

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання
імені Є. О. Патона
Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

«На правах рукопису»
УДК _____

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО
Завідувач кафедри ВТМтаПМ
_____Юрій БОГОМОЛ
«__» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-науковою програмою «Матеріалознавство»
зі спеціальності 132 Матеріалознавство
на тему: «Переробка технологічних відходів алюмінієвих сплавів для
повторного використання у виробництві літальних апаратів»

Виконав:
Здобувач ВО II курсу, групи НН-31 мн
Сапон Юрій Вікторович

Науковий керівник:
д.т.н., професор
Лобода Петро Іванович

Консультант з охорони праці
та безпеки в надзвичайних ситуаціях:
завідувач кафедри ОППЦБ НН ІЕЕ,
д. т. н., професор Левченко Олег Григорович

Рецензент:
доцент кафедри, к.т.н.
Гурія Ірина Міранівна

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.
Здобувач ВО _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут
матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона
Кафедра високотемпературних матеріалів та
порошкової металургії

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-наукова програма «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ВТМтаПМ

_____ Юрій БОГОМОЛ

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію здобувачу ВО
Сапону Юрію Вікторовичу

1. Тема дисертації: «Переробка технологічних відходів алюмінієвих сплавів для повторного використання у виробництві літальних апаратів», науковий керівник роботи Лобода П. І., д.т.н, професор, затверджені наказом по університету від «21» 03 2025р. №1206-с.

2. Термін подання здобувачем ВО дисертації 21.05.2025 року.

3. Об'єктом дослідження є алюмінієвий сплав 1933.

4. Предметом дослідження є мікроструктура, хімічний аналіз, та механічні властивості.

5. Перелік завдань, які необхідно зробити:

– провести інформаційно-аналітичний огляд наукових джерел щодо методів переробки технологічних відходів алюмінієвих сплавів, зокрема у авіаційній галузі;

- розробити технологічний процес переробки відходів, включаючи стадії підготовки, переплавлення, рафінування та лиття;
- провести випробування зразків вторинного алюмінієвого сплаву, отриманого шляхом переплавлення, з метою визначення його хімічного складу, механічних властивостей, мікро- та макроструктури;
- здійснити порівняльний аналіз характеристик вторинного сплаву з первинним, відповідно до вимог авіаційного виробництва;
- розробити рекомендації щодо впровадження вторинних алюмінієвих сплавів у виготовлення авіаційних елементів конструкції;
- проаналізувати потенційні виробничі та екологічні ризики, пов'язані з переплавленням і використанням вторинних сплавів, та запропонувати заходи щодо їх мінімізації;
- сформулювати висновки за результатами експериментальних досліджень та зробити узагальнення щодо ефективності переробки.

6. Перелік ілюстративного матеріалу: рентгенофлуоресцентний аналізатор фірми «Елватех»; універсальна розривна машина; мікроскоп EPITIP CARL ZEISS; схема розкрою заготовки діаметром 75 мм; схема розкрою штамповки з заготовки $\varnothing 75$ мм; схема розкрою заготовки діаметром 28 мм; зовнішній вигляд литих пруткових заготовок з алюмінієвого сплаву 1933; зовнішня поверхня заготовки $\varnothing 75$ мм після обробки; нетравлені поперечні макрошліфи з донної та надливкової частин заготовки $\varnothing 75$ мм; травлені поперечні та поздовжні макрошліфи з заготовки $\varnothing 75$ мм; травлені поперечні макрошліфи з заготовки $\varnothing 28$ мм; порівняння травлених і нетравлених шліфів із заготовки $\varnothing 28$ мм та штамповки; штамповка з заготовки $\varnothing 28$ мм: зовнішній вигляд, шліф, макроструктура; зовнішній вигляд штамповок із заготовки $\varnothing 75$ мм; зовнішній вигляд штамповки зі сплаву Ак7ч без травлення; зразок після механічних випробувань зі зломом крихкого характеру; макроструктура штамповки з заготовки $\varnothing 75$ мм; мікроструктура штамповки на нетравленому темплеті $\varnothing 75$ мм; аналогічна мікроструктура з іншої зони деформації; мікроструктура зі зразка з лікваційними включеннями при $\times 80$ та $\times 320$;

мікроструктура заготовки $\varnothing 28$ мм при різних збільшеннях та підготовці;
мікроструктура штамповки з заготовки $\varnothing 28$ мм із травленням і без, у різних зонах деформації.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

1. Recycling of Aluminum Alloy Process Waste for Reuse in Aircraft Manufacturing [Electronic resource] // IXth International Materials Science Conference HighMatTech-2025. – 2025.

8. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Левченко О. Г., зав. каф. ОППЦБ НН ІЕЕ		

9. Дата видачі завдання 09.12.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літератури та написання літературного огляду	10.03	
2.	Аналіз макроструктури технологічних відходів в Центральній заводській лабораторії (далі ЦЗЛ)	27.03	
3.	Виготовлення литих пруткових заготовок	03.04	
4.	Дослідження мікро- та макроструктури, хімічного складу та механічних властивостей	17.04	
5.	Оформлення та розробка розділу охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	23.04	
6.	Оформлення роботи	05.05	
7.	Підготовка доповіді та презентації	15.05	
8.	Захист на засіданні ЕК	23.05	

Студент

Керівник

Юрій САПОН

Петро ЛОБОДА

РЕФЕРАТ

Дисертація вміщує: стор. 82; рис. 26; табл. 5; літ. джерел 54.

АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ВІДХОДИ, ВТОРИННА СИРОВИНА, ПЕРЕПЛАВЛЕННЯ, ШТАМПОВКА, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, МІКРОСТРУКТУРА.

Актуальністю роботи є підвищення ефективності використання алюмінієвих сплавів в авіаційному виробництві шляхом повторного використання технологічних відходів, що сприяє зменшенню собівартості виробів і екологічного навантаження на довкілля.

Метою роботи є дослідження можливості повторного використання відходів алюмінієвих сплавів (зокрема сплаву 1933) для виготовлення пруткових заготовок, які можуть застосовуватись у виробництві авіаційних компонентів.

Об'єктом дослідження є технологічні відходи алюмінієвого сплаву 1933.

Предметом дослідження є хімічний склад, мікроструктура та механічні властивості пруткових заготовок і штамповок із вторинного сплаву.

Методи дослідження: рентгенофлуоресцентний аналіз, випробування на розрив, металографічний аналіз, візуалізація мікроструктури, електропровідність.

Дослідні зразки отримано шляхом переплавлення відходів у печах САТ, обробки литих заготовок у галтовочному барабані, а також подальшого штампування. Проведено порівняння характеристик зразків із первинними сплавами. Встановлено, що механічні властивості вторинного матеріалу (міцність до 46 кгс/мм², відносне подовження до 14,4%) наближені до стандартних показників і відповідають вимогам для технологічного застосування. За результатами досліджень обґрунтовано доцільність використання вторинної сировини як альтернативи первинному матеріалу на етапі налагодження штампового обладнання та виготовлення допоміжних деталей.

ABSTRACT

The work contains: 82 pages; 26 drawings; 5 tables; 54 literary sources.

ALUMINUM ALLOYS, TECHNOLOGICAL WASTE, SECONDARY RAW MATERIALS, REMELTING, FORGING, MECHANICAL PROPERTIES, MICROSTRUCTURE.

The relevance of the work lies in improving the efficiency of aluminum alloy use in aviation manufacturing by reusing technological waste, which helps reduce product cost and environmental impact.

The aim of the research is to investigate the possibility of reusing aluminum alloy waste (specifically alloy 1933) to produce rod billets suitable for the manufacturing of aircraft components.

The object of the study is technological waste of aluminum alloy 1933.

The subject of the study is the chemical composition, microstructure, and mechanical properties of rod billets and forgings made from secondary alloy.

Research methods: X-ray fluorescence analysis, tensile testing, metallographic analysis, microstructure visualization, and electrical conductivity measurement.

The experimental samples were obtained by remelting waste in SAT furnaces, mechanical cleaning of the cast billets in a tumbling drum, and subsequent forging. The characteristics of the secondary alloy were compared with those of primary alloys. It was found that the mechanical properties of the secondary material (strength up to 46 kgf/mm², elongation up to 14.4%) are close to standard values and meet the requirements for technological application. Based on the results, the feasibility of using secondary raw materials as an alternative to primary metal at the stage of die setup and for the production of auxiliary parts has been justified.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	10
1.1 Аналіз технологічних відходів у виробництві літальних апаратів.....	10
1.1.1 Металеві відходи та їхній вплив на виробничий процес	11
1.1.2 Полімерні та композитні відходи у виробництві літальних апаратів	12
1.1.3 Класифікація та морфологія твердих відходів алюмінієвих сплавів	13
1.1.4 Проблеми накопичення та утилізації авіаційних відходів	15
1.2 Методи переробки металевих відходів.....	16
1.2.1 Підходи до підвищення якості вторинного алюмінію.....	18
1.4 Вибір оптимальної технології для повторного використання матеріалів	19
1.5 Економічне та екологічне обґрунтування переробки технологічних відходів.....	21
1.6 Висновки та постановка завдань досліджень.....	22
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	25
2.1 Методика виготовлення прутків з відходів ЦЗЛ	25
2.2 Методика термічної обробки заготовок	26
2.3 Методика дослідження хімічного складу.....	26
2.4 Методика дослідження механічних властивостей	27
2.5 Методика дослідження мікроструктури	28
2.6 Методика виготовлення зразків та темплетів	29
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	32
3.1 Контроль механічних властивостей.....	32
3.2 Контроль хімічного складу	33
3.3 Металографічні дослідження.....	34
3.4 Контроль електропровідності.....	53
3.5 Обговорення результатів.....	53
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	56
4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів	56
4.1.1 Аналіз рівня шуму	58
4.1.2 Аналіз освітленості приміщення.....	59

4.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці	60
4.2.1 Аналіз параметрів приміщення	60
4.2.2 Електробезпека та захист від ураження струмом.....	63
4.3 Розрахунок вентиляції	65
4.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	67
4.4.1 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях	67
4.4.2 Пожежна безпека	68
4.4.3 Вимоги безпеки під час повітряної тривоги	70
4.5 Висновки за розділом	72
ВИСНОВКИ.....	73
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	75

ВСТУП

Сучасний розвиток авіаційної та космічної промисловості вимагає впровадження ефективних технологій ресурсозбереження, що сприятиме зменшенню собівартості виробництва та екологічного навантаження на довкілля. Одним із перспективних напрямів у цій сфері є створення технологій переробки технологічних відходів для їх повторного використання у виробництві літальних апаратів. Раціональне використання ресурсів та скорочення відходів є ключовими завданнями, що стоять перед сучасними підприємствами авіаційної промисловості.

На виробництві значна частка технологічних відходів утворюється внаслідок механічної обробки металевих заготовок, штампування, лиття та інших процесів. Ці відходи, зокрема залишки пруткового матеріалу, стружка, браковані деталі та залишки темплетів, мають високий потенціал для повторного використання. Однак, у зв'язку з відсутністю досконалих технологічних рішень їх переробка залишається нерегулярною, а значна частина цінних матеріалів утилізується як металобрухт, що призводить до фінансових втрат і перевитрати дефіцитної сировини.

У даній роботі розглядається можливість впровадження технологічного процесу переробки технологічних відходів для подальшого використання у виробництві авіаційних компонентів. Зокрема, аналізується можливість використання литих прутків, отриманих шляхом переплавлення залишків темплетів та інших відходів, як альтернативи дефіцитному деформованому прутковому матеріалу. Це дасть змогу не лише знизити витрати підприємств, але й сприятиме підвищенню екологічної безпеки виробничих процесів.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Аналіз технологічних відходів у виробництві літальних апаратів

Технологічні відходи, що утворюються у виробництві літальних апаратів, включають широкий спектр матеріалів, зокрема металеві сплави (алюмінієві, титанові, магнієві, нікелеві та сталеві), полімери, композити та рідкі відходи (мастила, розчинники, хімічні реагенти)[1]. Оскільки авіаційна галузь висуває високі вимоги до фізико-механічних характеристик матеріалів, навіть незначні дефекти чи відхилення від стандартів можуть призвести до відбракування деталей, що формує значні обсяги виробничих відходів[2],[3].

Основними джерелами утворення відходів є механічна обробка деталей (токарна, фрезерна, шліфувальна), штампування, лиття, термічна обробка, лазерне різання, а також процеси складання та зварювання[4]. Наприклад, під час фрезерування титанових або алюмінієвих сплавів до 70% початкової маси заготовки перетворюється на стружку[5]. Виробництво композитних матеріалів, що широко використовуються в сучасному літакобудуванні, супроводжується утворенням великої кількості обрізків та залишків полімерних матриць, які складно піддаються повторній переробці через багатокomпонентний склад[6].

Значна частина металевих відходів може бути повторно використана шляхом переплавлення або порошкової металургії. Проте для забезпечення високих експлуатаційних характеристик необхідно враховувати ступінь забруднення матеріалу, наявність оксидів, залишкових мастильних речовин та інших небажаних домішок[7]. Для авіаційної промисловості особливо важливим є контроль вмісту водню та кисню в сплавах, оскільки їхній надлишок може призводити до крихкості матеріалу та утворення мікротріщин[8].

Аналізуючи утворення технологічних відходів у виробництві літальних апаратів, слід також враховувати екологічні аспекти. Зростання вимог до зменшення промислового впливу на довкілля стимулює розвиток нових

методів утилізації та повторного використання матеріалів. Впровадження концепції циркулярної економіки у виробництво літальних апаратів дозволяє скоротити витрати, оптимізувати використання ресурсів та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище[9].

1.1.1 Металеві відходи та їхній вплив на виробничий процес

Металеві відходи у виробництві літальних апаратів складають найбільшу частку серед усіх технологічних відходів. До них належать стружка, обрізки листового металу, залишки після штампування та лиття, зношені деталі та інструменти. Найбільший обсяг таких відходів припадає на обробку алюмінієвих і титанових сплавів, які є основними матеріалами в авіаційному виробництві[10].

Алюмінієві сплави широко застосовуються у конструкціях літаків завдяки їхній малій щільності та високій корозійній стійкості. Однак їхня обробка супроводжується значним утворенням відходів, особливо у процесах механічного різання та штампування. Титан є ще одним критично важливим металом, який використовується у високоміцних деталях та елементах, що зазнають високих навантажень. Його обробка призводить до утворення великої кількості дрібної стружки, яка є горючою та потребує спеціальних методів збору й переробки.

Повторне використання металевих відходів можливе лише після їхнього відповідного очищення та підготовки. Основні методи переробки включають вакуумне переплавлення, порошкову металургію, електрошлаковий переплав та механічне пресування для створення нових заготовок. У випадку порошкової металургії стружка та залишки металів подрібнюються до дрібнодисперсного стану, після чого спікаються у нові вироби, що дозволяє суттєво зменшити втрати матеріалів[11].

Металеві відходи мають значний вплив на виробничий процес, оскільки їхнє накопичення може призводити до підвищеного зношування обладнання,

необхідності витрат на їхнє зберігання та утилізацію, а також до можливого забруднення інших матеріалів, що ускладнює їхню подальшу обробку. Ефективна система збору та переробки відходів може не лише знизити витрати, а й покращити екологічну ситуацію на виробництві.

1.1.2 Полімерні та композитні відходи у виробництві літальних апаратів

Окрім металевих відходів, важливу роль у літакобудуванні відіграють полімерні та композитні матеріали, які використовуються у конструкціях з метою зменшення маси літальних апаратів та підвищення їхньої паливної ефективності[12]. До основних композитних матеріалів, що застосовуються у сучасному авіабудуванні, належать вуглецеві, скловолоконні та арамідні композити.

Процес виробництва та механічної обробки композитів супроводжується утворенням великої кількості відходів, зокрема обрізків, пилу, залишків полімерних матриць та відпрацьованих деталей. Основною проблемою композитних відходів є їхня складна утилізація через багатокомпонентний склад та високу стійкість до впливу зовнішніх факторів.

Традиційні методи утилізації композитів включають механічне подрібнення та спалювання, однак ці методи мають суттєві недоліки. Подрібнення дозволяє отримати вторинні наповнювачі, проте властивості матеріалів суттєво погіршуються. Спалювання композитів супроводжується викидом шкідливих газів, що негативно впливає на екологічну ситуацію[13].

Перспективними методами утилізації композитних матеріалів є термічне розкладання, хімічне розчинення та переробка шляхом подрібнення з подальшим використанням як наповнювачів у нових матеріалах. У Європейському Союзі активно розвивається метод піролізу, при якому композити нагрівають у безкисневому середовищі, що дозволяє відновити вуглецеві волокна та повторно їх використовувати.

Значна увага приділяється розробці біорозкладних полімерних композитів, які можуть розкладатися природним шляхом або під дією спеціальних ферментів. Це відкриває нові перспективи у створенні екологічно безпечних матеріалів для авіаційної промисловості.

Отже, ефективна утилізація полімерних та композитних відходів у літакобудуванні є важливою задачею, що потребує впровадження нових технологій переробки. Перехід до екологічно безпечних методів утилізації дозволить значно зменшити негативний вплив авіаційної промисловості на довкілля та підвищити ефективність використання матеріалів.

1.1.3 Класифікація та морфологія твердих відходів алюмінієвих сплавів

Тверді відходи алюмінієвих сплавів, що утворюються у виробництві авіаційної техніки, характеризуються значною різноманітністю за морфологією, складом, ступенем забруднення та потенціалом до повторного використання [14]. Вони є результатом механічної, термічної та ливарної обробки, а також дослідницьких і контрольних процедур, зокрема випробувань, фрезерування, обрізки припусків і обробки облоя [15].

Згідно з галузевою класифікацією, основні типи твердих алюмінієвих відходів включають:

1. Стружку – утворюється внаслідок токарної, фрезерної, шліфувальної обробки. Може бути довгою або короткою, гвинтоподібною, сплутаною, лускоподібною тощо. Через високу питому поверхню схильна до швидкого окиснення та забруднення мастильними матеріалами, що ускладнює подальше переплавлення [16].

2. Обрізки листів і профілів – залишки після розкрою або штампування. Як правило, мають порівняно чисту поверхню, тому можуть бути легко повернуті в плавильний цикл. Їх цінність зберігається при відсутності термічних або хімічних впливів [17].

3. Облой – надлишковий метал, що утворюється на краях деталі під час гарячого штампування. Має форму тонких країв або потовщень, які видаляються після формування. Здебільшого підлягає переплавленню після очищення від оксидної кірки [18].

4. Макротемплети та випробувальні зразки – відходи після проведення механічних і структурних випробувань. Як правило, мають правильну форму та зберігають основні характеристики початкового сплаву. Часто саме ці зразки стають джерелом вторинних заготовок у контрольних партіях [19].

5. Браковані відливки або деталі – вироби, які не пройшли вхідний або проміжний контроль. Часто мають значну масу та придатні до переплавлення після сортування й механічного очищення [20].

За морфологією твердих відходів важливими критеріями є [21]:

- густина упаковки (від пухкої стружки до компактних відливок);
- стан поверхні (наявність окисних, мастильних, графітових або інших плівок);
- розмір частинок та фракційність;
- наявність домішок (інколи – від інших металів, флюсів, пісок від ливарних форм).

Для ефективної переробки надзвичайно важливим є первинне сортування відходів, зокрема відокремлення ливарних сплавів від деформованих, очищення стружки від мастил, а також відбір однорідних партій [22]. Наприклад, стружка від обробки сплаву 1933, яка зберігає свій склад і не зазнала серйозного забруднення, може бути використана для виготовлення нових прутків за умови відповідного рафінування та термообробки.

