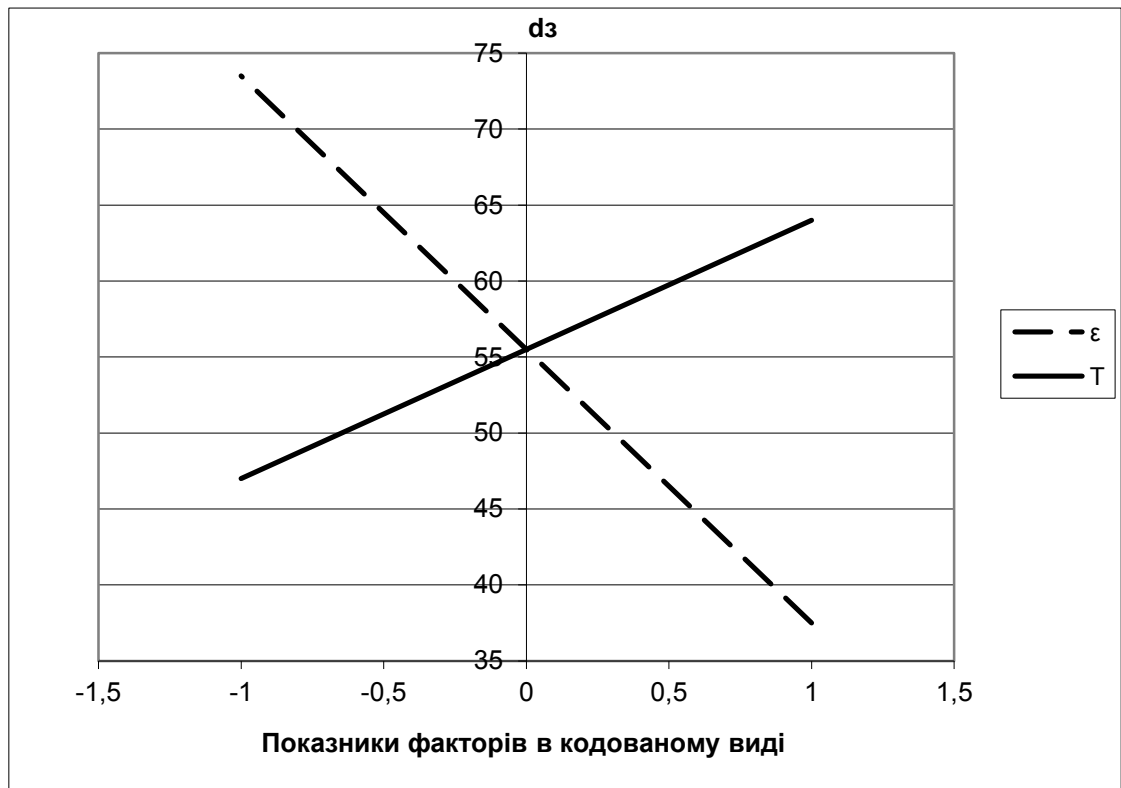
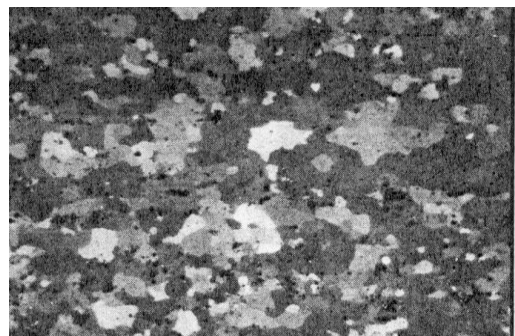


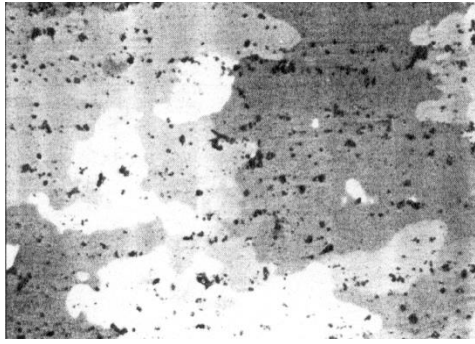
Рисунок 3.23 - Графічна залежність середнього розміру зерна ( $\bar{d}_3$ ) від температури відпалу (Т) і величини відносного обтиснення ( $\epsilon$ ) для сплаву 1163.