Суттєву роль відіграє також геометрія відходів – саме злитість форми та відсутність включень визначає придатність до прямого переплавлення або до попереднього дроблення. Наприклад, стружка зі сплутаною або

ниткоподібною формою вимагає додаткової обробки: сушіння, брикетування чи вакуумного пресування [23].

Таким чином, детальна класифікація твердих відходів дозволяє формувати диференційовані підходи до їх утилізації, обирати найефективніші технології підготовки, очищення й переплавлення, що особливо актуально у виробництві, де діє жорсткий контроль якості, як-от в авіаційній промисловості.

1.1.4 Проблеми накопичення та утилізації авіаційних відходів

Сучасне авіаційне виробництво характеризується високою точністю, складною геометрією деталей та значною кількістю підготовчих і контрольних операцій. У результаті цього формується великий обсяг технологічних відходів, серед яких основну масу складають тверді залишки алюмінієвих сплавів. За попередньою оцінкою, до 60–70 % маси початкових алюмінієвих заготовок у деяких вузлах переходить у відходи, що створює серйозні виклики як з економічної, так і з екологічної точки зору [24].

Однією з ключових проблем є обмеження на повторне використання алюмінієвих відходів у відповідальних конструкціях, зумовлені жорсткими вимогами до чистоти, однорідності структури та стабільності властивостей авіаційних матеріалів. Навіть незначні відхилення у хімічному складі, вмісті включень або рівні пористості можуть бути критичними для деталей, що зазнають значних навантажень у польоті [25]. Через це частина відходів з високим потенціалом утилізації залишається невикористаною або переробляється на менш відповідальні вироби, що не є оптимальним з точки зору ресурсоефективності.

Іншою важливою проблемою є труднощі сортування та очищення відходів. У змішаних потоках присутні сплави різного складу, а також матеріали з поверхневими забрудненнями: мастилами, фарбами, шлаками, оксидами. Стружка, зокрема тонка й сплутана, часто має високу ступінь

окиснення, що погіршує її змочуваність у розплаві та ускладнює переплавлення. Умови зберігання, зволоження повітря, контакт з кислотами чи лугами також можуть спричинити вторинне забруднення, що потребує додаткової підготовки, наприклад, сушіння, хімічного травлення або відпалу в контрольованому середовищі [26].

Зростання обсягів перероблюваних матеріалів призводить до нагромадження на підприємствах великих партій тимчасово непридатних відходів, для яких потрібне відповідне зберігання. Проте багато авіаційних виробництв не мають спеціалізованих бункерів або ізольованих зон для зберігання окиснених алюмінієвих відходів, що створює ризики самозаймання або неконтрольованого окислення при тривалому контакті з повітрям чи вологістю.

Окремо варто згадати про екологічну складову. При недотриманні режимів зберігання й утилізації алюмінієвих відходів, вони стають джерелом забруднення води, ґрунтів та повітря, зокрема через викиди пилу та шкідливих газів при несанкціонованому горінні або окисленні [27].

1.2 Методи переробки металевих відходів

Методи переробки металевих відходів у виробництві літальних апаратів поділяються на традиційні та сучасні. Традиційні способи включають переплавку металобрухту на металургійних підприємствах, що дозволяє повторно використовувати матеріали, проте вимагає значних витрат на транспортування та очищення від домішок [28]. Деякі металеві відходи можуть бути використані для виготовлення менш відповідальних деталей, таких як кріпильні елементи чи рамні конструкції, хоча їхнє застосування в авіаційній галузі обмежене через жорсткі вимоги до матеріалів. Дроблення та подальше переплавлення у цехових умовах дозволяє ефективно переробляти стружку або обрізки металу, що особливо актуально для алюмінієвих і

титанових сплавів, однак вимагає додаткового очищення для запобігання окисленню.

Сучасні методи переплавлення спрямовані на підвищення чистоти та збереження властивостей металів. Електрошлаковий переплав забезпечує ефективне видалення домішок, що критично важливо для титанових і високоміцних сталевих сплавів. Вакуумно-індукційне переплавлення дозволяє отримати високоякісні матеріали без небажаного насичення газами, що є важливим для авіаційного виробництва. Лазерне наплавлення та адитивні технології відкривають можливості не лише для відновлення деталей, а й для створення нових конструктивних елементів, використовуючи порошкові матеріали, отримані з відходів. Це дозволяє суттєво знизити витрати на виробництво. Ще одним перспективним напрямком є порошкова металургія, що забезпечує високий коефіцієнт використання матеріалу та можливість отримання деталей з високою точністю [29-30].

На рисунку 1.1 зображена схема установки для переплавки алюмінію в захисному середовищі аргону.

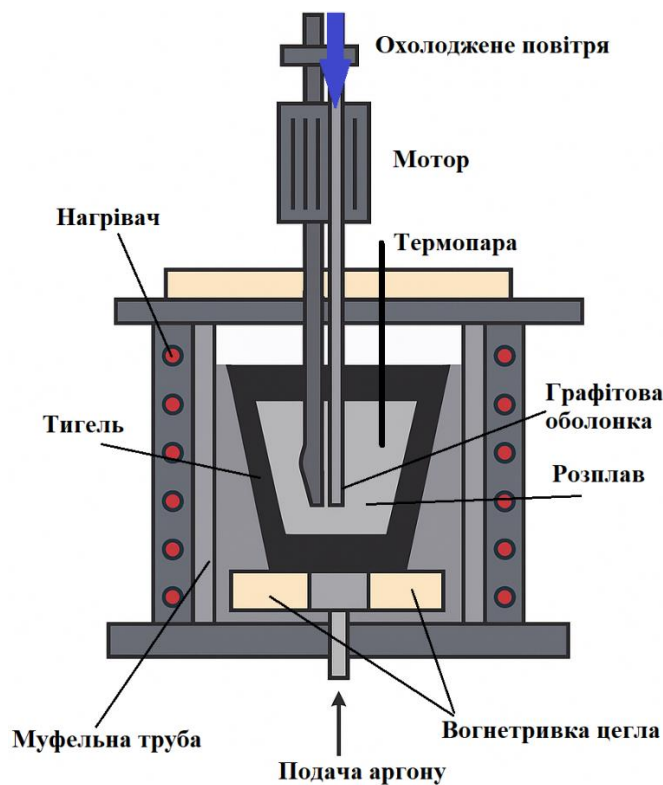


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення установки для переплавки алюмінію

З урахуванням сучасних досягнень у переробці матеріалів перспективним напрямом є використання вторинних сплавів у виробництві авіаційних конструкцій. Це дозволяє зменшити витрати на сировину, знизити викиди CO₂ та сприяє розвитку циркулярної економіки. Впровадження технологій переплавлення та відновлення матеріалів показує, що вторинні матеріали можуть відповідати авіаційним стандартам без втрати їхніх механічних властивостей[31].

1.2.1 Підходи до підвищення якості вторинного алюмінію

Алюмінієва стружка є одним з основних видів твердих технологічних відходів, що утворюються в результаті механічної обробки, зокрема при виготовленні темплетів, зразків для випробувань та іншої допоміжної продукції в авіаційному виробництві. Через високу питому поверхню та здатність до швидкого окиснення, така стружка схильна до втрати металургійної цінності під час зберігання. Поверхня відходів часто містить залишки мастильних матеріалів, оксидні плівки, продукти корозії та інші неметалеві включення, що ускладнює їх подальше переплавлення.

У роботі [32] розглянуто підхід до покращення властивостей стружки шляхом її попереднього очищення у розчині HCl в спиртовому середовищі, а також подальшого відпалу у відновлювальному водневому середовищі при температурі 700 °C. Така обробка дозволила суттєво зменшити кількість домішок (S, Zn, Pb), знизити залишкові напруження та покращити змочуваність частинок розплавом алюмінію. Це зробило можливим застосування відходів для виготовлення пористих армованих структур з покращеними механічними властивостями.

У порівнянні з цією методикою, у межах виконаної магістерської роботи було реалізовано інший підхід – без попередньої хімічної обробки чи відпалу, а саме переплавлення відходів алюмінієвого сплаву 1933 у печах САТ із подальшим литтям пруткових заготовок та їх штампуванням. Отриманий

матеріал пройшов повний цикл оцінки – від хімічного складу до механічних властивостей і мікроструктури, й продемонстрував задовільні характеристики: межа міцності до 46 кгс/мм², подовження до 14,4 %, а структура – рівномірна, без ліквацій чи тріщин.

На відміну від підходу, описаного у [32], який орієнтований здебільшого на створення пористих або армованих композитних матеріалів, у даній роботі основна увага приділялася відновленню цілісних литих заготовок, придатних для штампування при налагодженні виробництва.

Таким чином, хоча ця методика може мати переваги для виготовлення композитів або енергопоглинаючих елементів, вона є менш актуальною у контексті виробництва повнотілих штампованих деталей, де ключовим є забезпечення однорідності структури та достатньої пластичності. Запропонований у дисертаційній роботі підхід показав повну відповідність вимогам до таких заготовок та є технологічно простішим і економічно доцільнішим для задач авіаційного виробництва.

1.4 Вибір оптимальної технології для повторного використання матеріалів

Вибір технології для переробки алюмінієвих технологічних відходів ґрунтується на поєднанні техніко-економічних, екологічних і технологічних критеріїв. Оптимальна схема має не лише забезпечувати збереження властивостей металу, а й відповідати вимогам авіаційного виробництва щодо чистоти, механічної міцності та однорідності структури матеріалу.

Найбільш поширеною є технологія переплавлення з попередньою підготовкою, яка включає сортування, очищення, рафінування та розлив у форми. У роботі реалізовано саме цей підхід, який дозволяє перетворити обрізки, макротемплети й інші залишки сплаву 1933 на пруткові заготовки з високим рівнем відповідності первинному матеріалу.

Проте на практиці застосовуються й інші технології, кожна з яких має свої переваги та обмеження:

1. Порошкова металургія дозволяє отримати вироби зі складною геометрією, однак вимагає додаткових стадій подрібнення, спікання й обмежена у масовому виробництві [33].

2. Компактування з використанням електричного струму або вакуумне пресування є ефективними для дрібнодисперсних відходів, таких як стружка, але потребують значних енергетичних затрат і точного контролю атмосфери [34].

3. Електрошлакове переплавлення або вакуумно-індукційний процес забезпечують найвищий рівень очищення сплаву, однак економічно доцільні лише для особливо відповідальних деталей, виготовлених із високолегованих сплавів [35].

4. Адитивні технології (наприклад, лазерне наплавлення) поки що не набули масового використання у вторинній переробці, проте мають потенціал у виробництві складних елементів конструкцій на основі порошків, отриманих з відходів [36].

У контексті обраного підходу до переплавлення відходів алюмінієвого сплаву 1933 доцільно виділити його основні переваги:

- збереження складу та структури при мінімальних витратах;
- можливість масштабування в межах існуючого цехового обладнання;
- відповідність вимогам до вторинної сировини на етапі налагодження штампового виробництва [37].

Разом з тим, для досягнення оптимального результату необхідно впроваджувати додаткові заходи з очищення поверхні від окислів та мастильних речовин, що може включати:

- галтовку або барабанну обробку;
- обдув аргоном;
- термічне травлення або вакуумну витримку.

У перспективі розробка гібридних технологій – наприклад, поєднання брикетування з індукційним переплавленням – дозволить покращити

енергетичну ефективність і зменшити втрати металу. Досвід європейських підприємств демонструє ефективність локальних замкнених циклів переробки алюмінію, де кожен тип відходів має свою окрему технологічну схему [38].

1.5 Економічне та екологічне обґрунтування переробки технологічних відходів

Переробка технологічних відходів у виробництві літальних апаратів є не лише доцільною, але й стратегічно важливою складовою політики ресурсозбереження сучасних авіаційних підприємств. Повторне використання металів дозволяє суттєво знизити собівартість деталей, зменшити залежність від імпоротної сировини, а також оптимізувати логістичні та виробничі витрати [39].

Зокрема, у випадку алюмінію повторне використання дозволяє знизити споживання енергії приблизно на 90% у порівнянні з виробництвом первинного металу з бокситів, що робить переплавлення технологічних залишків надзвичайно привабливим з економічної точки зору.

Крім того, зменшується потреба у дорогій і енергоємній технології електролізу, яка є основною стадією виробництва первинного алюмінію. Подібні тенденції спостерігаються і в інших галузях металургії: переробка сталі економить до 75% електроенергії, а титану – дозволяє знизити собівартість готових виробів на 30–40% [40].

Економічний ефект також полягає в зменшенні витрат на утилізацію відходів, оскільки ті залишки, що раніше вивозилися як металобрухт або відправлялись на полігони, тепер можуть бути залучені до виробничого циклу. Наприклад, обрізки та темплети зі сплаву 1933 можуть бути переплавлені та використані для виготовлення пруткових заготовок, які слугують як заготовки для штампування при налагодженні виробництва.

У довгостроковій перспективі впровадження таких практик сприяє формуванню замкненого технологічного циклу, де виробничі відходи стають

ресурсом для нових виробів. Це не лише зменшує витрати на матеріали, а й підвищує загальну рентабельність виробництва.

З екологічної точки зору, використання вторинної сировини відіграє важливу роль у скороченні викидів парникових газів, зокрема вуглекислого газу. Первинне виробництво алюмінію супроводжується значними викидами CO_2 , а також споживанням великих обсягів води, що створює додатковий тиск на довкілля. Повторне використання дозволяє зменшити цей вплив щонайменше на 60–70%.

Крім того, знижується навантаження на сировинну базу, зменшується потреба у видобутку бокситів, залізної руди, флюсів та інших природних ресурсів. Це особливо актуально в умовах обмеженості якісних рудних джерел і глобального переходу до принципів циркулярної економіки [41].

З екологічної точки зору позитивний ефект також досягається за рахунок зменшення кількості відходів, які потребують зберігання, обробки або утилізації. Виробничі майданчики звільняються від необхідності тривалого зберігання бракованих деталей, облоя, стружки та темплетів, що часто становить до 50% загальної маси оброблюваного металу.

1.6 Висновки та постановка завдань досліджень

Аналіз наукових і технічних джерел, присвячених проблематиці утворення, переробки та повторного використання технологічних відходів у виробництві літальних апаратів, свідчить про значний потенціал у сфері ресурсозбереження. Металеві, полімерні та композитні відходи формують значну частку загального обсягу виробничих втрат, що потребує розробки ефективних методів їхньої утилізації.

Зокрема, металеві відходи, такі як стружка, обрізки та зношені елементи конструкцій, можуть бути повторно використані шляхом переплавлення, порошкової металургії або механічного пресування. Впровадження цих технологій дозволяє скоротити витрати на сировину, зменшити негативний

вплив на довкілля та оптимізувати виробничі процеси. При цьому особливу увагу слід приділяти очищенню та підготовці вторинних матеріалів, оскільки домішки та залишкові оксиди можуть негативно впливати на якість кінцевої продукції.

Композитні та полімерні відходи становлять складнішу проблему, оскільки їхній склад і структура ускладнюють переробку. Традиційні методи утилізації, такі як подрібнення та спалювання, є неефективними або шкідливими для довкілля. Перспективними напрямками є хімічне розкладання, піроліз та вторинне використання вуглецевих волокон у нових композитних матеріалах. Крім того, дослідження спрямовані на розробку біорозкладних композитів, що дозволить значно зменшити екологічне навантаження.

Загалом, технології повторного використання відходів у літакобудуванні потребують подальшого вдосконалення. Для ефективного впровадження циркулярної економіки необхідна інтеграція нових методів очищення, переробки та повторного використання матеріалів без втрати їхніх механічних та експлуатаційних характеристик. Цей підхід дозволить не лише знизити витрати на виробництво, але й підвищити екологічну безпеку авіаційної галузі.

З огляду на актуальність проблеми та результати аналізу літературних джерел, основним завданням цієї роботи є розробка науково-технічних основ технології переробки технологічних відходів для їхнього повторного використання у виробництві літальних апаратів.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити основні види технологічних відходів у виробництві літальних апаратів та їхній вплив на виробничий процес.
2. Проаналізувати існуючі методи переробки металевих, полімерних та композитних відходів, виявити їхні переваги та недоліки.
3. Розробити концепцію технології повторного використання відходів із максимальним збереженням їхніх фізико-механічних властивостей.

4. Провести експериментальні дослідження щодо можливості застосування перероблених матеріалів у конструкціях літальних апаратів.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Методика виготовлення прутків з відходів ЦЗЛ

З технологічних відходів поковок і штамповок сплаву 1933, що залишалися в ЦЗЛ після контролю макроструктури, на ливарній ділянці було виготовлено литі пруткові заготовки діаметром $\varnothing 28$ мм і $\varnothing 75$ мм методом вільного заливання в піщано-глинисті форми.

Початковим етапом виготовлення прутків було приготування формувальної суміші в склад якої входить пісок марки К02 – 25%, пісок марки П016 – 74%, бентоніт П11 – 1% та додавалась вода до вологості 4%. Саме приготування суміші відбувалось в бігунах коткових марки 1А11.

Модель дерев'яна формувалась в опоки 400/300 мм, ручним методом.

Сплав (залишки від зразків механічної лабораторії, темплетів) розплавлявся у відкритій печі САТ ємністю 200 кг, при температурі 720 °С до повного розплаву.

Після заливання та охолодження виливків форми вибивалися за допомогою вибивної решітки марки L112.

Подальше очищення від залишків формувальної суміші проходило в галтовочному барабані впродовж 4-ох годин, після чого додатково оброблювалось в дробоструминних установках.

Донні та надливкові частини прутків довжиною по 80 мм були відрізані та направлені на дослідження, а решта прутків передана на кузнечно-штампувальну ділянку для пробного штампування.

На отриманих штамповках, а також на донних і надливкових частинах литих пруткових заготовок було виконано контроль макроструктури та механічних властивостей після термічної обробки за режимом ТЗ.

З урахуванням отриманих механічних властивостей литих пруткових заготовок із деформівного сплаву 1933, значення яких були близькими до механічних властивостей ливарних сплавів, що застосовуються на

підприємстві, була випробувана можливість штампування литої пруткової заготовки зі сплаву А κ 7ч (АЛ9).

2.2 Методика термічної обробки заготовок

Штампкування заготовок здійснювали на кривошипно гарячештампувальному пресі (КГШП), обрізка облоя виконувалася на обрізних кривошипних пресах.

Нагрівання під загартування заготовок проводили в електротермічному агрегаті ЕТА-2 з фактичним перепадом температур у робочому просторі не більше ± 5 °С та з дотриманням часу перенесення з печі в загартувальну ванну в автоматизованому режимі (приблизно 10 секунд).

Старіння здійснювали в муфельній електропечі МТП-01 із фактичним перепадом температур у робочому просторі ± 3 °С.

2.3 Методика дослідження хімічного складу

Аналіз хімічного складу відливок проводився за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізатора (РФА) фірми «Елватех» (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Рентгенофлуоресцентний аналізатор фірми «Елватех»

Принцип роботи аналізатора полягає у випромінюванні рентгенівських Х-променів, які, потрапляючи на зразок, спричиняють його флуоресценцію. Після цього промені повертаються на детектор аналізу. Далі спектрометр підраховує кількість імпульсів і виконує математичні розрахунки, на основі яких отримують точний результат аналізу.

Такі аналізатори призначені для дослідження практично будь-яких об'єктів, проте найчастіше їх використовують для аналізу сплавів, металів, дорогоцінних матеріалів, контролю якості металевих виробів на виробництві, геологорозвідувальних робіт, а також контролю якості будівельних чи промислових матеріалів.

Однак прилади РФА не підходять для аналізу найлегших хімічних елементів із періодичної таблиці. До них належать водень, вуглець, кисень і азот. Ці елементи випромінюють надзвичайно слабкі промені, тому їхні дані не враховуються під час аналізу.

2.4 Методика дослідження механічних властивостей

Зразки для випробувань на розрив виготовляли в механічній лабораторії та тестували на розривній машині ZD-10 (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Універсальна розривна машина

Розривна машина ZD-10 для випробування металів, арматури, композитів, металовиробів і т.д. зусиллям розриву до 10000 кг [43].

2.5 Методика дослідження мікроструктури

Контроль мікроструктури здійснювали за допомогою мікроскопа ЕРІТІР CARL ZEISS (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Металографічний мікроскоп ЕРІТІР CARL ZEISS

Мікроскоп металографічний агрегатний ЕРІТІР CARL ZEISS з нижнім розташуванням столика призначається для вивчення структури металів у відбитому світлі у світлому полі при прямому освітленні, у темному полі, а також у поляризованому світлі. Його збільшення від 50 до 507.

2.6 Методика виготовлення зразків та темплетів

Для забезпечення комплексного контролю властивостей матеріалу після переплавлення та подальших операцій гарячого оброблення тиском було здійснено підготовку серії зразків і темплетів. Основною метою було отримання представницьких фрагментів із різних зон пруткових заготовок, що дозволяє виявити можливі дефекти лиття, оцінити структурну однорідність та визначити вплив технологічних параметрів на якість кінцевого виробу.

Зразки та темплети вирізались із донної, надливкової та центральної частин заготовок, виготовлених із переплавленого алюмінієвого сплаву 1933. Для цього використовували стандартну схему розкрою, зображену на рисунках 2.4–2.6.

Рисунок 2.4 ілюструє розкрій пруткової заготовки діаметром 75 мм. Тут передбачено поділ на декілька сегментів, включаючи зони для контролю макроструктури, механічних випробувань і мікроструктурного аналізу.

Усі зразки були підготовлені з дотриманням стандартних вимог до виготовлення темплетів для металографічних, хімічних і механічних досліджень. Для цього використовувались відрізні круги, пила з охолодженням, а також шліфувальні верстати.

Після механічного розрізання кожен зразок був промаркований відповідно до зони вирізки та виду дослідження. Темплети для металографії були відполіровані до дзеркального блиску, після чого частина з них піддавалась травленню для виявлення макро- і мікроструктурних особливостей. Зразки для розтягування мали стандартну форму циліндра з фіксованою довжиною робочої частини.

Такий підхід до підготовки матеріалу дозволив забезпечити репрезентативність результатів на всіх етапах експерименту: від контролю макроструктури до аналізу механічних властивостей та електропровідності. Також це дало змогу систематизувати виявлені дефекти у відповідності до зони формування під час лиття або деформації.

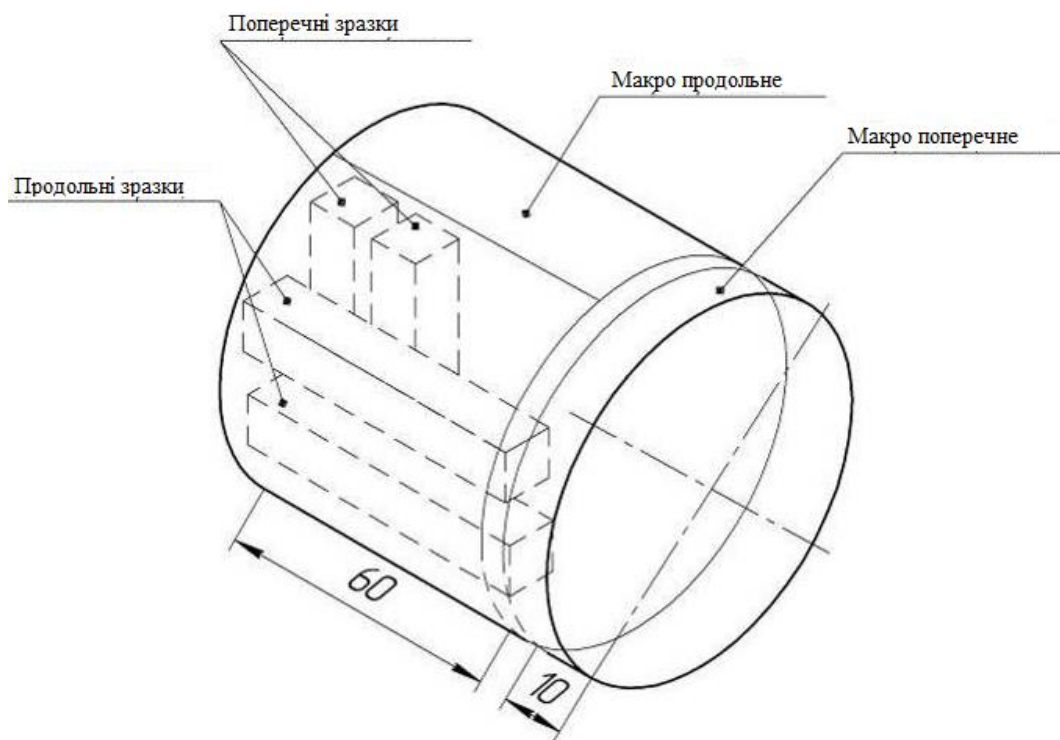


Рисунок 2.4 – Схема розкрою заготовки діаметром 75 мм

Рисунок 2.5 демонструє порядок підготовки шліфів зі штамповки, виготовленої з аналогічної заготовки. Такий підхід дозволяє провести порівняльний аналіз до і після деформації.

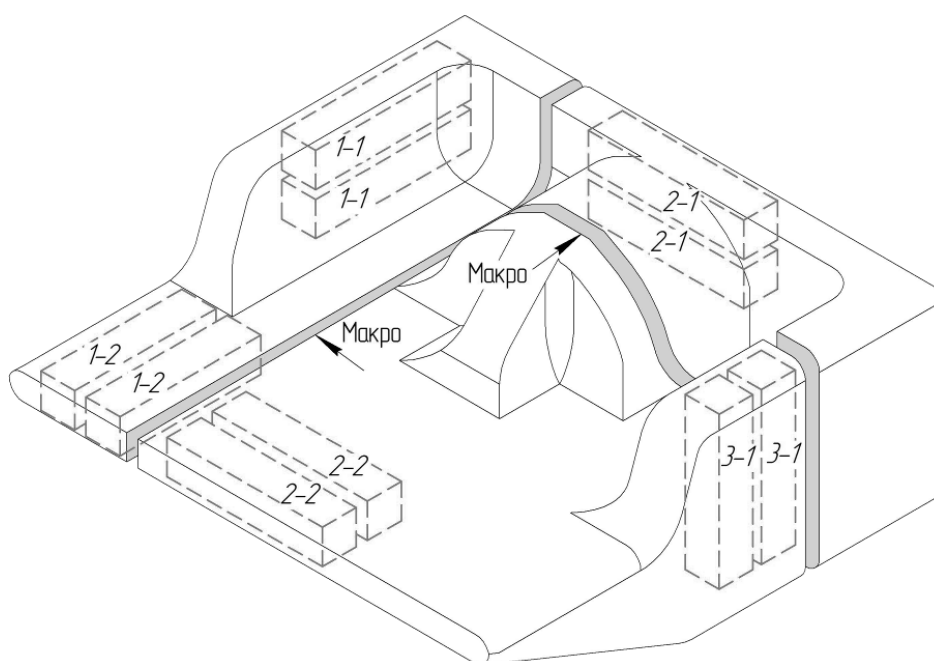


Рисунок 2.5 – Схема розкрою штамповки, виготовленої з литої пруткової заготовки діаметром 75 мм

Рисунок 2.6 подає схему розкрою для заготовок меншого діаметра ($\varnothing 28$ мм), що дає змогу вивчати вплив діаметра на щільність та структуру литого металу.

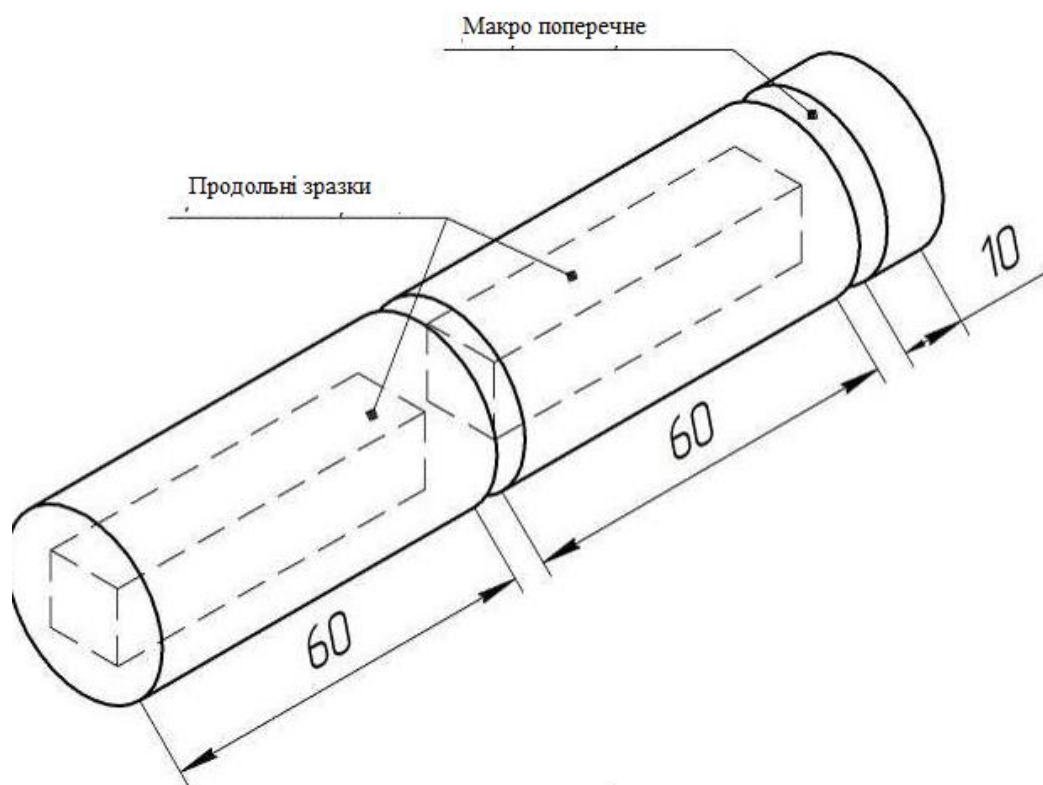


Рисунок 2.6 – Схема розкрою литої пруткової заготовки діаметром 28 мм

З РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Контроль механічних властивостей

Після проведення механічних випробувань литих пруткових заготовок і штамповок було складено таблицю 3.1, що відображає ключові параметри міцності отриманого матеріалу. Як видно з наведених даних, зразки з донної та надливкової частин заготовок діаметром 75 мм та 28 мм демонструють різну межу міцності та відносне подовження, що зумовлено умовами охолодження та щільністю структури в різних зонах відливки.

Таблиця 3.1 – Результати контролю механічних властивостей литих пруткових заготовок і штамповок після термообробки по режиму ТЗ

Діаметр пруткової заготовки, мм	Місце вирізки зразка	Режим термообробки зразків	Межа міцності σ _в , кгс/мм ²					Відносне подовження δ, %				
			Отримано при випробуваннях	не менше				Отримано при випробуваннях	не менше			
				Прутки пресовані 1933Т3 по ОСТ190395-91	Відливки АЛ9Т5 ГОСТ1583-93	Відливки ВАЛ10Т5 ГОСТ1583-93	Відливки гарячедеформовані з ВАЛ10 ТУ1-92-24-74		Прутки пресовані 1933Т3 по ОСТ190395-91	Відливки АЛ9Т5 ГОСТ1583-93	Відливки ВАЛ10Т5 ГОСТ1583-93	Відливки гарячедеформовані з ВАЛ10 ТУ1-92-24-74
75	Надливкова частина	Заг. 470 °С, 5 год, розрив 1,5 год ст.1: 110°С, 12 год; ст.2: 180°С, 7 год	26 19 4,9 28	46	20	40	38	4 0,8 1,2 0,8	8	2	7	8
75	Донна частина		21,5 16 17 18,5					1,2 2,8 3,6 3,6				
28	Надливкова частина		26 29					- 1,2				
28	Донна частина		24 19					2,0 4,0				
75	Штамповка з литої пруткової заготовки		38					4,0				
			35					2,4				
			44					14,4				
			42					10				
			25					2,4				
			23					-				
		30	3,2									
		39	4,4									
32	4,0											
28	-											

Примітка: властивості пресованих прутків і відливок із алюмінієвих сплавів наведені для порівняння як довідкові;

Зокрема, у зразках із донної частини межа міцності знаходиться на рівні 21,5–26 кгс/мм², що дещо нижче за аналогічні показники надливкової частини або штамповок, однак супроводжується вищим подовженням, що свідчить про більшу пластичність. У зразках штамповок, виготовлених із переплавлених заготовок, зафіксовано межу міцності до 46 кгс/мм² при відносному подовженні до 14,4%, що відповідає стандартним вимогам до алюмінієвих сплавів, зокрема до сплаву 1933 у стані ТЗ. Це підтверджує придатність вторинного матеріалу до обробки тиском, а також можливість його використання для формування деталей конструктивного призначення (таблиця 3.1).

3.2 Контроль хімічного складу

Для оцінки хімічної відповідності отриманого сплаву стандарту ОСТ1 90026 проведено рентгенофлуоресцентний аналіз і наведено його результати в таблиці 3.2. За результатами видно, що більшість основних компонентів, таких як Cu, Mg, Fe, Ti, знаходяться в межах, допустимих для сплаву 1933. Зміст заліза (Fe) і цинку (Zn) не перевищує критичних значень, хоча у зразках з деяких зон виявлено відхилення по вмісту кремнію (Si), особливо у поперечному шліфі з травленням Ø28 мм (до 3,49%).

Відхилення, позначені жирним шрифтом у таблиці 3.2, не є критичними, але можуть вказувати на вплив забруднень під час переплавлення, зокрема при недостатньому рафінуванні. Незважаючи на це, загальна структура та властивості залишаються в межах придатності для виготовлення допоміжних авіаційних деталей або використання на етапі налагодження штампового обладнання (таблиця 3.2)

Таблиця 3.2 – Результати контролю хімічного складу литих пруткових заготівок і штамповок

Основні компоненти, %								Домішки, не більше, %				
Al	Cu	Mg	Fe	Zn	Ti	Zr	Be	Si	Mn	Cr	Інші домішки	
											Кожна	Сума
ОСТ1 90026												
основа	0,8-1,2	1,6-2,2	0,06-0,15	6,35-7,2	0,03-0,06	0,10-0,18	0,0001-0,02	<0,1	<0,1	<0,05	0,05	0,1
литий пруток діаметр 28 мм поперечний шліф з зачисткою наждаком												
90,62	1,89	1,6	0,11	5,34	0,04	0,08	-	0,11	0,15	0,02	-	-
литий пруток діаметр 28 мм поперечний шліф з травленням												
87,39	1,93	1,1	0,11	5,62	0,04	0,09	-	3,49	0,17	0,02	-	-
литий пруток діаметр 75 мм поперечний шліф з надливкової частини												
90,40	1,98	1,7	0,09	5,38	0,05	0,09	-	0,13	0,16	0,02	-	-
литий пруток діаметр 75 мм поздовжній шліф з надливкової частини												
88,30	2,62	1,3	0,11	7,11	0,05	0,13	-	0,14	0,19	0,03	-	-
штампівка з литого прутка діаметром 28 мм												
90,74	1,99	1,5	0,09	5,19	0,03	0,07	-	0,17	0,15	0,02	-	-

Примітка: жирним шрифтом виділені відхилення за хімічним складом від вимог ОСТ1 90026 до алюмінієвого сплаву 1933.

Таким чином, отримані результати підтверджують, що застосована технологія переплавлення та подальшої обробки дозволяє забезпечити відповідність механічних і хімічних характеристик вторинного матеріалу до рівня первинних алюмінієвих сплавів, рекомендованих для авіаційного застосування.

3.3 Металографічні дослідження

Результати металографічних досліджень литих пруткових заготівок і штамповок із них наведені на рисунках 3.7 – 3.22.

Після отримання литих пруткових заготівок із алюмінієвого сплаву 1933 було проведено візуальну оцінку їх зовнішнього вигляду. Як видно на рисунку 3.7, поверхня заготівок характеризується однорідністю без видимих макроскопічних дефектів. Проведення дробеструйної обробки в поєднанні з

очищенням у галтовочних барабанах (рисунок 3.8) дозволило ефективно усунути залишки лиття та забезпечити чисту поверхню для подальшого дослідження.



Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд литих пруткових заготовок з алюмінієвого сплаву 1933



Рисунок 3.8 – Зовнішня поверхня литої пруткової заготовки діаметром $\varnothing 75$ мм після очищення в галтовочних барабанах і дробеструйної обробки

Для аналізу внутрішньої структури було підготовлено поперечні макрошліфи. На рисунку 3.9 представлено нетравлені макрошліфи із зон, прилеглих до донної та надливкової частин заготовки $\varnothing 75$ мм. Чітко простежується відмінність у характері внутрішніх дефектів, зокрема в зоні надливка наявні осередки пористості.



Рисунок 3.9 – Поперечні нетравлені макрошліфи, вирізані із зон, прилеглих до донної та надливкової частин литої пруткової заготовки діаметром $\varnothing 75$ мм

Після травлення структури, зображені на рисунку 3.10, дозволили краще виявити границі зерен і мікроефекти, включно з ліквіаційними зонами. Це підтверджує необхідність хімічної підготовки шліфів для глибокого структурного аналізу.