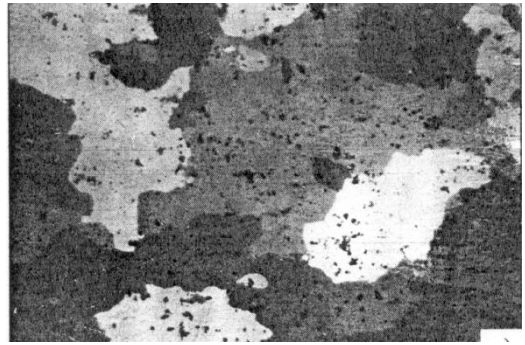
1



2

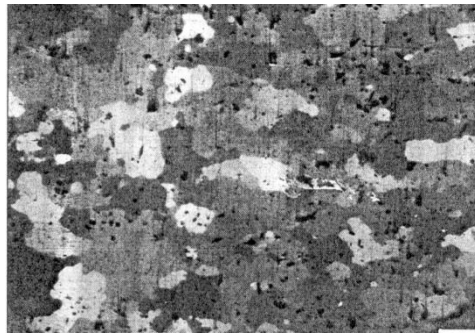


3

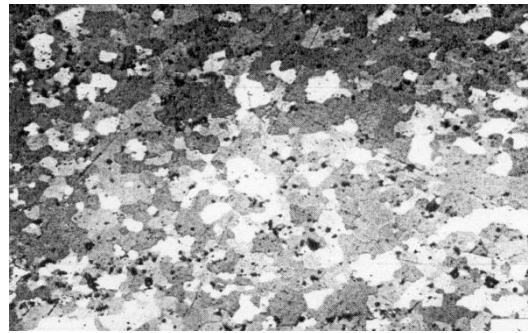


4

Рисунок 3.24 - Структура сплаву А5М після остаточного відпалу відповідно до проведеним досвідам у матриці планування



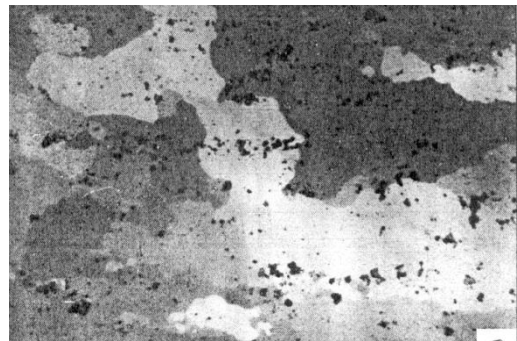
1



2

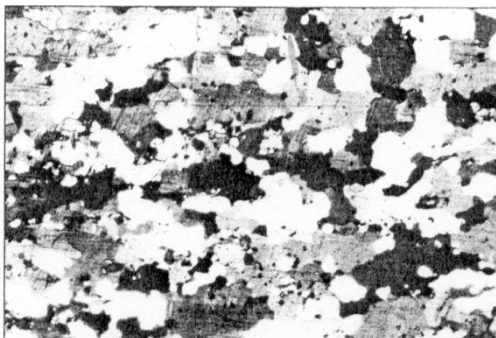


3

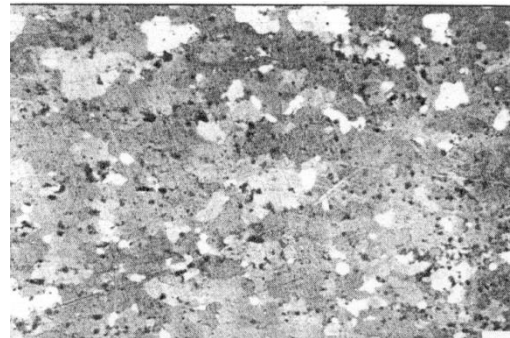


4

Рисунок 3.25 - Структура сплаву АМц2 після остаточного відпалу відповідно до проведеним досвідам у матриці планування



1



2

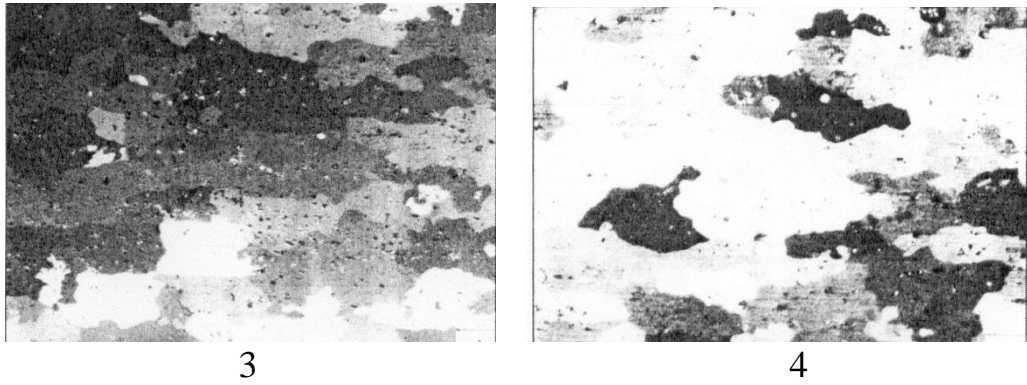


Рисунок 3.26 - Структура сплаву Д16 після остаточного відпалу відповідно до проведеним досвідам у матриці планування