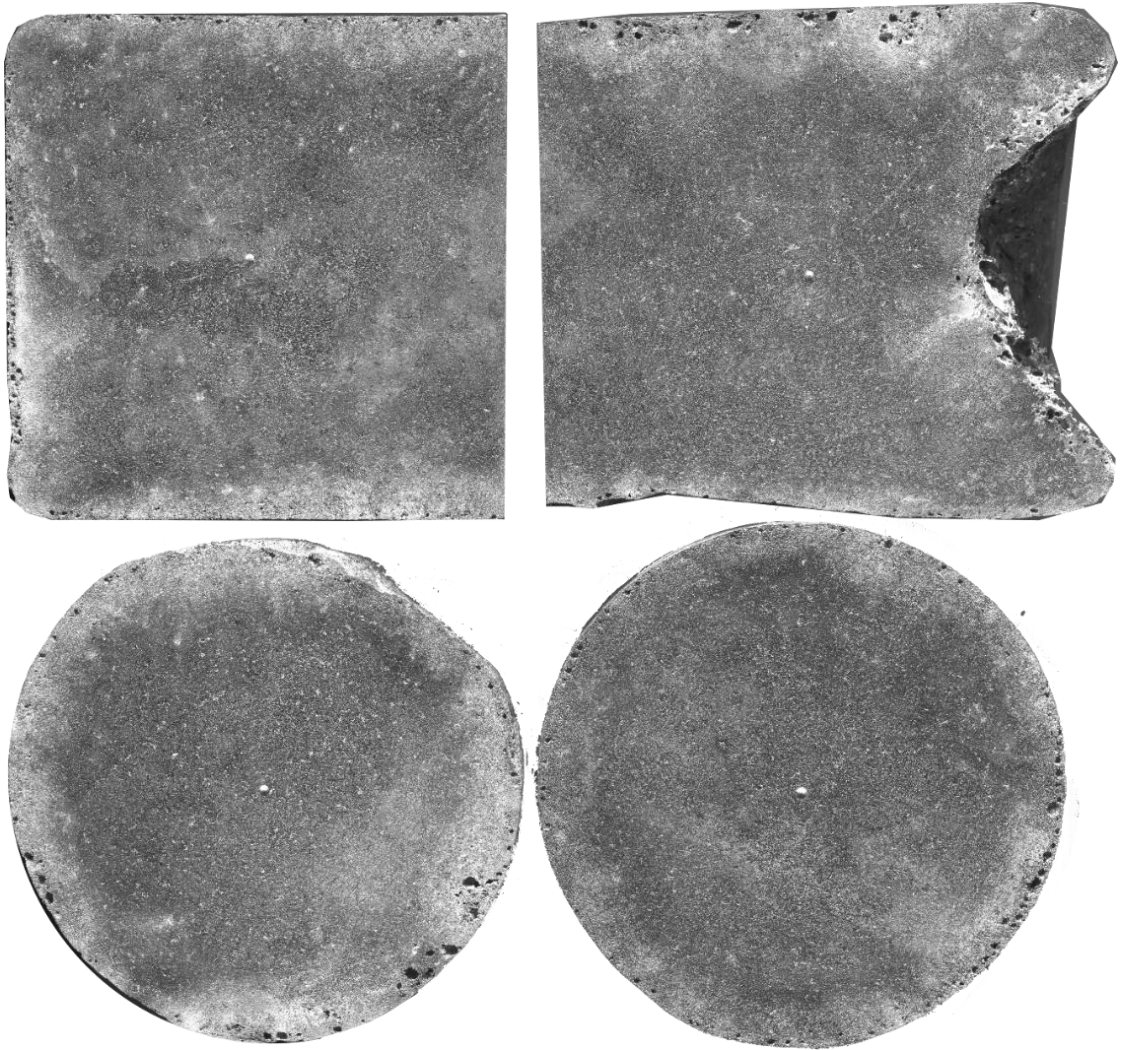


Рисунок 3.10 – Поперечні та поздовжні макрошліфи, вирізані з донної, надливкової та прилеглих до них зон литої пруткової заготовки діаметром $\varnothing 75$ мм після травлення

У випадку з меншими заготовками $\varnothing 28$ мм (рисунок 3.11), макроструктура після травлення демонструє меншу пористість, проте у деяких зонах все ще спостерігаються відхилення, що можуть бути пов'язані зі швидкістю охолодження та характером заповнення форми.

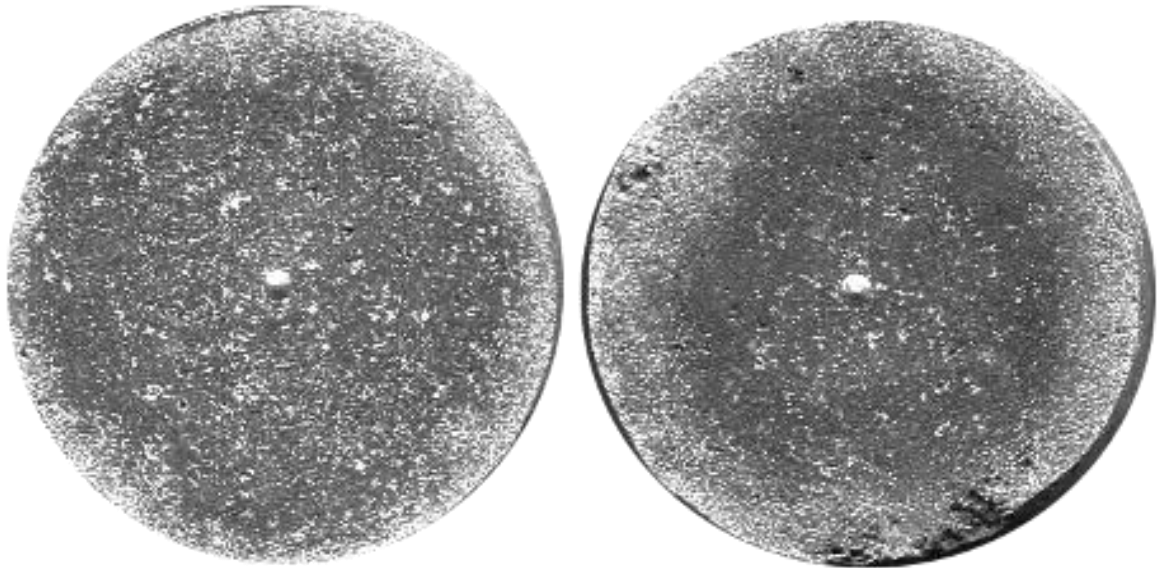


Рисунок 3.11 – Поперечні макрошліфи, вирізані з донної та надливкової зон литої пруткової заготовки діаметром $\varnothing 28$ мм після травлення

Порівняльний аналіз травлених і нетравлених макрошліфів, представлених на рисунку 3.12, у поєднанні з макрошліфами відповідної штамповки, дозволив отримати комплексну оцінку впливу технології переплавлення на формування структури вторинного матеріалу. У нетравленому шліфі видно загальний контур та рівень однорідності відливої заготовки, проте такі особливості, як зеренна будова, наявність зон ліквіації або мікродефектів, залишаються прихованими без додаткової обробки.

Загалом, результати спостережень на рисунку 3.12 підтверджують, що застосована технологія переплавлення забезпечує не лише прийнятну якість литої заготовки, але й достатню структурну однорідність і пластичність матеріалу, необхідну для ефективного обробки тиском. Це ще раз доводить, що вторинний матеріал може бути успішно використаний для виготовлення штамповок у виробничих умовах.

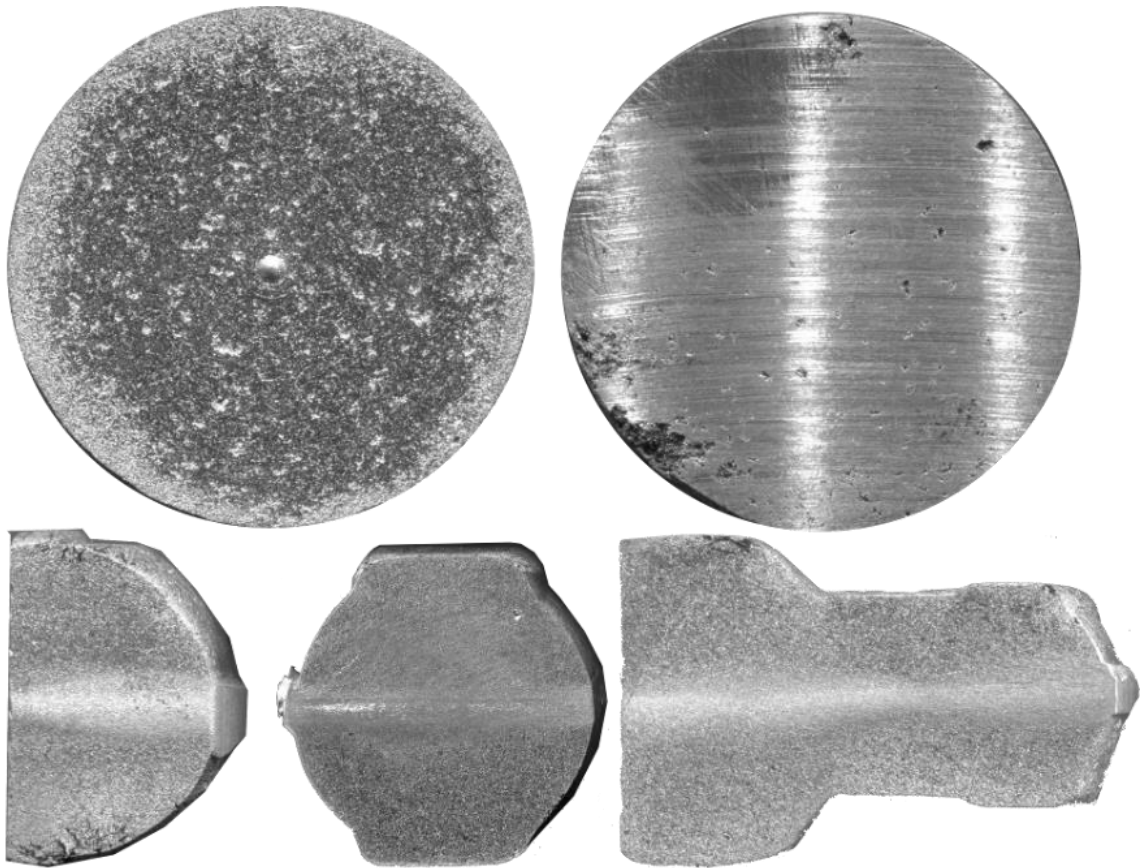


Рисунок 3.12 – Порівняння травленого та нетравленого поперечних макрошліфів литої пруткової заготовки діаметром $\varnothing 28$ мм і макрошліфів штамповки, виготовленої з неї

На рисунку 3.13 подано комплексне уявлення про вигляд штамповки $\varnothing 28$ мм: як у вигляді поверхні, так і у внутрішньому перерізі до та після травлення. Слід зазначити, що в центральній зоні структури штамповки виявлено значну кількість лікваційних включень.

Загалом, рисунок 3.13 ілюструє як зовнішню якість штамповки, так і її внутрішню структурну будову, яка залишається задовільною, незважаючи на виявлені лікваційні прояви. Це дозволяє зробити висновок, що отриманий матеріал, навіть із мінімальною структурною неоднорідністю, є технологічно придатним для використання у допоміжних елементах авіаційного виробництва або для налагоджування штампових процесів.

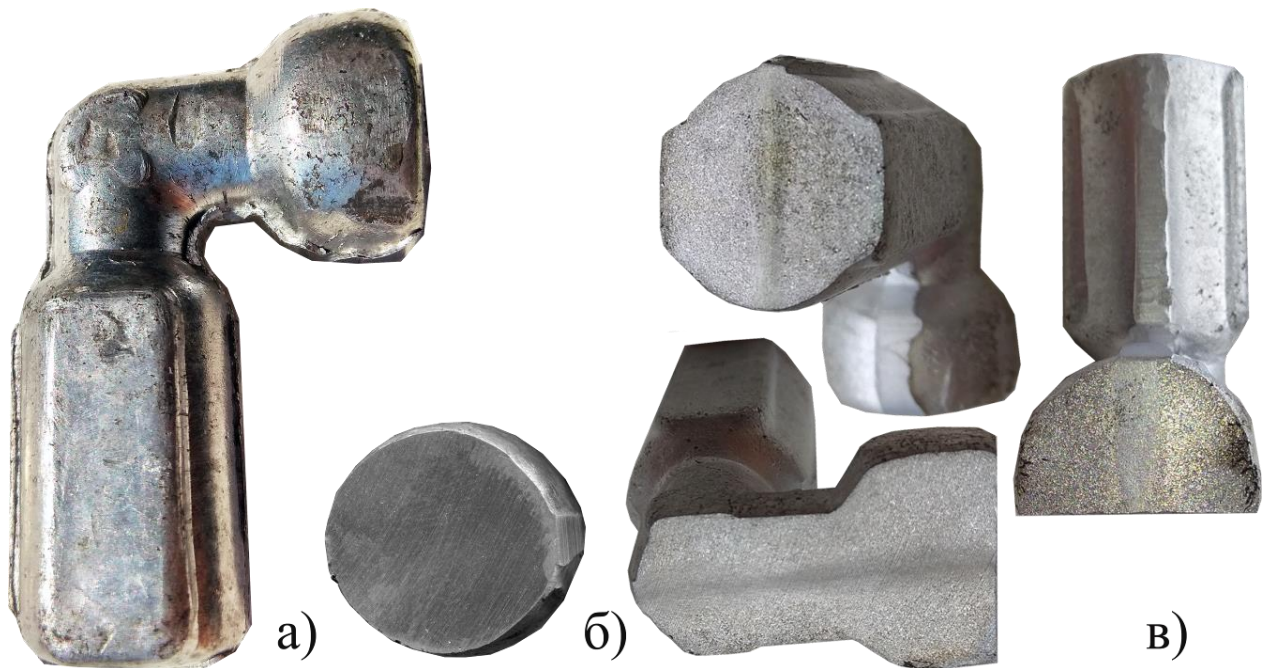


Рисунок 3.13 – Штамповка з литої пруткової заготовки діаметром $\varnothing 28$ мм:

- а) зовнішній вигляд поверхні після обрізки облоя,
- б) поперечний макрошліф штамповки без травлення,
- в) макроструктура штамповки в різних перерізах після травлення

На рисунку 3.14 подано зовнішній вигляд штамповок, виготовлених із пруткових заготовок діаметром 75 мм. Форма виробів чітко окреслена, з правильними геометричними обрисами, що свідчить про достатню пластичність матеріалу під час обробки тиском.

Поверхня штамповок візуально гладка, без видимих тріщин, задирок чи ознак надмірного навантаження, що є прямим свідченням того, що температурний режим і сила тиску під час штампування були оптимально підібрані.

Деякі зразки демонструють наявність легкого зминання або незначної асиметрії, що можна пояснити незначними варіаціями в діаметрі або формі вхідної литої заготовки. Проте ці особливості не впливають суттєво на функціональність штамповок, особливо з огляду на те, що мова йде про заготовки для налагодження процесу, а не про відповідальні деталі конструкцій.

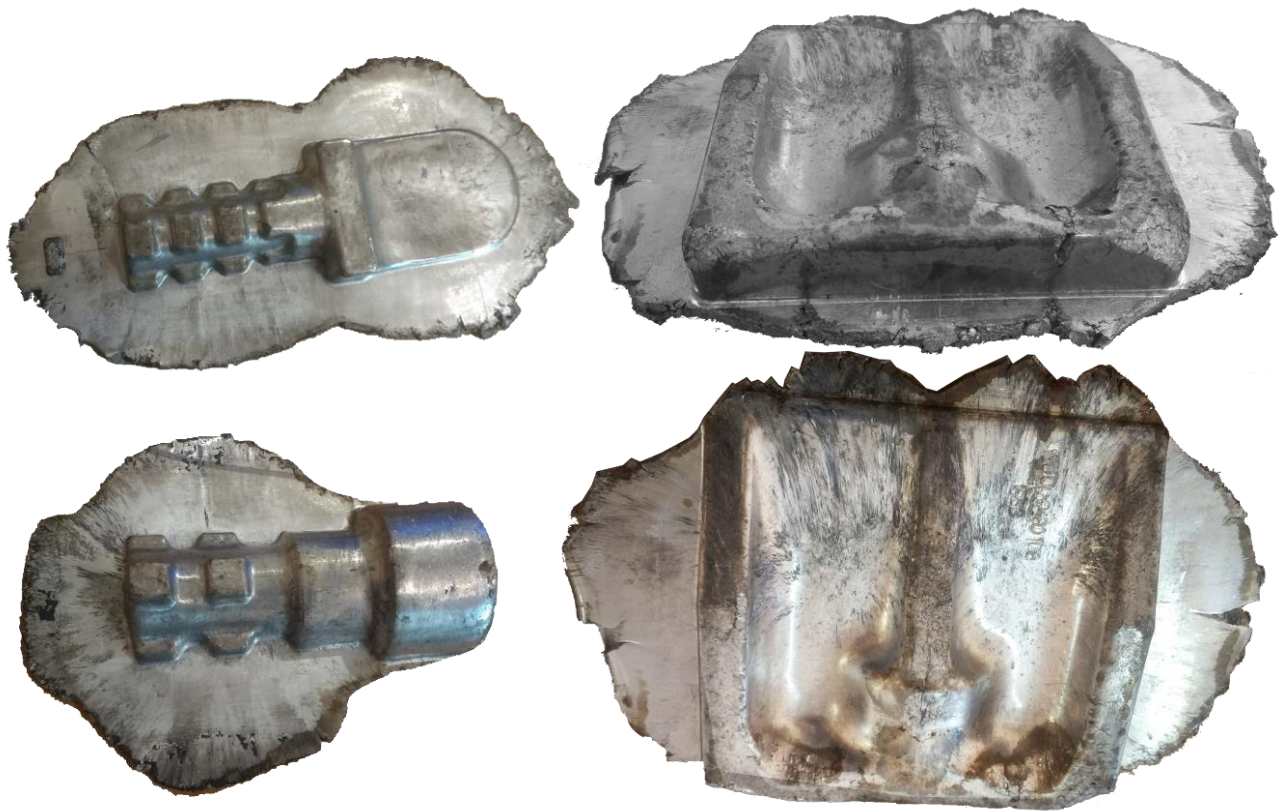


Рисунок 3.14 – Зовнішній вигляд поверхні штамповок із литої пруткової заготовки діаметром $\varnothing 75$ мм без травлення та обрізки обля

На рисунку 3.15 зображено штамповку, виконану зі сплаву А $\kappa 7$ ч, яка використовується для порівняння. Цей зразок має аналогічну геометрію, проте візуально видно різницю в характері поверхні – вона менш гладка, із трохи вищою зернистістю й відмінною кольоровою текстурою, що може свідчити про інші технологічні умови лиття чи обробки. Важливо зазначити, що штамповка зі сплаву А $\kappa 7$ ч є ливарною заготовкою – на відміну від штамповок зі сплаву 1933, який є деформованим сплавом, що зазвичай демонструє кращу пластичність.



Рисунок 3.15 – Зовнішній вигляд поверхні штамповки з литої пруткової заготовки ливарного сплаву Ак7ч (АЛ9) без травлення та обрізки облоя

Порівняння цих двох виробів дає змогу зробити висновок, що вторинний сплав 1933, отриманий у результаті переплавлення відходів, забезпечує якісне формування штамповки, не поступаючись за геометричною точністю чи зовнішнім виглядом аналогічним деталям зі стандартного ливарного сплаву. Це ще раз підтверджує практичну доцільність застосування вторинного матеріалу в умовах авіаційного виробництва, зокрема на стадії налагодження штампового інструменту або виготовлення допоміжних елементів.

На рисунку 3.16 зображено зразок, вилучений із надливкової частини литої пруткової заготовки $\varnothing 75$ мм, після його випробування на розтяг. Зразок демонструє класичні ознаки крихкого руйнування – злам має гострокутову, зернисту поверхню, без видимих ознак пластичного видовження або шийкоутворення.

Таке руйнування зазвичай супроводжується відсутністю помітного деформування в зоні розриву, що характерне для матеріалів зі зниженою

пластичністю та наявністю структурних або внутрішніх дефектів, які виступають ініціаторами руйнування.

Зокрема, зразок був отриманий саме з надливкової частини, яка, як правило, характеризується:

- повільнішим охолодженням під час лиття;
- накопиченням газових пор і ліквідаційних зон через дендритну сегрегацію;
- змінами у хімічному складі внаслідок стратифікації легуючих елементів.

Ці особливості створюють умови для локального зниження механічних властивостей, зокрема міцності на розрив і пластичності.

Також у зоні надливка часто формуються усадкові дефекти, мікропори, неметалеві включення, які під час деформації стають зародками тріщин і призводять до крихкого характеру зламу, як це видно на рисунку.