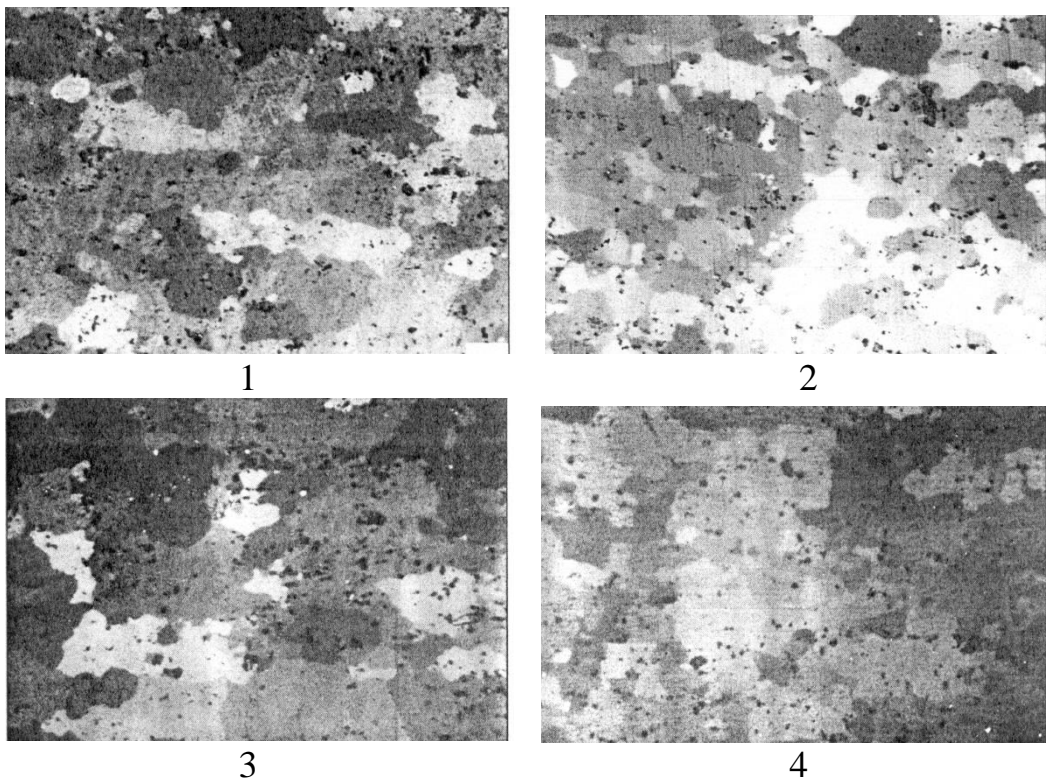


Рисунок 3.27 - Структура сплаву 1163 після остаточного відпалу відповідно до проведеним досвідам у матриці планування

### 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, °С	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, °С	±10
6	Середовище в робочому просторі	Повітря
7	Діапазон автоматичного регулювання температури, °С	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 корпусу 1 (рис.3.28), у верхній частині якого змонтована робоча камера, а в нижній частині - електричний блок 9.