Форма й характер поверхні зламу свідчать, що зразок не пройшов стадію пластичного витягування і зруйнувався раптом, що додатково вказує на низьку ударну в'язкість у цій зоні. Така поведінка є типовою для литих ділянок з неоднорідною структурою або високою концентрацією дефектів.

Таким чином, зразок на рисунку 3.16 підтверджує, що надливкова частина литої заготовки має гірші механічні характеристики, порівняно з донною або центральною частинами. Це слід враховувати при виборі зони заготовки для виготовлення відповідальних зразків або штамповок. Для підвищення якості цієї зони доцільним є застосування додаткових технологічних прийомів – таких як рафінування, контрольована кристалізація чи вакуумування при литті.

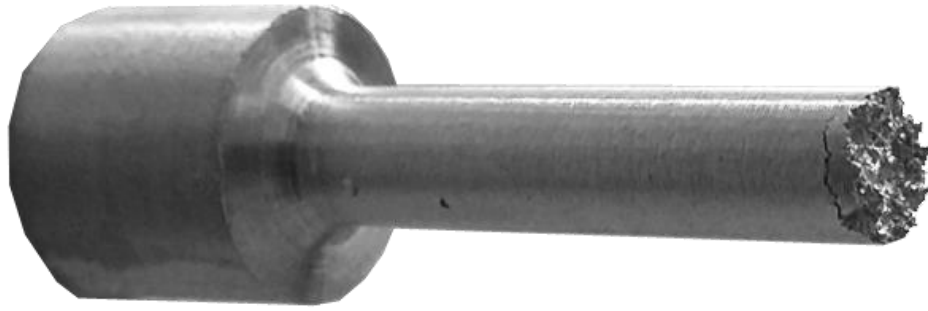


Рисунок 3.16 – Частина зразка, зруйнованого під час механічних випробувань, вирізаного з надливкової частини литої пруткової заготовки діаметром $\varnothing 75$ мм, із зломом, характерним для крихкого, непластичного руйнування

На рисунку 3.17 представлено травлений макрошліф поперечного перерізу штамповки, отриманої із переплавленої заготовки зі сплаву 1933 діаметром 75 мм. Зображення дає змогу провести якісний аналіз внутрішньої макроструктури матеріалу після пластичної деформації, здійсненої в процесі гарячого штампування.

Візуально видно чітко виражену зональну неоднорідність структури по радіусу перерізу. У периферійній частині, тобто ближче до поверхні штамповки, спостерігаються витягнуті зерна, які сформувалися в результаті інтенсивного деформаційного потоку під дією тиску штампа. Ця зона має дрібнішу зеренну структуру, що є наслідком більшої швидкості деформації та охолодження після формування.

Натомість у центральній зоні перерізу видно більш грубозернисту структуру з менш вираженим витягуванням зерен. Така різниця пояснюється неоднаковим ступенем деформації: у центрі матеріал зазнає менших механічних навантажень, оскільки основна робота здійснюється по зовнішньому контуру, де діє максимальна сила штампа.

Крім того, у центральній частині можлива наявність залишкових дефектів, які могли залишитися після лиття, – мікропор, зон сегрегації або

незначної ліквідації, однак у представленому макрошліфі яскраво виражених дефектів не виявлено. Це вказує на те, що структура після деформації є цілісною та не має критичних порушень, які могли б негативно вплинути на міцність або тріщиностійкість штамповки.

Особливу увагу слід звернути на плавність переходу структури між зоною високої деформації (периферія) і низької (центр). Відсутність різких переходів або тріщин між цими зонами свідчить про якісне виконання процесу штампування та адекватну пластичність вторинного матеріалу, навіть попри його походження з технологічних відходів.

Таким чином, макроструктура на рисунку 3.17 підтверджує, що штамповка, має задовільну однорідність і сформовану зеренну будову, характерну для гарячої обробки тиском.

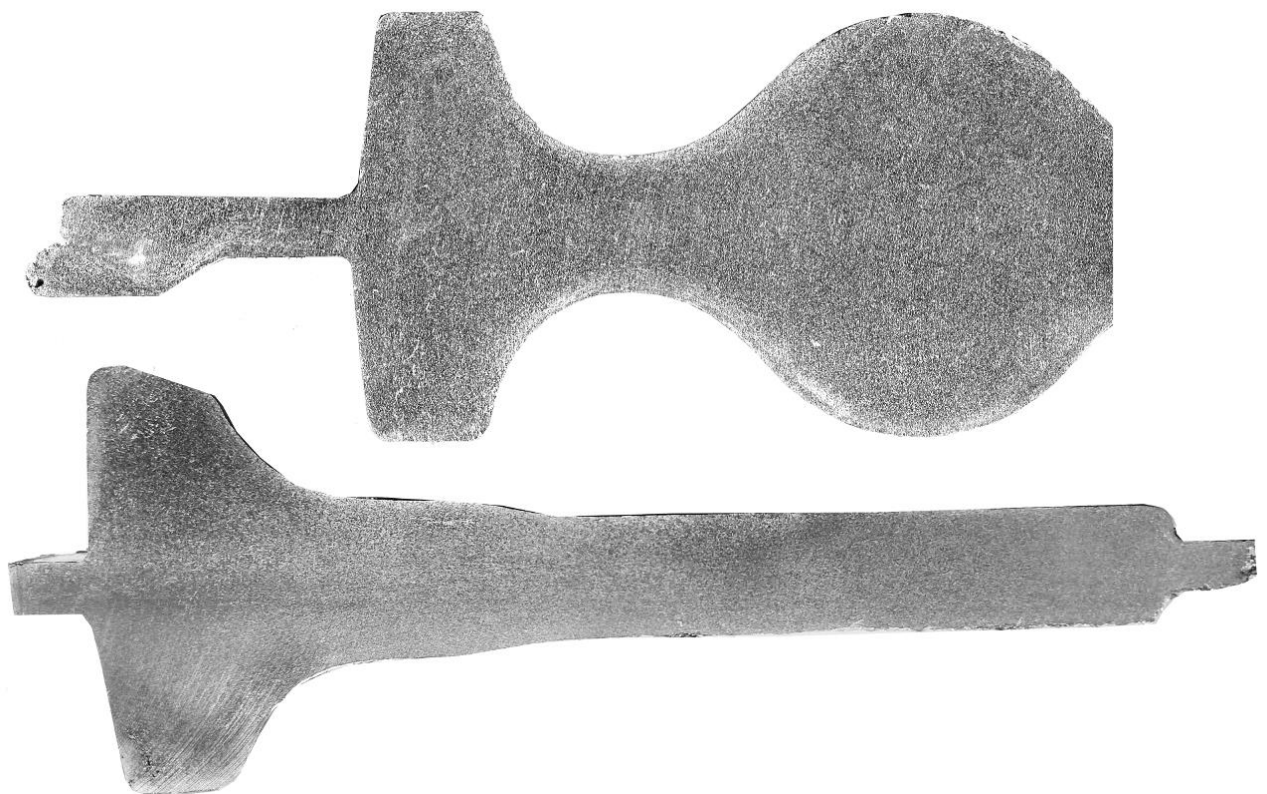


Рисунок 3.17 – Макроструктура штамповки з литої пруткової заготовки діаметром $\varnothing 75$ мм

На рисунку 3.18 представлено мікроструктуру нетравленого шліфа, отриманого з темплету – зразка, вирізаного зі штамповки, виготовленої з литої пруткової заготовки. У нетравленому стані шліф дає змогу оцінити загальний стан матриці металу, присутність макродефектів, включень, пор, а також можливих зон неплавлення або злипання фаз. Незважаючи на обмежену видимість зерен без травлення, на зображенні помітно локальні затемнення та незначні вкраплення, які можуть свідчити про залишки ліквідаційних зон або неметалеві включення ливарного походження.

У деяких областях відзначаються розмиті границі фазових утворень, що вказує на наявність структурної неоднорідності – імовірно, результат недостатньо стабільного переплавлення або неідеальної кристалізації у процесі лиття заготовки. У той же час загальна щільність структури зберігається, й відсутність наскрізних дефектів свідчить про прийнятну якість для подальшого формоутворення.

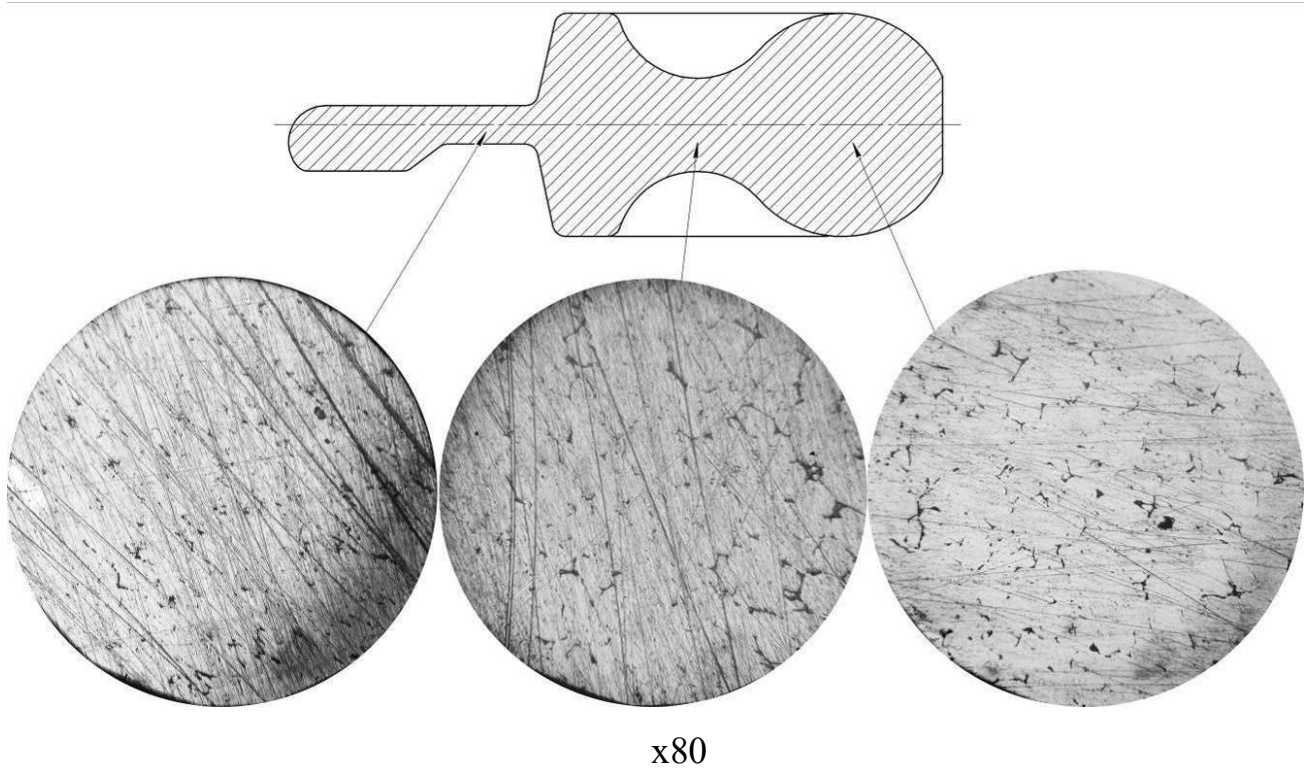


Рисунок 3.18 – Мікроструктура штамповки з литої пруткової заготовки діаметром $\varnothing 75$ мм на нетравленому темплеті в зонах із різним ступенем деформації

На рисунку 3.19 наведено мікроструктуру цього ж зразка після травлення. Хімічне травлення дозволило чітко візуалізувати зерна, субструктуру та характер деформації, спричиненої гарячим штампуванням.

У зоні спостереження видно витягнуті зерна, орієнтовані відповідно до напрямку дії зусилля під час обробки тиском. Це свідчить про ефективну передачу напружень і добру пластичну деформованість матеріалу. У периферійній частині шліфа зерна – менші, витягнуті, з явними ознаками ковзання, тоді як у центральній частині структура більш грубозерниста, з меншим ступенем орієнтації – що цілком узгоджується з режимами навантаження при штампуванні.

Також чітко виявляються зони, що мають дефекти ливарного походження: невеликі газові пори, мікровключення темного кольору, які могли бути залишками флюсів або оксидів. Незважаючи на наявність цих структурних дефектів, вони ізольовані, не утворюють суцільних смуг, і не перешкоджають загальній формувальній здатності металу.

Таким чином, дослідження підтверджують, що попри деякі локальні дефекти, структура матеріалу є стабільною, технологічно придатною для штампування, і не містить критичних зон, які б виключали використання вторинного сплаву для допоміжних виробів у авіаційному виробництві.

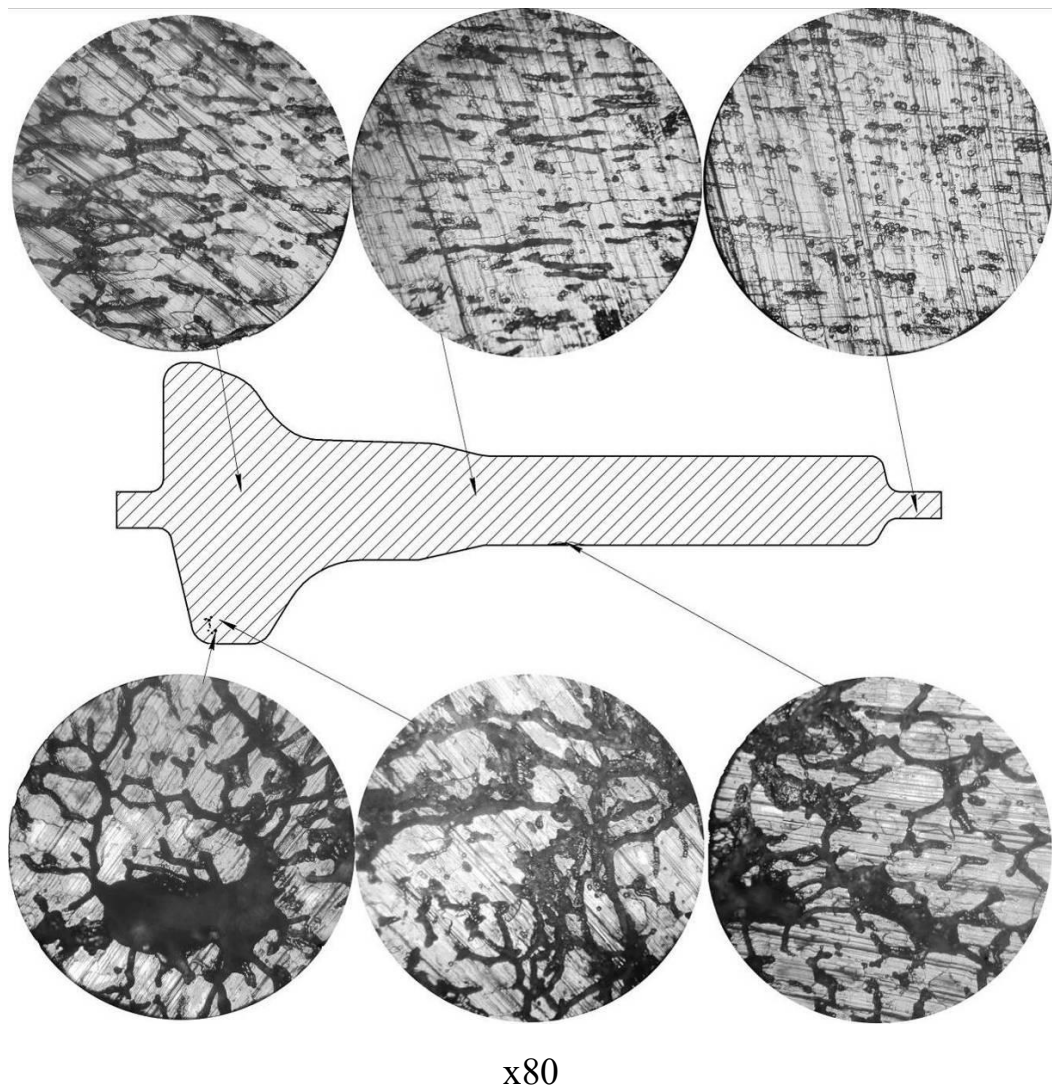


Рисунок 3.19 – Мікроструктура штамповки з литої пруткової заготовки діаметром $\varnothing 75$ мм на травленому темплеті в зонах із різним ступенем деформації і в зонах з дефектами ливарного походження

На рисунку 3.20 представлено мікроструктуру зразка, який був відібраний із штамповки, виготовленої з литої заготовки алюмінієвого сплаву 1933. Зразок піддано металографічному травленню, що дало змогу візуалізувати структурні неоднорідності, характерні для гарячої деформації.

Особливістю мікроструктури, зображеної на цьому рисунку, є наявність витягнутих ліквідаційних включень, розташованих у напрямку плину металу. Ці включення – це залишкові зони мікросегрегації легуючих елементів або оксидів, які сформувалися ще на стадії лиття та були витягнуті в процесі штампування, набувши орієнтації відповідно до напрямку прикладеного тиску.

Форма цих включень – еліпсоподібна або лінзоподібна, зі згладженими краями, що свідчить про пластичну природу навколишньої металевої матриці. Їх рівномірна орієнтація по всій площі спостереження вказує на стабільний та однорідний режим деформації під час штампування. Це може бути як прямий доказ напрямленого плину металу, так і ознака повного охоплення деформаційним полем всієї товщі зразка.

Наявність таких витягнутих зон ліквідації не є критичною – на відміну від сегрегованих ділянок у литих структурах без деформації, вони не утворюють концентраторів напружень, а лише фіксують початкову неоднорідність, яку вдалося стабілізувати за рахунок пластичної обробки.

Також слід зазначити, що відсутність наскрізних пор або розривів у зоні включень свідчить про достатню зварюваність внутрішніх шарів матеріалу під час обробки тиском. Загальна структура поза межами ліквідацій виглядає однорідною, щільною, з ознаками рекристалізації у деяких зонах, що вказує на позитивну дію температурного впливу при штампуванні.

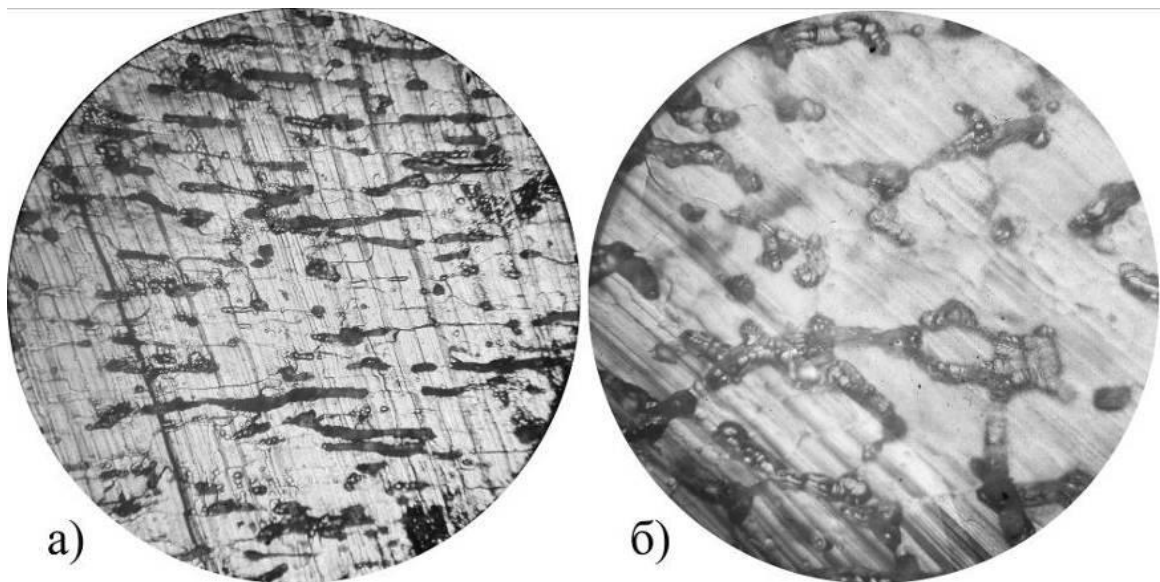


Рисунок 3.20 – Мікроструктура штампівки з литої пруткової заготовки діаметром $\varnothing 75$ мм із розтравками ліквідаційних включень, витягнутих у напрямку плину металу під час деформації: а) при збільшенні $\times 80$; б) при збільшенні $\times 320$

На рисунку 3.21 представлено мікроструктуру пруткової заготовки $\varnothing 28$ мм, отриманої шляхом переплавлення технологічних відходів алюмінієвого сплаву 1933. Зображення охоплює дві ділянки шліфів – нетравлену та травлену, що дозволяє провести порівняльний аналіз стану структури до й після хімічної обробки.