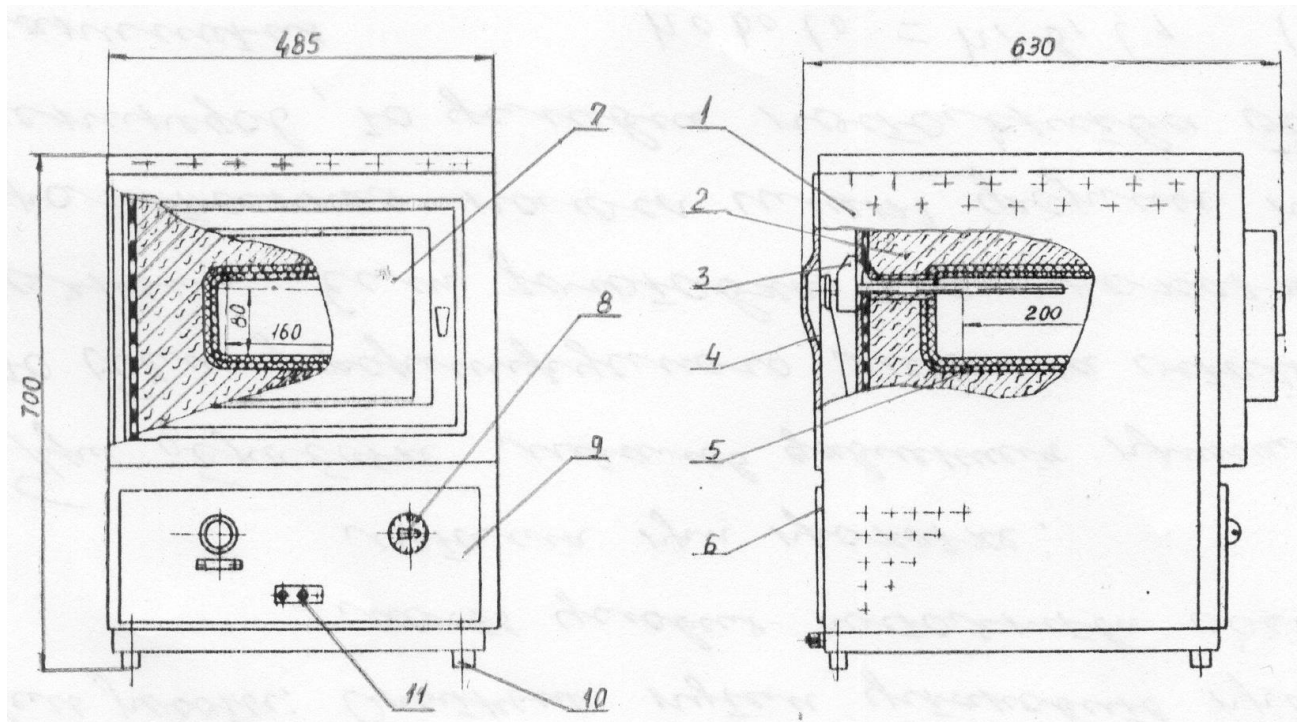


Рисунок 3.28 - Електропіч СНОЛ-1,6.2,0.0,8/9-М1 (габаритне креслення): 1 - корпус; 2 - теплоізоляція; 3 - терморегулятор; 4 - задній лист; 5 - вузол нагрівача; 6 - лист; 7 - дверцята; 8 - ручка терморегулятора; 9 - блок електричний; 10 - опора; 11 - перемикач.

У робочій камері перебувати вузол нагрівача 5 (рис.3.29), 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 плинні 3-5 годин);
- б) при  $70^{\circ}\text{C}$  (у плинні 8-10 годин);
- в) при температурі  $150^{\circ}\text{C}$  (у плинні 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.



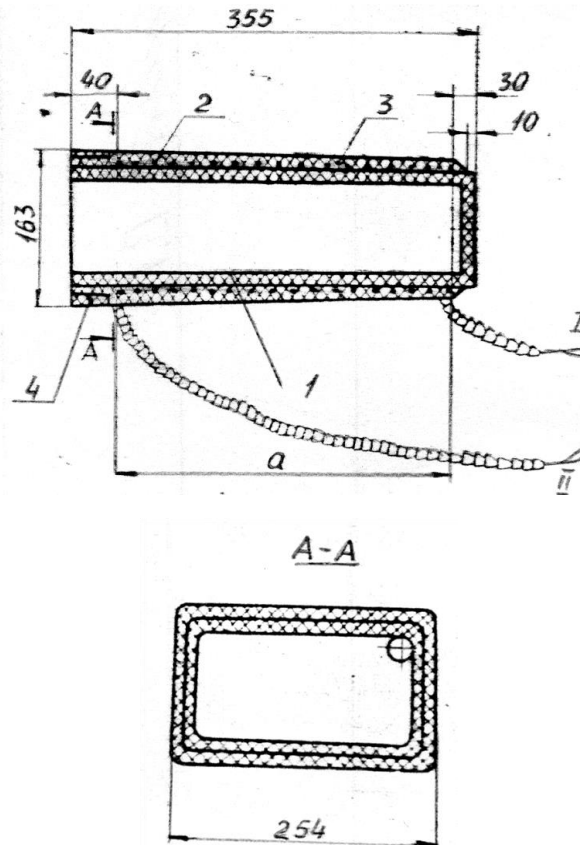


Рисунок 3.29 - Вузол нагрівача: 1 - муфель; 2 - нагрівач; 3 - обмазка; 4 - прокладка; а - зона намотування нагрівача; крок - 3,8 мм.

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.