У нетравленій зоні спостерігається слабо виражене контрастування мікроструктури. Видно загальну картину матриці – з ділянками незначної неоднорідності та розмитими межами фаз, однак деталізація зеренної структури та фазових відмінностей обмежена. В такому вигляді зразок може слугувати для виявлення макродефектів, включень, тріщин чи осередків пористості, однак інформативність щодо формоутворення зерен і структури сплаву загалом є низькою.

Після хімічного травлення (травлена ділянка рисунка) спостерігається значне підвищення контрастності структури. Добре видно:

- границі зерен з чіткою орієнтацією;
- різну морфологію зерен залежно від зони зразка (периферійна частина має витягнуті зерна, центральна – крупнозернисту структуру);
- ознаки напрямленої кристалізації з характерною дендритною будовою в деяких ділянках.

У деяких областях виявлено зони порушеної однорідності, які проявляються у вигляді скупчення більш темних або світліших фаз – це можуть бути залишкові зони ліквідації або мікрровключення, що не повністю розчинені при переплавленні. Така сегрегація, як правило, виникає внаслідок швидкого охолодження в окремих ділянках або недостатньої інтенсивності перемішування розплаву перед заливкою.

Також у структурі можна прослідкувати градієнт розмірів зерен по перерізу: ближче до периферії зерна дрібніші, ущільнені, тоді як у центрі вони більші та менш орієнтовані. Такий розподіл цілком типовий для литих заготовок, особливо в умовах відсутності спрямованої кристалізації або впливу охолоджуючих каналів.

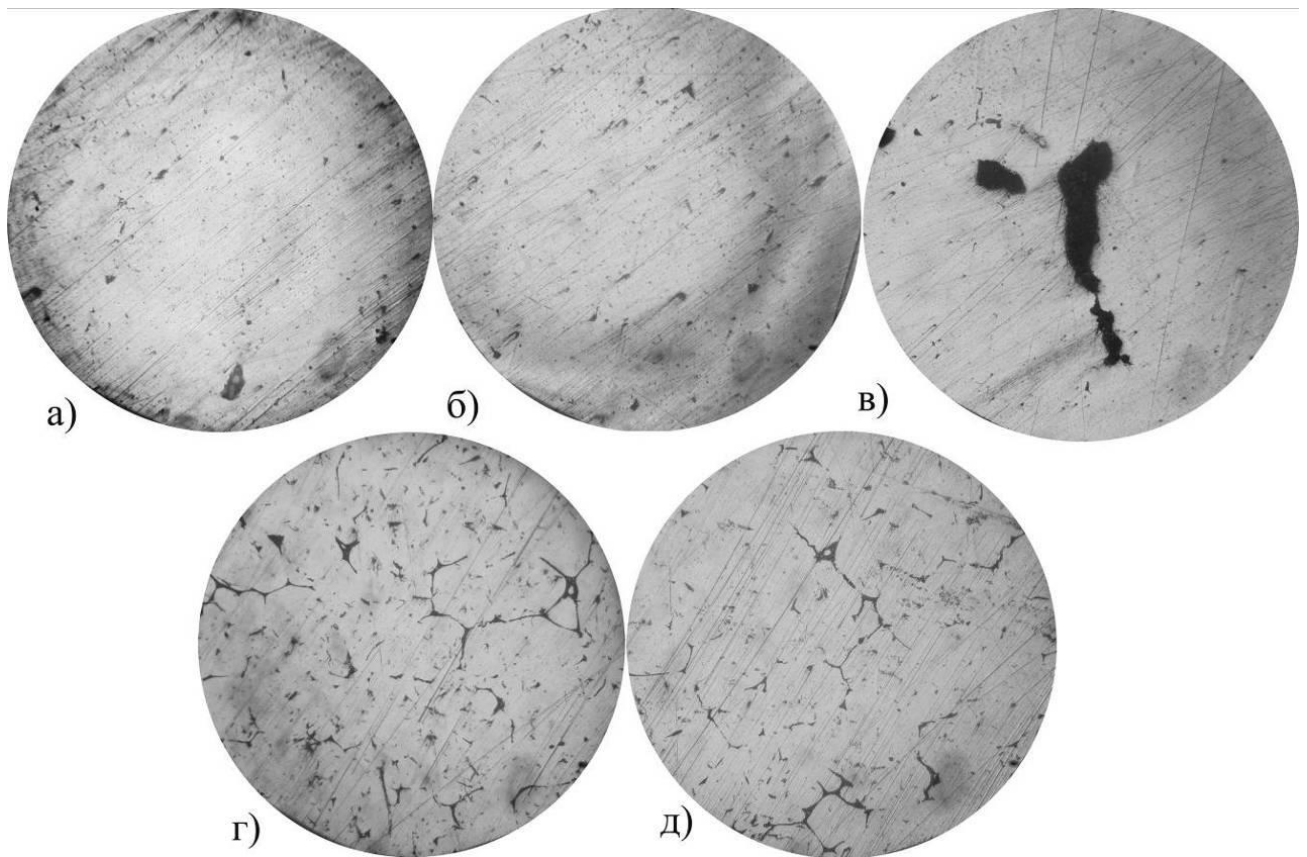


Рисунок 3.21 – Мікроструктура литої пруткової заготівки діаметром $\varnothing 28$ мм:
а), б) $\times 320$ нетравлена; в) $\times 320$ нетравлена із зони, що містить дефект
ливарного походження; г), д) $\times 320$ травлена

На рисунку 3.22 представлено порівняння мікроструктури центральної та периферійної частин штамповки після гарячої деформації. Це зіставлення є ключовим для розуміння того, як інтенсивність та напрямок прикладеного навантаження впливають на морфологію зерен і загальний структурний стан матеріалу.

У центральній частині штамповки структура характеризується переважно ізометричними або слабко витягнутими зернами. Це пояснюється тим, що в центральній зоні прутка під час штампування виникає менше напруження – деформація поширюється від периферії до центру, але її інтенсивність зменшується в глибині деталі. Зерна тут мають крупніший розмір, відносно низьку щільність і можуть містити окремі мікровключення або залишки від ливарного процесу.

У периферійній частині спостерігається чітко виражене витягування зерен у напрямку дії зусилля – типова ознака гарячої обробки тиском. Зерна мають волокнисту форму, витягнуту вздовж вектора деформації, зменшені розміри та щільнішу упаковку. Це свідчить про вищу ступінь пластичної деформації в цій зоні, оскільки саме на периферії відбувається максимальне контактне навантаження між заготівкою і робочими поверхнями штампа.

Крім морфологічних відмінностей, важливо також відзначити відсутність видимих ознак мікротріщин, розшарувань або злипання фаз у жодній із зон. Це підтверджує, що структура матеріалу в процесі штампування зазнала рівномірної пластичної деформації без порушення цілісності, що є позитивним показником для вторинного алюмінієвого сплаву.

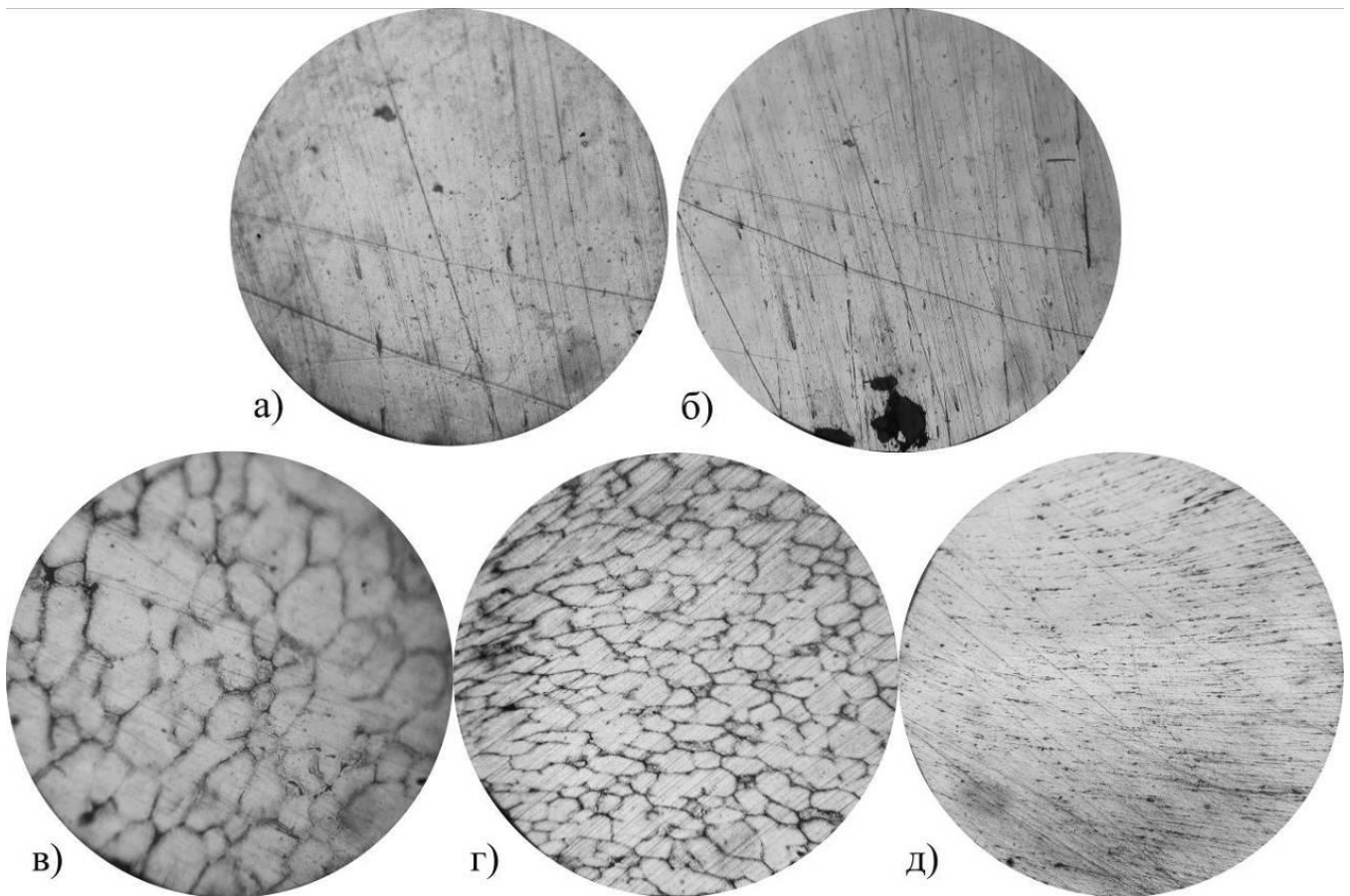


Рисунок 3.22 – Мікроструктура штамповки з литої пруткової заготівки діаметром $\varnothing 28$ мм: а), б) $\times 320$ нетравлена; в) $\times 320$ травлена; г) $\times 80$ травлена із центральної зони штамповки зі середнім ступенем деформації; д) $\times 80$ травлена із периферійної зони штамповки з максимальним ступенем деформації

3.4 Контроль електропровідності

Штамповка з литої пруткової заготовки 1933 діаметром $\varnothing 75$ мм у стані ТЗ – 21,3 МСм/м.

Лита пруткова заготовка 1933 діаметром $\varnothing 75$ мм без термообробки – донна частина 20,8, прибуткова частина 20,8-21,0 МСм/м.

Лита пруткова заготовка 1933 діаметром $\varnothing 28$ мм без термообробки, прибуткова частина – 21,3 МСм/м.

Штамповка з литої пруткової заготовки 1933 діаметром $\varnothing 28$ мм після термообробки за режимом ТЗ – 18,3 МСм/м.

3.5 Обговорення результатів

Невідповідність хімічного складу вимогам, ймовірно, пов'язана з можливим потраплянням у плавку інших марок матеріалів, а також із включенням зон із наявністю піску, що підтверджується підвищеним вмістом у литій прутковій заготівці алюмінієвого сплаву 1933 міді, кремнію та марганцю при одночасному незначному зниженні вмісту інших легувальних елементів через їх вигоряння під час плавлення. Також виявлені відхилення можуть бути зумовлені технічними можливостями (точністю) рентгенофлуоресцентного аналізатора (РФА) для проведення хімічного аналізу. Виявлені відхилення не є критичними для цілей, які переслідує ця робота.

Механічні властивості литих пруткових заготовок із алюмінієвого сплаву 1933ТЗ значно нижчі, ніж у аналогічних пресованих або катаних прутків. Рівень механічних характеристик литих пруткових заготовок наближений до властивостей виливків із алюмінієвого ливарного сплаву Ак7ч (АЛ9). Спостерігається розкид механічних характеристик, що супроводжується різким зниженням показників через наявність дефектів у зразках (особливо це

помітно за пластичними характеристиками та характером руйнування зразків). Механічні властивості матеріалу після штампування мають вищий рівень у порівнянні з характеристиками литих пруткових заготовок. Виявлено залежність показників міцності та пластичності від ступеня деформації та прохідності структури металу: у зонах із більшою мірою деформації та значнішим переміщенням металу під час штампування – вищі міцнісні та пластичні характеристики. У зразках, що містять невидалені під час деформації дефекти ливарного походження, спостерігається відсутність пластичності під час руйнування. Загалом штампування з литої пруткової заготовки має дещо занижені показники механічних властивостей щодо міцності та пластичності порівняно з вимогами до штамповок із пресованих прутків, але вони є достатніми для вирішення завдань, поставлених у цій роботі.

Контроль макроструктури литих пруткових заготовок виявив наявність несплошностей по всьому перерізу у прутках малого діаметра, а також скупчення несплошностей у приповерхневій зоні у прутках більшого діаметра, пористості, світлих плям кристалів, збіднених твердим розчином. Контроль макроструктури штамповок із литих пруткових заготовок показав схлопування пор, пористості та несплошностей, які були присутні у вихідній литій заготовці. У процесі штампування точкові дефекти круглої форми витягувалися в напрямку течії металу, набуваючи вигляду ризиків, а в деяких випадках спостерігалось їх часткове або повне дифузійне заварювання (залежно від ступеня деформації – зі збільшенням ступеня деформації кількість дефектів зменшується).

Контроль мікроструктури литих пруткових заготовок та штамповок із них показав наявність ліквіаційних виділень легкоплавкої фази по межах зерен, які у штампованих виробах набували витягнутої форми та орієнтувалися у напрямку течії металу під час деформації. У мікроструктурі литих пруткових заготовок місцями виявлялися надриви та несплошності, кількість яких у штамповках зменшувалася зі збільшенням ступеня деформації матеріалу.

Значення електропровідності всіх досліджуваних напівфабрикатів знаходилися в межах 18,3–21,3 МСм/м при нормі 23,5–25,6 МСм/м. Це свідчить про низький рівень корозійної стійкості литих пруткових заготовок і штамповок із них.

Пробні штамповки різної номенклатури показали, що виготовлені за дослідним техпроцесом ливарної ділянки литі пруткові заготовки діаметрами $\varnothing 28$ мм та $\varnothing 75$ мм із деформованого алюмінієвого сплаву 1933, а також із ливарного алюмінієвого сплаву Ак7ч (АЛ9), мають задовільну якість поверхні для налагодження штампового інструменту, достатню пластичність для налаштування та випробування штампа та можуть застосовуватися як альтернатива дороговартісним імпортним пруткам для налагодження та випробувань штампів КГШП, а також для підбору типорозміру заготовок під штамповки при відпрацюванні нових технологічних процесів з метою економії матеріалу, який може бути використаний для виготовлення деталей авіаційного призначення.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У даному розділі розглядаються питання охорони праці, а також забезпечення безпеки в умовах виконання технологічних операцій, пов'язаних із переробкою технологічних відходів алюмінієвих сплавів для їх подальшого використання у виробництві літальних апаратів. Особлива увага приділяється аналізу шкідливих і небезпечних виробничих факторів, які виникають під час переплавлення, лиття, термічної обробки, очищення, механічного випробування та дослідження матеріалів.

Метою цього розділу є визначення умов і заходів, які забезпечують безпечну роботу персоналу на всіх етапах переробки відходів алюмінієвих сплавів. Розглянуто як організаційні, так і технічні рішення з охорони праці, а також дії у випадку надзвичайних ситуацій. Усі заходи безпеки відповідають чинним державним нормам і стандартам [44-45].

4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

У процесі виконання робіт, пов'язаних із переробкою технологічних відходів алюмінієвих сплавів, працівники зазнають дії низки шкідливих та небезпечних факторів. Основні технологічні етапи включають:

- переплавлення відходів;
- лиття прутків;
- вибивання та очищення виливків;
- термічну обробку;
- дробоструминне очищення.

Кожен із цих процесів має свої характерні небезпеки, які потребують відповідних заходів безпеки.

На етапі переплавлення залишків алюмінієвих сплавів у відкритій печі типу САТ працівники зазнають дії високих температур (до 720 °C), що створює небезпеку виникнення опіків у разі контакту з рідким металом або

гарячими поверхнями. Також підвищується ризик пожежі внаслідок наявності легкозаймистих домішок у відходах. З метою запобігання нещасним випадкам використовуються засоби індивідуального захисту, наприклад вогнетривкі рукавиці, захисні фартухи, обличчеві щитки [46], а також організовується постійний нагляд за станом печі та справністю її електричних елементів.

Лиття заготовок у піщано-глиняні форми супроводжується ризиками травмування при переміщенні важких опок і заливанні рідкого металу. Після затвердіння металу форми вибиваються вручну за допомогою вибивної решітки, що супроводжується значним фізичним навантаженням та запиленістю повітря, яка може перевищувати граничні допустимі значення [47]. Пил, що містить мікрочастинки піску й оксидів металів, може подразнювати дихальні шляхи й шкіру. Для зменшення впливу цього фактору застосовується місцева витяжна вентиляція та індивідуальні засоби захисту органів дихання – респіратори й пилозахисні маски.

Після вибивання заготовки проходять очищення в галтовочному барабані та дробоструминних установках, де утворюється додаткове запилення і викиди абразивних частинок. Ударна дія абразивів становить небезпеку для очей та шкіри, тому обов'язковим є використання захисних окулярів, щитків, міцного спецодягу та рукавиць. Дробоструминне очищення також супроводжується підвищеним рівнем шуму, що потребує звукоізоляції або носіння протишумових навушників.

Під час термічної обробки заготовок у печах ЕТА-2 і МТП-01 потенційною небезпекою є інфрачервоне випромінювання, перегрів робочої зони та ризик ураження електричним струмом. Висока температура печей потребує чіткої відповідності режиму роботи, регулярного технічного контролю нагрівальних елементів, а також суворого дотримання правил завантаження й вивантаження зразків. Для безпечного контакту з обладнанням працівники використовують термостійкі рукавиці, захисні окуляри й спецвзуття.

Усі електротехнічні прилади мають бути заземлені та регулярно перевірятися на предмет цілісності ізоляції. Роботи з напругою понад 220 В виконуються виключно кваліфікованим персоналом із допуском, з використанням діелектричних засобів захисту (килимки, рукавиці, інструмент з ізольованими ручками).

Дотримання комплексу організаційних та технічних заходів, зокрема регулярних інструктажів, застосування індивідуальних засобів захисту, справної вентиляції, а також проведення профілактичного медичного огляду персоналу, забезпечує зниження виробничих ризиків до допустимого рівня й створює безпечні умови праці під час виконання технологічних процесів з переробки відходів алюмінієвих сплавів.

4.1.1 Аналіз рівня шуму

Одним із поширених шкідливих виробничих факторів при виконанні робіт із переплавлення та переробки технологічних відходів алюмінієвих сплавів є підвищений рівень шуму. Джерелами шуму у виробничому середовищі виступають як технологічне обладнання, так і допоміжні механізми. У рамках виконання технологічних процесів найінтенсивніше шумове навантаження фіксувалося під час роботи галтовочного барабана, дробоструминної установки, а також при використанні кривошипних гарячештампувальних пресів.

Вищезазначене обладнання створює імпульсний та постійний шум, який, за відсутності належної звукоізоляції або засобів індивідуального захисту, може перевищувати гранично допустимі рівні. Згідно з державними санітарними нормами (ДСН 3.3.6.037-99) [48] допустимий рівень шуму для виробничих приміщень, де виконуються роботи середньої тяжкості, становить не більше 80 дБА при тривалому впливі. У інших випадках, зокрема поблизу дробоструминного обладнання, рівень шуму може перевищувати цей показник і сягати 90–95 дБА.

Для зменшення впливу шуму передбачаються комплексні заходи:

- встановлення шумопоглинальних кожухів на пресові машини;
- використання віброгасильних вставок у фундаментних кріпленнях агрегатів;
- організація звукопоглинального облицювання стін і стелі у виробничих приміщеннях.

Працівники, які перебувають у зоні впливу підвищеного шуму, зобов'язані використовувати індивідуальні засоби захисту слуху – шумозахисні навушники або вкладиші (беруші), які знижують рівень шуму на 15–25 дБ.

Контроль рівня шуму здійснюється за допомогою шумомірів відповідно до вимог чинних стандартів. Таким чином, ефективна організація шумового контролю є важливою складовою та сприяє збереженню працездатності і здоров'я персоналу.

4.1.2 Аналіз освітленості приміщення

Освітлення є важливою складовою безпечного та ефективного виконання технологічних операцій. Відповідний рівень освітленості забезпечує зниження втоми зору, зменшення кількості помилок під час виконання робіт і запобігання нещасним випадкам.

Виробничі приміщення, де виконувались основні операції (переплавлення, лиття, термічна обробка), характеризувалися комбінованим типом освітлення – природним і штучним. Природне освітлення забезпечується через віконні прорізи у верхній частині стін виробничих цехів, що дозволяє зменшити навантаження на зір у денний час доби. Штучне освітлення здійснюється за допомогою люмінесцентних ламп або світлодіодних світильників загального призначення, розміщених рівномірно на стелі приміщення.

Відповідно до вимог ДБН В.2.5-28-2006 [49] для виробничих приміщень зі звичайною точністю робіт нормативна освітленість має становити не менше 300 лк. Недостатній рівень освітлення може спричиняти підвищене зорове навантаження, втому, зниження продуктивності та підвищення ризику травматизму, особливо під час роботи з гарячим металом, пресовим обладнанням. Неправильне розміщення джерел світла або їх недостатня кількість можуть призводити до появи тіней, блисків і нерівномірного освітлення, що також впливає на безпеку праці.

Для підтримання нормативного рівня освітлення підприємством впроваджено заходи щодо регулярної перевірки світлотехнічних характеристик ламп, своєчасної заміни перегорілих джерел світла, очищення світильників від пилу, а також оптимального розміщення робочих столів і обладнання відносно джерел світла. У місцях, де проводиться робота з високим рівнем точності, використовуються додаткові локальні джерела освітлення.

4.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

4.2.1 Аналіз параметрів приміщення

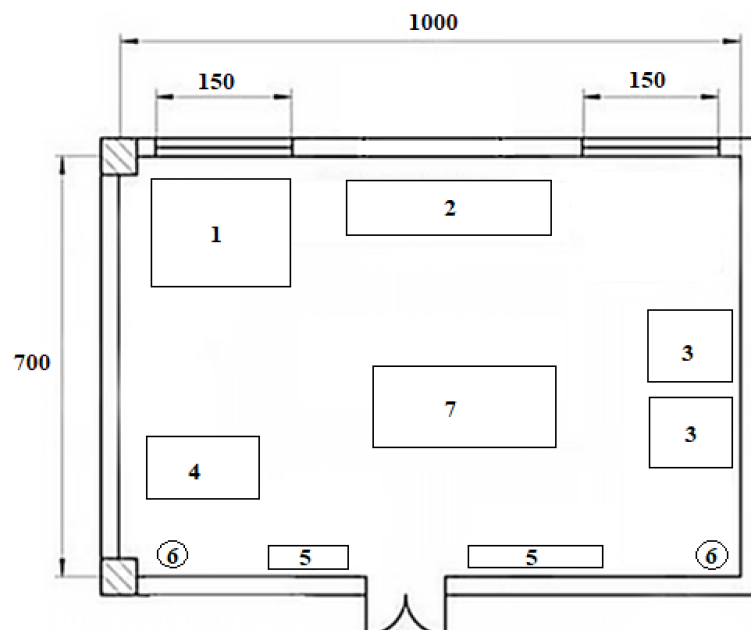
Під час виконання роботи над дисертацією на базі АТ «АНТОНОВ» основні технологічні операції, пов'язані з переплавленням і переробкою технологічних відходів алюмінієвих сплавів, проводились у приміщеннях ливарно-штампувального виробництва, зокрема на ділянці переплавлення. Від параметрів цих приміщень значною мірою залежить безпечність виконання робіт, комфортність мікроклімату та ефективність технологічного процесу.

Специфікацію обладнання, на якому виконувались основні технологічні процеси та характеристики приміщення, вказані в таблицях 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1. Специфікація технологічного обладнання

№	Найменування	Розміри, м Д/Ш/В	Основні характеристики	Кількість	Позиція на рисунку
1	Піч САТ	1,6/1,2/1,8	Номінальна робоча температура – 750°C	1	1
2	Піч ЕТА-2	2/0,8/1,6	Номінальна робоча температура – 500-550°C	1	2
3	МТП-01	0,8/0,6/0,8	Номінальна робоча температура – 250-300°C	2	3
4	Змішувач бігунцевий 1А11	1,7/1/1,6	Продуктивність – 1,5 тонни/год	1	4

План приміщення зазначено на рисунку 4.1.



1 – піч САТ; 2 – піч ЕТА-2; 3 – піч МТП-01; 4 – змішувач бігунцевий;
5 – шафа; 6 – вогнегасник; 7 – робочий стіл

Рисунок 4.1 – План дільниці ливарно-штампувального виробництва

Таблиця 4.2 – Характеристики ділянки ливарно-штампувального виробництва

Довжина, м	7
Ширина, м	10
Висота, м	5
Площа, м ²	70
Об'єм, м ³	420

Оскільки в нашому випадку площа становить:

$$S = 7 \cdot 10 = 70 \text{ м}^2. \quad 4.1$$

Об'єм приміщення:

$$V = 7 \cdot 10 \cdot 5 = 350 \text{ м}^3. \quad 4.2$$

З урахуванням того, що на даній ділянці одночасно працюють двоє працівників, розрахунок площі та об'єму, що припадають на одного з них, виглядає так:

$$S_{\text{ч}} = \frac{70}{2} = 35 \text{ м}^2. \quad 4.3$$

$$V_{\text{ч}} = \frac{350}{2} = 175 \text{ м}^3. \quad 4.4$$

Результати розрахунків показують, що приміщення дільниці ливарно-штампувального виробництва задовольняє стандарти будівель виробничого призначення ДБН В.2.2 28:2010 [50].

Розраховані значення та нормативні вимоги щодо характеристик приміщення наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Реальні та нормативні характеристики приміщення [51]

№	Параметр приміщення	Реальне значення	Нормативні значення
1	Площа на 1 працюючого	35 м ²	4,5 м ²
2	Об'єм на одного працюючого	175 м ³	15 м ³

Спираючись на отримані дані, дільниця ливарно-штампувального виробництва, в якій проводилась дана робота, відповідає вимогам санітарних норм і правил.

4.2.2 Електробезпека та захист від ураження струмом

Усі основні виробничі пов'язані з переплавленням, термообробкою супроводжуються використанням електрообладнання. Це створює підвищену небезпеку ураження електричним струмом, особливо в умовах підвищеної температури, вологості або запиленості, які характерні для дільниць лиття та термообробки.

До основного електрообладнання, що використовувалося належать: плавильна піч типу САТ, камерна піч ЕТА-2, муфельна піч МТП-01, дробоструминна установка. Напруга живлення більшості пристроїв становить 220/380 В, що за певних умов може спричинити серйозні наслідки у разі порушення правил експлуатації або виникнення аварійних ситуацій.

Основними шляхами ураження працівників електричним струмом є прямий або непрямий контакт з провідниками під напругою, ушкодженими ізоляціями, а також при несправності заземлення корпусів. Особливої уваги потребують електропечі та обладнання з високим струмовим навантаженням, де можливе пробивання ізоляції через перегрів.

Для забезпечення електробезпеки на підприємстві впроваджено комплекс організаційно-технічних заходів:

- заземлення всього стаціонарного електрообладнання, зокрема печей і дробоструминних камер;
- використання автоматичних вимикачів із захистом від короткого замикання та перевантаження;
- регулярна перевірка опору ізоляції, контроль технічного стану силових кабелів, штепсельних з'єднань і розеток;
- наявність сигнальних табличок і попереджувальних знаків у місцях підключення високої напруги.

Оператори, що обслуговують обладнання, зобов'язані проходити спеціальний інструктаж з електробезпеки не рідше одного разу на рік, а також навчання з правил першої допомоги при ураженні струмом. У зонах підвищеної небезпеки використовуються діелектричні килимки, рукавиці, а для ручного інструменту – ізольовані ручки, що відповідають класу захисту.

У разі виявлення пошкодженої ізоляції, сторонніх струмів на корпусах або несправностей пускового обладнання, робота негайно припиняється, а агрегат відключається від мережі. Працівники мають доступ до аварійного відключення живлення, що розташоване у зоні прямої видимості та позначене відповідними знаками.

Таким чином дільниця відповідає нормам ПУЕ-2017 [52], так як дотримання вимог електробезпеки та застосування інженерних засобів захисту дозволяють мінімізувати ризики ураження працівників струмом та забезпечують безпечне функціонування електротехнічного обладнання в умовах виробничого середовища.

4.3 Розрахунок вентиляції

Для забезпечення допустимих санітарно-гігієнічних умов у виробничих приміщеннях, де виконуються операції з переплавлення, лиття та обробки алюмінієвих відходів, необхідно передбачити ефективну систему вентиляції. Основними шкідливими чинниками, які потребують видалення, є надлишкове тепло, пари оксидів металів, пил формувальних сумішей, газоподібні продукти термічних процесів та абразивні частинки від дробоструминної обробки.

Виробниче приміщення, де розташована плавильна піч типу САТ ємністю 200 кг, має площу 70 м² та висоту 5 м, що дає загальний об'єм приміщення:

$$V = 70 \text{ м}^2 \times 5 \text{ м} = 350 \text{ м}^3, \quad 4.5$$

Згідно з нормативами ДБН В.2.5-67:2013 [53] для приміщень із виділенням великої кількості тепла та пилу (категорія IIIa) передбачається кратність повітрообміну не менше 10 разів на годину. Розрахунковий об'єм повітря, що має видалятися з приміщення щогодини, становить:

$$L = 10 \times 350 = 3500 \text{ м}^3/\text{год}, \quad 4.6$$

Таким чином, для забезпечення нормативного рівня повітрообміну необхідно передбачити витяжну вентиляційну систему продуктивністю не менше 3500 м³/год. У зонах розміщення плавильної печі та дробоструминного обладнання доцільно встановити локальні зонти-витяжки, які ефективно видаляють шкідливі виділення без їхнього поширення по приміщенню.

Крім того, для зменшення концентрації пилу та підвищення безпеки праці доцільно організувати припливно-витяжну вентиляцію з рециркуляцією очищеного повітря, обладнану фільтрами тонкого очищення. У літній період

вентиляційна система має доповнюватися природним провітрюванням через вікна та фрамуги.

Підтримання ефективної роботи вентиляційних систем контролюється шляхом вимірювання швидкості повітря в витяжних каналах, контролю тиску та перевірки фільтрувальних елементів. Планова профілактика та очищення вентиляційного обладнання здійснюються не рідше одного разу на півроку.

Отже, правильно розрахована та змонтована вентиляційна система відіграє ключову роль у створенні безпечних умов праці під час переплавлення і переробки алюмінієвих відходів, забезпечуючи ефективне видалення шкідливих виділень і надлишкового тепла.

На рисунку 4.2 зображена схема вентиляції на одній з ділянок ливарно-штампувального виробництва.

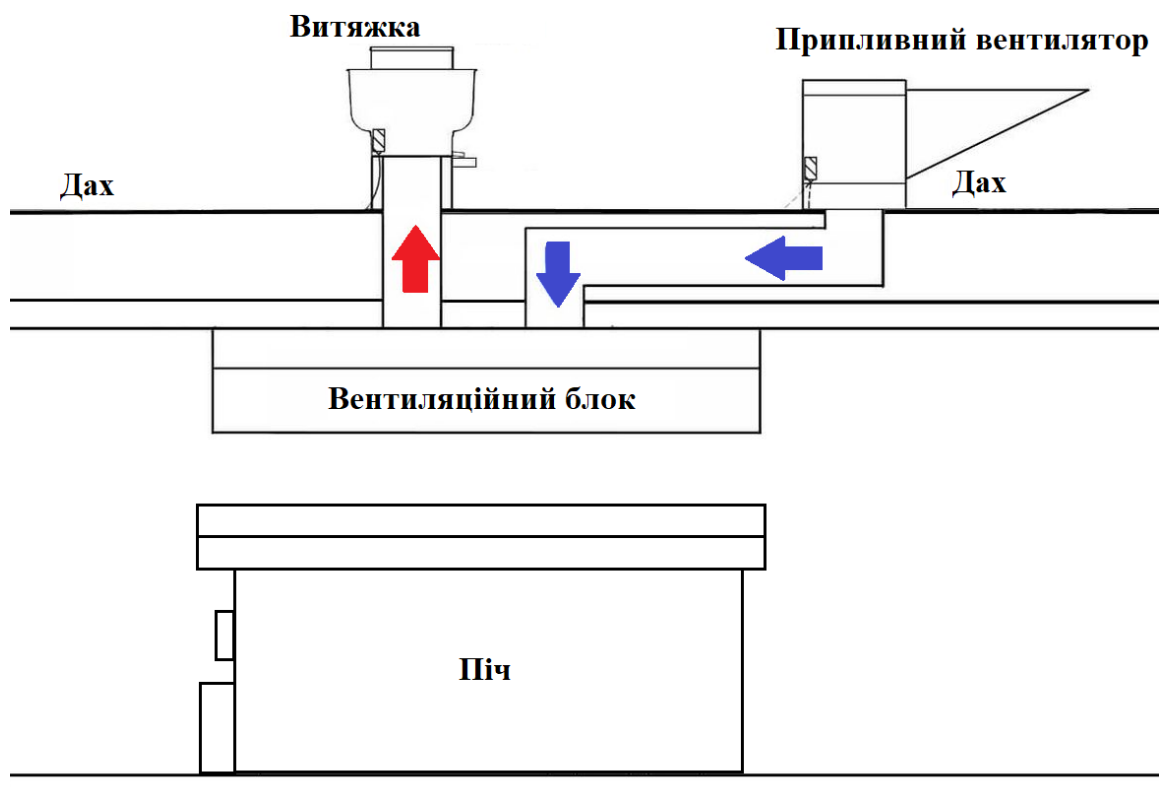


Рисунок 4.2 – Схема вентиляції

4.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

4.4.1 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У виробничому середовищі, де здійснюється переплавлення, лиття та подальша обробка алюмінієвих відходів, можливе виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із технічними несправностями, порушенням правил експлуатації обладнання, або зовнішніми факторами. З огляду на специфіку технологічного процесу, найпоширенішими типами аварій є: розлив або бризки розплавленого металу, займання пилу чи залишків мастильних речовин, коротке замикання в електрообладнанні, руйнування або вибух ємності при термічному перевантаженні, а також травмування працівників при механічній дії рухомих частин агрегатів.

Під час роботи з плавильною піччю типу САТ та заливання форм, особливу небезпеку становить контакт розплаву з вологими або погано підготовленими формами, що може спричинити вибухове викидання металу. Для запобігання цьому форми повинні бути повністю просушені, а операції заливання здійснюватися з дотриманням безпечної дистанції та використанням захисних засобів – щитків, рукавиць і фартухів. У зоні розливу не допускається перебування сторонніх осіб.

Іншою потенційно аварійною ситуацією є займання пилу, стружки або полімерних залишків, які можуть накопичуватись під час вибивання та очищення виливків. Алюмінієвий пил є вибухонебезпечним у певних концентраціях. Для усунення цього ризику проводиться регулярне прибирання виробничих приміщень, організовується ефективна вентиляція, а також виключається використання відкритого вогню чи іскроутворювального інструменту в пиловмісному середовищі.

У разі короткого замикання або загоряння електрообладнання (печі, дробоструминні установки, лабораторні прилади), необхідно негайно знеструмити агрегат через аварійний вимикач і використати вогнегасник відповідного класу (порошковий або вуглекислотний). Усі робочі зони мають

бути оснащені первинними засобами пожежогасіння, які проходять технічну перевірку не рідше одного разу на рік.

У випадку руйнування термічного обладнання, що супроводжується викидом гарячих газів або уламків, працівники повинні негайно залишити небезпечну зону, увімкнути систему загальної вентиляції та повідомити відповідального за охорону праці. Повернення до місця події допускається лише після перевірки технічним персоналом.

З метою мінімізації наслідків аварійних ситуацій персонал проходить регулярні інструктажі з вимог безпеки, включаючи порядок дій при виникненні надзвичайних обставин. На видимих місцях у кожному приміщенні розміщуються плани евакуації, схеми вимкнення електроживлення та контактні номери аварійних служб.

Таким чином, запобігання аваріям і чітке дотримання інструкцій у разі їх виникнення є критично важливою складовою системи безпеки під час переробки технологічних відходів алюмінієвих сплавів.

4.4.2 Пожежна безпека

З огляду на специфіку виконуваних робіт, пов'язаних із переплавленням алюмінієвих сплавів, їх подальшою обробкою та використанням електро- і термообладнання, дотримання вимог пожежної безпеки є одним із ключових факторів збереження життя і здоров'я працівників, а також цілісності майна підприємства.