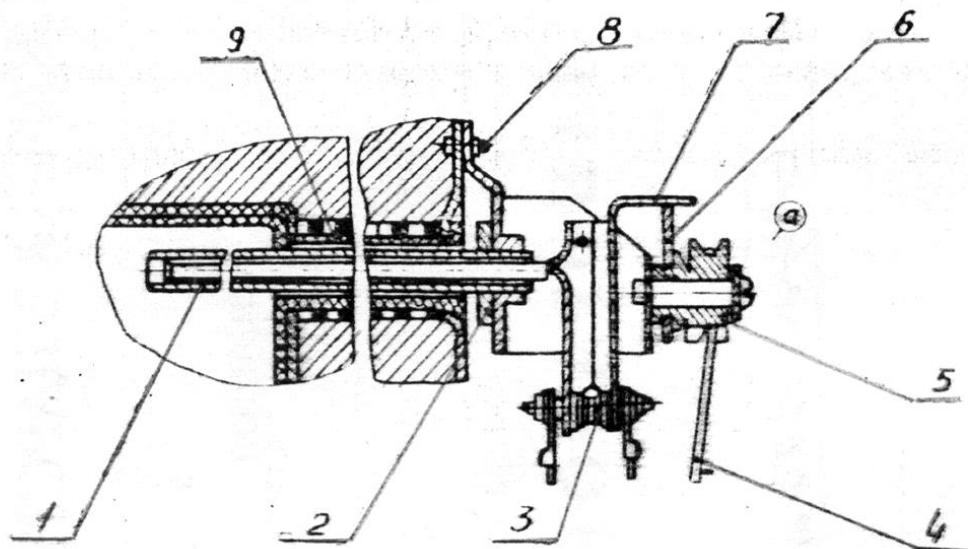


Рисунок 3.30 - Терморегулятор: 1 - трубка; 2 - контргайка; 3 - контакти; 4 - канат; 5 - шків; 6 - ексцентрик; 7 - важіль; 8 - гвинт; 9 - втулка керамічна.

До роботи з електропечю допускається тільки спеціально навчений персонал, що знає конструкцію й правила обслуговування печі, принцип дії встановленої на ній електроапаратури 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 і магнієвих сплавів через плоскі форкамерні матриці. Математичне моделювання плоского напружено-деформованого стану з урахуванням реологічних властивостей алюмінієвих сплаву AA6060, при температурних умовах пресування дозволило провести аналіз розподілу швидкостей в зоні деформації. Визначено спільний вплив на нерівномірність швидкостей у вихідному перерізі та характеристики вигину штаби, що пресується, комплексу безрозмірних параметрів конструкції плоских форкамерних матриць, у тому числі ступінчастих: співвідношення розмірів форкамери, ексцентриситету каналу, зміщення осі форкамери щодо осі каналу, а також коефіцієнта витяжки. Використання скінчено-елементної програми розрахунку об'ємного напружено-деформованого стану дозволило визначити основні кінематичні характеристики складного формозмінення при пресуванні тонкостінних прес-виробів через форкамерні матриці. Встановлено вплив на розподіл швидкостей витікання положення каналу на дзеркалі матриці з урахуванням кута між елементами профілю, співвідношення товщини елементів і геометричних розмірів форкамери.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища

При виробництві поковок на пресі на заводі існують наступні небезпечні і шкідливі виробничі чинники:

1. Шкідливі хімічні речовини;
2. Пил;
3. Вібрація;
4. Шум, що виникає при роботі устаткування.
5. Теплозбитки до 500 °С;
6. Електричний струм ;
7. Деталі механізмів, що обертаються і рухомі.

Нагрітий до 500°С метал приводить до виникнення таких шкідливих чинників, як зайве тепло і інфрачервоне випромінювання. Згідно цеховим вимірам інфрачервоне випромінювання перевищує 2000 Вт/м<sup>2</sup> і відноситься до третього класу.

#### *Вплив теплозбитків на організм людини*

Тривалий вплив високої температури із значною вологістю може привести до накопичення тепла в організмі і до гіпертермії – стану, при якому температура тіла підвищується до 38-40 °С. При гіпертермії, і як наслідок, тепловому ударі, спостерігається головний біль, запаморочення, загальна слабкість, зміна світлового сприйняття, сухість в роті, нудота, блювота, потовиділення. Пульс і частота дихання прискорюються, в крові зростає зміст залишкового азоту і молочної кислоти. Спостерігається

блідість, синить шкіри, зіниці розширені, іноді виникають судороги, втрата свідомості.

#### *Вплив виробничого пилу на організм людини*

Виробничий пил може надавати на людину фіброгенні дії, при якій в легенях відбувається розростання сполучних тканин які порушують нормальну будову і функцію органів. Шкідливість виробничого пилу обумовлена її здатністю викликати професійні захворювання легенів, в першу чергу пневмоконіози.

#### *Вплив вібрації на організм людини*

Вібрація викликає порушення фізіологічного і функціонального стану людини. Стійкі шкідливі фізіологічні зміни називають вібраційною хворобою. Симптоми вібраційної хвороби виявляються у вигляді головного болю, оніміння пальців рук, біль в кистях і передпліччі, виникають судороги, підвищується чутливість до охолодження, з'являється безсоння.

Функціональні зміни, пов'язані з дією вібрації на людину – оператора – погіршення зір, зміни реакції вестибулярного апарату, виникнення галюцинацій, швидка стомлюваність.

Шум, що виникає при роботі устаткування по цехових вимірах відноситься до другого класу з рівнем 100 дБ. Допустимий рівень не повинен перевищувати 80 дБ (при частоті 1000Гц).

#### *Вплив шуму на організм людини*

Впливаючи на кору головного мозку, шум надає дратівливу дію, прискорює процес стомлення, ослабляє увагу і уповільнює психічні реакції.

Також небезпечним чинником (дія електричного струму) в цеху є електромостові крани. Завантаження заготовок в колодязі сповільненого охолодження і у вагони проводиться електромостовими кранами, під час

роботи яких потрібне неухильне дотримання правил безпеки, порушення яких може привести до травматизму.

### *Дія електричного струму на організм людини*

Проходячи через тіло людини електричний струм надає термічну, електролітичну і механічну дію.

Безпечною силою змінного струму частотою 50 Гц є 0,01 А ; постійного струму 0,05 А. Смертельною є сила струму 0,1 А.

Термічна дія струму виявляється через опіки окремих ділянок тіла, нагрівання до високої температури ділянок судин, нервів серця, мозку і інших органів, які знаходяться на шляху струму, що викликає в них істотні функціональні порушення.

Електрична дія струму характеризується розпадом органічної рідини, у тому числі і крові, що супроводжується значними змінами їх фізико-хімічного складу.

Механічна дія – це розшарування, розриви і інші подібні пошкодження тканин організму, зокрема м'язів, стінок кровинозних судин, судин легеневої тканини внаслідок електродинамічного ефекту, миттєвого вибухоподібного утворення пари від перегріву струмом рідини і крові.

## **4.2 Заходи захисту від небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища**

На виробництві застосовуються наступні технічні засоби забезпечення безпеки праці: захисні пристрої, що створюють перешкоду між людиною і небезпечним чинником, що надійно оберігають що працює незалежно від правильності або не правильності його дій; запобіжні пристрої на випадки аварійних режимів – відключення устаткування при порушенні контрольованого параметра (температури, тиск, переміщення, величини

струму або напруги, зусилля); гальмівні пристрої для швидкої зупинки рухомих частин машин і устаткування; блокувальні пристрої, що забезпечують фіксацію частин механізму в певному стані; сигналізація про наступаючою або такою, що наступила небезпекою (світлова, звукова, кольорова і знакова). Велике значення має правильний розподіл функції між людиною і машиною в цілях зменшення тяжкості праці.

Для видалення зайвого тепла, що виникає від нагрітого до 500°C металу, використовуються аераційні ліхтарі, які встановлені у фермах перекриття виробничої споруди. Також на постах управління встановлюються кондиціонери КД-26 для подачі охолодженого повітря на робоче місце оператора. Для зменшення дії тепла пости обладнані тепловідвідними екранами.

Агрегат обслуговується великою кількістю електроустаткування, яке при недбалому відношенні може привести до поразки електричним струмом. Всі електродвигуни і допоміжне устаткування, що працює з великою напругою (до 1000 В), окрім того захисту, який передбачений при монтажі устаткування, повинна бути забарвлена в застережні кольори і в небезпечних ділянках поразки електрострумом повинні бути встановлені плакати і таблички, застережливі про небезпеку.

Для зменшення рівня шуму і приведення його до низькочастотного пропонується забезпечити робочі засобами індивідуального захисту від шуму - навушники або "Берущі". Для зменшення шуму все устаткування встановлюється на віброгасних підставах. Також для зменшення шуму обладнати пости звукопоглинальною ізоляцією.

Для запобігання отриманню травм від деталей, що обертаються, і механізмів необхідно встановити огорожі і кожухи не тільки з боків, але і зверху. Запобіжні кожухи повинні бути дуже міцними, щоб витримувати удари шматків муфт, що розірвалися. Захисні огорожі і захисні кожухи повинні бути обладнані блокуваннями, для неможливості включення механізму при знятій огорожі або кожусі. Для зручності обслуговування

механізмів передбачені містки і майданчики. Для попередження травматизму в цеху існує чітка система проходів з виділеними зонами для пішохідного руху з необхідною розміткою, покажчиками і освітленням, містками над рольгангами і іншими небезпечними ділянками.

Всі робочі забезпечуються спецодягом, спецвзуттям, касками і іншими засобами захисту, а також змиваючими і знешкоджуючими засобами.

### 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 - 11 м;
- подовжній: довжина - 300 м, ширина - 48 м, висоту - 11 м

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 –  $H_p = 11$  м. Коефіцієнт запасу приймаємо до  $= 1.3$ .

Визначаємо показник приміщення:

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

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

Коефіцієнт використання освітлювальної установки при  $R_{ст} = 30\%$  і  $R_{п} = 50\%$ , приймаємо  $\eta = 0.46$ , відношення  $L / H_p$  приймаємо:  $L / H_p = 1.6$ . 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 (С34ДРЛ – 400 ) ;

би. у поперечному прольоті  $183/10 \approx 18$  шт, всього 72 світильники (С34ДРЛ – 400) ;

Загальна кількість світильників - 192 шт.

Знаходимо світловий потік для однієї лампи:

$$F_{л} = \frac{E_{\min} \cdot S \cdot k}{\eta \cdot n}, \text{ лм} \quad (4.2)$$

де  $S$  - освітлена площа;

$n$  - кількість світильників.

Подовжній проліт:

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

Поперечний проліт:

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

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

подовжній проліт:

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

поперечний проліт:

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

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

## **5 ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ПРОБЛЕМИ**

### **5.1 Економічні аспекти дослідницької проблеми**

У економічній частині магістерської роботи визначена техніко-економічна ефективність реконструкції пресу 10 МН відповідно до переліку заходів, приведеного в експериментальній частині.

Продуктивність пресу 10 МН знаходиться на рівні 75849 тонн в рік. У роботі при розрахунку економічних показників приймаємо плановану продуктивність пресу 86467 тонн в рік.

Технічним рішенням магістерської роботи є змінити технологічний інструмент пресу з плоских матриць на форкамерні.

Капітальні вкладення на впровадження форкамерних матриць приймаємо в сумі 38 316 гривень.

Результати розрахунку собівартості 1т металу представлені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Калькуляція собівартості 1 тонни металу

Найменування	Од. вим.	За заводськими даними			За проектом			Відхил ення
		к-ть	ціна, \$	Велич. затрат, \$	К-ть	ціна, \$	Велич. затрат \$	
1.Задано	т	1.25	4359	5448,7	1.25	4359	5448,7	
2.Отходи	т	0.25		597,77	0.246		573,6	-24,17
Обрізь	т	0.22	2711	596,42	0.211	2711	572,02	-24,4
Чад і окалина	т	0.03	45	1,35	0.035	45	1,58	
Разом годного				4850			4875,1	25,1
3.Витрата по переділу:		1200	97,50	120,6	1200	97,5	120,6	
Витрата по зачистці		95.23	80.5	9,0	95,23	80.5	9,0	
Разом витрати по переділу				129,6			129,6	
Разом собівартість				6176,1			6151,9	-24,2

## 5.2 Розрахунок економічного ефекту

Визначаємо річний економічний ефект наміченої реконструкції по формулі :

$$E_{\text{річ}} = (C_1 - C_2) \cdot B_2 - E_n \Delta \text{КВ} \quad (5.1)$$

де  $E_{\text{річ}}$  – річний економічний ефект ;

$C_1, C_2$  - собівартість одиниці продукції відповідно в базовому і проектному варіанті ;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт порівняльної економічної ефективності капітальних вкладень (0,15);

$\Delta \text{КВ}$  – величина капітальних вкладень на виконання намічених заходів, грн.

$B_2$  – об'єм продукції , що випускається, в проектному варіанті ;

$$E_{\text{річ}} = (6176,07 - 6151,9) \cdot 10618 - 0,15 \cdot 387316 = 207352 \text{грн.}$$

Економічна ефективність капітальних вкладень:

$$E = E_{\text{річ}} / \text{КВ} ; \quad (5.2)$$

$$E = 207352 / 387316 = 0.535 \text{грн./грн.}$$

Термін окупності капітальних вкладень :

$$T = 1 / E \quad (5.3)$$

$$T = 1 / 0.535 = 1.85 \text{ роки}$$

Таблиця 5.2- Техніко-економічних показників

Показники	Базовий варіант	Проектний варіант	Відхилення
Річний об'єм виробництва, т.	758	864	+106
Собівартість однієї тонни металу, \$.	2176,1	2151,9	-24,2
Річний економічний ефект, \$.		2565,2	
Капітальні вкладення, \$.		4 750	
Економічна ефективність капітальних вкладень \$/\$.		0.535	
Терміни окупності, рік		1.85	

В результаті капіталовкладень на впровадження форкамерних матриць приймаємо в сумі 38 316 гривень. Термін окупності проекту 1 рік і 10 місяців.

## ВИСНОВОК

Огляд літературних джерел показує, що сучасний стан методів розрахунку пресового інструменту і технології виробництва спеціальних профілів з алюмінієвих і магнієвих сплавів не задовольняє потреби пресової промисловості внаслідок недостатнього забезпечення показників якості продукції. Це обмежує можливості використання процесу гарячого прямого пресування й робить розглянуту в роботі проблему актуальною.

Експериментальне дослідження нерівномірності деформації при багатоканальному пресуванні із різною температурою нагріву заготовки показало, що співвідношення швидкостей витікання тонкостінних профілів через матриці з форкамерами різної глибини може бути визначено як квадратична функція відстані від центра ваги каналу до осі матриці.

Встановлено, що для тонкостінних профілів, які пресуються через форкамерні матриці при великих коефіцієнтах витяжки, позаконтактна пластична деформація приводить до збільшення товщини прес-виробу в порівнянні з шириною каналу матриці.

При пресуванні через форкамерну матрицю температура металу штаби на 7...26 °С більша, ніж при використанні плоскої. З точки зору впливу на механічні властивості це приводить до незначного зниження границі текучості (на 3,5...5,5%) і відносного видовження після розриву (на 6...10%).

Встановлено, що пресування через форкамерну матрицю приводить до зменшення глибини залягання грубокристалічного ободка в порівнянні з використанням плоскої матриці. Середній розмір зерна в ньому становить 14...15 мкм, в основному металі 22...27 мкм.

В результаті капіталовкладень на впровадження форкамерних матриць приймаємо в сумі 38 316 гривень. Термін окупності проекту 1 рік і 10 місяців.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Данченко В.Н., Миленин А.А., Головка А.Н. Производство профилей из алюминиевых сплавов. Теория и технология. Днепропетровск : Системные технологии, 2002. 448 с.
2. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. Москва : Металлургия, 1967. 436 с.
3. Данченко О.В., Головка А.Н. Проблемы украинских производителей алюминиевых профилей. Металлургическая и горнорудная промышленность. 1999. № 4. С. 84-87.
4. Ерманок М.З., Фейгин В.И., Сухоруков Н.А. Прессование профилей из алюминиевых сплавов. Москва : Металлургия, 1977. 264 с.
5. Щерба В.Н., Райтбарг Л.Х. Технология прессования металлов. Москва : Металлургия, 1995. 336 с.
6. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. Москва : Металлургия, 1975. 447 с.
7. Перлин И.Л. Теория прессования металлов. Москва : Металлургия, 1964. 344 с.
8. Bauser M., Sauer G., Siegert K. Strangpressen. Düsseldorf : Aluminium Verlag, 2001. 908 s.
9. Grundlagen des Strangpressens / K. Müller et al. Expert verlag, 2003. 253 p.
10. Гильденгорн М.С., Керов В.Г., Кривонос Г.А. Прессование со сваркой полых изделий из алюминиевых сплавов. Москва : Металлургия, 1975. 240 с.
11. Hardouin J-P. Bearing Length Calculation by Control of Metal Flow Pressure. Proc. of Fifth International Extrusion Technology Seminar. Chicago : Editors Express, 1992. Vol. 1. P. 291-303.
12. Райтбарг Л.Х. Производство прессованных профилей. Москва :



- Металлургия, 1984. 264 с.
13. Scientific Quenching (BICS for short): the New Frontier. Aluminium Extrusion. 1998. № 1. P. 20.
  14. Cometal's BICS: No Banana, Full Quench on Hard Difficult, Fast Profiles. Aluminium Extrusion. 1998. № 2. P. 18-20.
  15. Равин А.Н., Суходрев Э.Ш., Дудецкая Л.Р., Щербанюк В.Л. Формообразующий инструмент для прессования и волочения профилей. Минск : Наука и техника, 1988. 230 с.
  16. Пат. 2258572 РФ, МКИ В 21с 25/02. Экструзионная матрица / Э.Д. Фелдкэмп (GB). № 2002129600/02; Заявл. 01.04.00; Оpubл. 20.08.05.
  17. Пат. 2255823 РФ, МКИ В 21с 25/02, В 21с 23/04, В 21 j 5/04, В 21 j 13/02. Способ прессования прямоугольных профилей из алюминиевых сплавов матрица для реализации данного способа / А.П. Петров и др. (РФ). № 2003136629/02; Заявл. 19.12.03; Оpubл. 10.07.05.
  18. Пат. 1826236 РФ, МКИ В 21с 25/02. Матрица для горячего прессования / А.А. Удалов и др. (РФ). № 4875647/27; Заявл. 03.08.90; Оpubл. 10.08.96.
  19. Пат. 2188727 РФ, МКИ В 21с 25/02. Матрица для прессования / В.Г. Смирнов и др. (РФ). № 2000120118/02; Заявл. 27.07.00; Оpubл. 10.09.02.
  20. Пат. 2243047 РФ, МКИ В 21с 25/02. Совершенствование технологии изготовления экструзионных матриц и связанных с этим процессом / Э.Д. Фелдкэмп (GB). № 98100302/02; Заявл. 04.07.96; Оpubл. 27.12.04.
  21. Гун Г.Я., Аверченко А.Ф., Стебунов С.А. К методике автоматизированного проектирования прессовых матриц. Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 7. С. 92-95.
  22. Миленин А.А. Математическое моделирование влияния параметров рабочих поясков на течение металла при прессовании. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2000. № 1. С. 12-18.

23. 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.
24. Жолобов В.В., Зверев Г.И. Прессование металлов. Москва : Metallurgy, 1971. 456 с.
25. 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.
26. 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.
27. 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 Seminar. Chicago : Editors Express, 1996. Vol. 1. P. 101-106.
28. Головки О.М., Бобух К.О., Грідін О.Ю. Проблеми продуктивності та якості при виробництві алюмінієвих профілів. Metallurgical and Mining Industry. 2000. № 8-9. С. 417-420.
29. Матвеев Б.И., Журавский Е.Б. Расчет и конструирование одноочковых матриц для прессования профилей из деформированных сплавов. Москва : Оборонгиз, 1951. 214 с.