Основні пожежонебезпечні фактори в умовах виробництва включають:

- роботу з відкритими джерелами тепла – плавильні та термічні печі;
- утворення дрібнодисперсного алюмінієвого пилу, здатного до самозаймання або вибуху в повітрі;
- наявність мастильних матеріалів і технологічних залишків, які можуть бути легкозаймистими;

- високе електронавантаження приладів та ймовірність короткого замикання;
- перегрівання проводки або контактів у разі поганої ізоляції чи перевищення навантаження.

Виробничі приміщення підприємства класифікуються за категорією Б (вибухопожежонебезпечна) відповідно до НАПБ Б.03.002-2007 [54]. У зв'язку з цим на об'єкті запроваджено низку інженерно-технічних та організаційних заходів для мінімізації ризиків займання.

У кожному виробничому та лабораторному приміщенні передбачено:

- первинні засоби пожежогасіння – вогнегасники порошкового (ВП-5) або вуглекислотного (ВБК-2) типу, розміщені у легкодоступних місцях;
- пожежні щити, що укомплектовані відрами, лопатами, бочками з піском, пожежними гаками та іншими інструментами;
- системи природної та примусової вентиляції, які перешкоджають накопиченню горючих парів і пилу;
- сигналізацію та оповіщення про пожежу, а також чітко визначені евакуаційні маршрути, що позначені світловими табличками.

Обов'язковими є періодичні огляди стану електропроводки, печей, заземлення, силових кабелів, а також перевірка справності автоматичних вимикачів та засобів пожежогасіння. Обладнання очищується від пилу та технологічних відходів, що можуть стати джерелом займання.

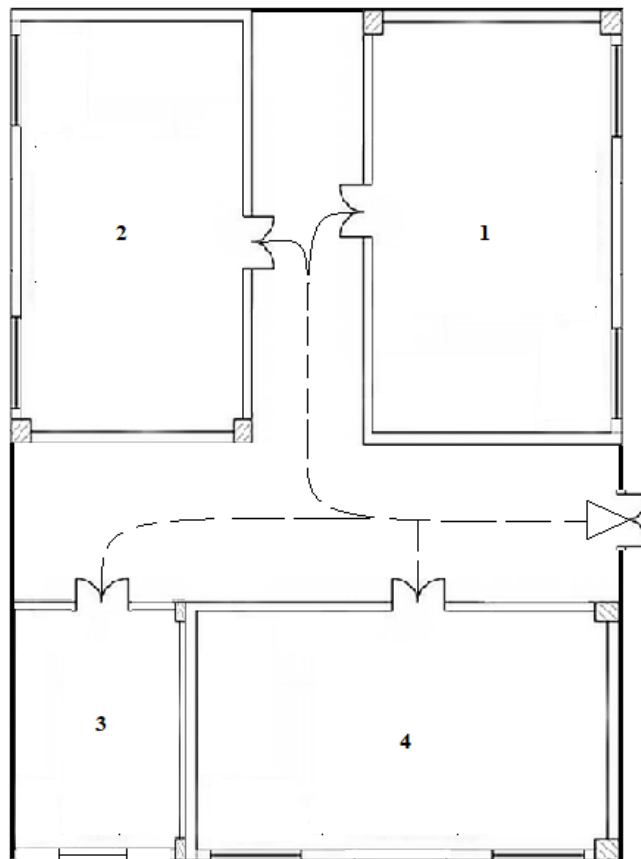
Заборонено:

- використання несправного електрообладнання;
- залишення працюючих печей без нагляду;
- зберігання горючих рідин або матеріалів поблизу джерел тепла;
- куріння та використання відкритого вогню у виробничих зонах.

Пожежна безпека також включає навчання персоналу, який щорічно проходить інструктаж і практичні заняття з правил поведінки при виникненні пожежі. На стендах розміщено інструкції з дій у разі загоряння, номери виклику пожежної служби, схеми евакуації та розташування вогнегасників.

Завдяки дотриманню комплексу пожежно-профілактичних заходів та постійному контролю за станом технічних засобів, рівень пожежної безпеки у виробничих підрозділах виробництва забезпечується на належному рівні.

На рисунку 4.3 вказаний плану евакуації з ливарно-штампувального виробництва.



1 – ділянка ливарно-штампувального виробництва; 2 – ділянка термообробки; 3 – технологічне бюро; 4 – складське приміщення

Рисунок 4.3 – План евакуації

4.4.3 Вимоги безпеки під час повітряної тривоги

З огляду на введення воєнного стану в Україні, підприємства зобов'язані дотримуватися вимог щодо дій персоналу у разі виникнення загроз повітряного нападу. У зв'язку з цим питання організації безпечного укриття та евакуації працівників набуває особливого значення в системі охорони праці.

Після подачі сигналу «Повітряна тривога» через централізовану систему оповіщення (гучномовці, сирени, внутрішні радіоповідомлення), усі працівники мають негайно припинити виконання робіт, знеструмити обладнання, покинути робочі місця та організовано прямувати до найближчого укриття або захисної споруди цивільного захисту.

На території підприємства чітко визначено кілька сховищ, пристосованих для перебування персоналу під час повітряної небезпеки. Укриття забезпечено:

- запасом питної води,
- аптечками першої допомоги,
- вогнегасниками,
- аварійним освітленням,
- місцями для сидіння та засобами зв'язку.

У всіх виробничих приміщеннях розміщено інформаційні стенди, які містять:

- план евакуації з відповідного цеху або лабораторії,
- маршрут руху до найближчого укриття,
- перелік відповідальних осіб за евакуацію в кожному підрозділі.

Працівникам заборонено залишатися біля працюючого обладнання, намагатися завершити технологічний цикл або брати з собою особисті речі, крім документів. Особливо небезпечно перебувати поблизу плавильних печей, пресів, електрообладнання та вибухонебезпечних матеріалів.

Вихід із укриття дозволяється лише після офіційного повідомлення про відбій повітряної тривоги, яке також надходить через систему оповіщення. Після повернення до робочих місць працівники зобов'язані перевірити справність обладнання, відновити живлення лише за дозволом відповідального за дільницю та відновити технологічний процес у штатному режимі.

Регулярно проводяться тренувальні евакуації, результати яких фіксуються у відповідних журналах. Відповідальні особи перевіряють

наявність працівників в укриттях, дотримання правил евакуації та виконання алгоритму дій у разі небезпеки.

Таким чином, дотримання чітких правил поведінки під час сигналу повітряної тривоги дозволяє зберегти життя та здоров'я працівників навіть за умов бойових загроз, що є невід'ємною частиною сучасної системи охорони праці та цивільного захисту в умовах воєнного часу.

4.5 Висновки за розділом

У ході виконання робіт з переробки технологічних відходів алюмінієвих сплавів виявлено низку небезпечних та шкідливих факторів, зокрема вплив високих температур, шуму, пилу, електричного струму. Проведено оцінку умов праці, включаючи рівень шуму, освітленості, параметри вентиляції, а також заходи електро- і пожежної безпеки.

Запроваджені технічні й організаційні рішення забезпечують належний рівень охорони праці. Особлива увага приділена діям у надзвичайних ситуаціях, зокрема при аваріях, пожежах та повітряних тривогах. Загалом умови виробництва відповідають нормативним вимогам та сприяють зниженню виробничих ризиків.

ВИСНОВКИ

По результатам проведеного дослідження під час роботи над магістерською дисертацією рекомендується кузнечній ділянці термічного виробництва застосовувати литі заготовки з алюмінієвого сплаву 1933 як матеріал для налагодження та випробувань штампів КГШП та оснащення для обрізки облоя на обрізних пресах, а також для підбору типорозміру заготовок під штампування.

Для зниження пористості по всьому перерізу прутків малого діаметра та зменшення скупчення несплошностей у приповерхневій зоні прутків більшого діаметра під час лиття рекомендується застосовувати рафінування, заливку ламінарним потоком із нижнім живленням при заповненні форми, лиття в кокіль, а також використання установки вакуумування ВРП-025.

Рекомендується передбачити заходи для запобігання потраплянню відштампованих із литих прутків деталей у подальше виробництво (наприклад, шляхом нанесення насічки зубилом рисок або умовних позначок безпосередньо після деформації, вихідних за межі припуску на механічну обробку, або застосування укорочених заготовок, що призводить до недооформлення частини тіла штампів тощо).

Відштамповані з литих прутків заготовки підлягають утилізації у встановленому на підприємстві порядку або повторному переплавленню у прутків для налагодження та випробувань штампів.

Вихідним матеріалом для литих пруткових заготовок можуть слугувати: обрізки, макротемплети, інші залишки зразків із алюмінієвого сплаву 1933 після випробувань у ЦЗЛ або облою від штампів, що пройшов травлення.

Поряд із литими прутковими заготовками з деформованого алюмінієвого сплаву 1933 вважається можливим застосування литих пруткових заготовок з інших деформованих алюмінієвих сплавів, а також ливарних алюмінієвих сплавів, що використовуються на нашому підприємстві.

CONCLUSIONS

Based on the research conducted during the master's thesis, it is recommended that the forging section of the thermal production facility use cast billets from aluminum alloy 1933 as material for die adjustment and testing of closed-die forging (CDF) tools and equipment for flash trimming on trimming presses, as well as for selecting billet sizes for forging.

To reduce porosity across the cross-section of small-diameter rods and minimize the accumulation of discontinuities in the near-surface zone of larger-diameter rods during casting, it is advisable to apply refining, bottom-fed laminar pouring during mold filling, casting into metal molds (permanent molds), and to use the vacuum unit VRP-025.

Measures should be taken to prevent forged parts made from cast rods from entering further production. This can include applying notches or identification marks with a chisel immediately after deformation (beyond the machining allowance), or using shortened billets that result in incomplete formation of part geometry.

Forgings made from cast rods should be disposed of according to the established procedure at the enterprise or remelted into billets for further use in die adjustment and testing.

The source material for cast rod billets may include: trimmings, macro-templates, other residual samples of aluminum alloy 1933 after testing in the central plant laboratory (CPL), or flash from forged parts that has undergone etching.

Along with cast rod billets made from wrought aluminum alloy 1933, the use of cast rod billets from other wrought aluminum alloys, as well as casting aluminum alloys used at our enterprise, is considered possible.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Sustainable transformation of waste Aluminium into high-performance composites: A review / A. Al Mahmood et al. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2024.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2024.11.002> (date of access: 20.02.2025).
2. Composite material selection for aircraft structures based on experimental and numerical evaluation of mechanical properties / G. Kastratović et al. *Procedia Structural Integrity*. 2021. Vol. 31. P. 127–133.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.021> (date of access: 20.02.2025).
3. The effects of material variations on aircraft inspection schedules based on stochastic crack growth model / C. CHEN et al. *International Journal of Fatigue*. 2008. Vol. 30, no. 5. P. 861–869.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.06.003> (date of access: 20.02.2025).
4. Sustainable transformation of waste Aluminium into high-performance composites: A review / A. Al Mahmood et al. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2024.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2024.11.002> (date of access: 20.02.2025).
5. A sub-micron precision machining and measurement method of long travel metal guideways / Z. Li et al. *Journal of Manufacturing Processes*. 2025. Vol. 133. P. 947–956. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.11.078> (date of access: 20.02.2025).
6. Dong Y., Hussain I., He S. Structural topology optimization of aircraft wing leading edge fabricated of multilayer composites. *Aerospace Science and Technology*. 2025. P. 109993. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2025.109993> (date of access: 20.02.2025).
7. Barot R. P., Sutaria M. P. Effect of multiple remelting on behaviour of AlSi5Cu3 Aluminium alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2022.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.608> (date of access: 20.02.2025).

8. Study on Hydrogen-assisted Stress Corrosion Cracking Behavior of 7050 Aluminum Alloy / Q. Zhang et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.02.253> (date of access: 20.02.2025).
9. Towards radical circular economy futures: Addressing social relations of production / L. J. Llorente-González et al. *Technological Forecasting and Social Change*. 2025. Vol. 213. P. 123972. URL: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.123972> (date of access: 20.02.2025).
10. A review on microstructure design, processing, and strengthening mechanism of high-strength titanium alloys / G. Xu et al. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2025.01.005> (date of access: 20.02.2025).
11. A framework for effective and clean conversion of machining waste into metal powder feedstock for additive manufacturing / S. Dhiman et al. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. Vol. 4. P. 100151. URL: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100151> (date of access: 20.02.2025).
12. Recycled rubber wastes-based polymer composites with flame retardancy and electrical conductivity: Rational design, modeling and optimization / P. Wiśniewska et al. *Composites Science and Technology*. 2024. Vol. 251. P. 110563. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110563> (date of access: 20.02.2025).
13. Naga Sai Goli V. S., Singh D. N. Polymer blends manufactured from fresh & landfill mined plastic wastes: Are they composites?. *Journal of Cleaner Production*. 2023. P. 139096. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139096> (date of access: 20.02.2025).
14. Recycling of hazardous and industrial solid waste as raw materials for preparing novel high-temperature-resistant sulfoaluminate-magnesia aluminum spinel cement / C. Ren et al. *Journal of Building Engineering*. 2022. P. 105550. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105550> (date of access: 12.05.2025).

15. Solid waste management in China: Policy and driving factors in 2004–2019 / W. Guo et al. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 173. P. 105727. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105727> (date of access: 12.05.2025).
16. Surface nanocrystallization of body-centered cubic beta phase in Ti–6Al–4V alloy subjected to ultrasonic surface rolling process / N. Ao et al. *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 361. P. 35–41. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.045> (date of access: 12.05.2025).
17. Microstructure and mechanical properties of 7075-T6 aluminum alloy plates by welding with weld reinforcement rolling / Z. Wang et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2024. Vol. 889. P. 145854. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145854> (date of access: 12.05.2025).
18. Effect of solution treatment time on plasticity and ductile fracture of 7075 aluminum alloy sheet in hot stamping process / H.-c. GENG et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022. Vol. 32, no. 11. P. 3516–3533. URL: [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(22\)66036-9](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(22)66036-9) (date of access: 12.05.2025).
19. Paramasivam P., Vijayakumar S. Mechanical characterization of aluminium alloy 6063 using destructive and non-destructive testing. *Materials Today: Proceedings*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.312> (date of access: 12.05.2025).
20. Enes Parlak İ., Emel E. Deep learning-based detection of internal defect types and their grades in high-pressure aluminum castings. *Measurement*. 2024. P. 116119. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116119> (date of access: 12.05.2025).
21. A Review on Solid-State Recycling of Aluminum Machining Chips and Their Morphology Effect on Recycled Part Quality / Y. M. Altharan et al. *Heliyon*. 2024. P. e34433. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34433> (date of access: 12.05.2025).

22. Forecasting global aluminium flows to demonstrate the need for improved sorting and recycling methods / S. Van den Eynde et al. *Waste Management*. 2022. Vol. 137. P. 231–240. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.019> (date of access: 12.05.2025).
23. Brough D., Jouhara H. The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*. 2020. Vol. 1-2. P. 100007. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100007> (date of access: 12.05.2025).
24. Environmental Impact Minimization via Production Planning for Aluminum Billet Molding Process / Y. Wang et al. *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 98. P. 169–174. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.025> (date of access: 12.05.2025).
25. Metallic materials properties development and standardization: b MMPDS-14, July 2019 / ed. by Battelle Memorial Institute. Columbus Laboratories et al. Washington, D.C.] : Federal Aviation Administration, 2019.
26. Assessing the efficiency of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) based sorting of post-consumer aluminium scrap / S. V. den Eynde et al. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 105. P. 278–283. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.046> (date of access: 12.05.2025).
27. Recycling Waste Aluminium Foil to Bio-Acceptable Nano Photocatalyst [Aluminium oxide (Al_2O_3) & Aluminium oxyhydroxide (AlOOH)] ; Dye Degradation as Proof-of-Concept / B. Sharma et al. *Materials Advances*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1039/d4ma00717d> (date of access: 12.05.2025).
28. Recycled aluminium feedstock in metal additive manufacturing: A state of the art review / V. Yakubov et al. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, no. 5. P. e27243. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27243> (date of access: 12.05.2025).
29. A systematic review of the production of high-purity aluminum: Applications, preparation, and mechanisms / B. Zeng et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 34. P. 987–1009. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.085> (date of access: 12.05.2025).

30. Variations in casting temperatures effect of re-melted 6061 aluminum alloy on tensile strength / Zulfadhli et al. *Results in Materials*. 2025. Vol. 26. P. 100691. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100691> (date of access: 12.05.2025).
31. Can e-waste recycling provide a solution to the scarcity of rare earth metals? An overview of e-waste recycling methods / S. S. V. Varsha et al. *Science of The Total Environment*. 2024. P. 171453. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171453> (date of access: 11.03.2025).
32. Study of formation processes, structure and properties of porous frameworks / M. Yamshinskij та ін. Casting processes. 2024. Т. 155, № 1. С. 58–71. URL: <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.058> (дата звернення: 15.05.2025).
33. Chang I., Zhao Y. Advances in powder metallurgy. Woodhead Publishing Limited, 2013. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857098900> (date of access: 12.05.2025).
34. Xu D., Meng L., Zhang C., Chen X., Zhang X. Interface microstructure evolution and bonding mechanism during vacuum hot pressing bonding of 2A12 aluminum alloy // *Materials Characterization*. — 2022. — Vol. 189. — Article 111997. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111997> (date of access: 12.05.2025).
35. Iron reduction in aluminum by electroslog refining / Chong Chen et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012. Vol. 22, Issue 4. P. 964–969. URL: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61271-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61271-5) (date of access: 12.05.2025).
36. Tunable electrical and mechanical properties of anode foils for aluminum electrolytic capacitors prepared by additive manufacturing technology / Guangzhu Bai et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 30. P. 9647–9655. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.053> (date of access: 12.05.2025).

37. Aluminum Alloys: Structure and Properties / L.F. Mondolfo. Butterworth-Heinemann, 1976. 497 p. ISBN: 978-0-408-70932-3. URL: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-04239-9> (date of access: 12.05.2025).
38. A Direct Material Reuse Approach Based on Additive and Subtractive Manufacturing Technologies for Manufacture of Parts from Existing Components / V. T. Le et al. *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 61. P. 229–234. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.190> (date of access: 20.02.2025).
39. Matveev A. E. Energy-efficient scientific-technological approaches to the processing of plastic waste PET, PE, PP, PS to produce hydrogen-containing gas and titanium carbide powder. *Materials Today Sustainability*. 2024. Vol. 27. P. 100802. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100802> (date of access: 11.03.2025).
40. Scenario-based DEA assessment of energy-saving technological combinations in aluminum industry / Ying Guo et al. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 260. Article 121010. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121010> (date of access: 12.05.2025).
41. Wanja D. N., Awaino E., Chakraborty S. Metal Value Recovery from Industrial Waste Using Advanced Physicochemical Treatment Technologies. 2025. P. 35–54. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21884-2.00019-8> (date of access: 20.02.2025).
42. Elvatech Ltd. Ручний рентгенофлуоресцентний спектрометр Prospector 2 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://elvatech.com/uk/products-3/prospector-2/>
43. ТОВ «Асма». Розривна машина ZD10T91M [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://asma.net.ua/uk/p/1464605869-razryvnaya-mashina-zd10t91m/>
44. Закон України "Про охорону праці", [Електронний ресурс] : від 21.11.2002, № 229-IV / Верховна Рада України. — Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>

45. Наказ "Про затвердження Вимог безпеки та захисту здоров'я під час використання виробничого обладнання працівниками", [Електронний ресурс] : від 28.12.2017, № 2072 / Міністерство юстиції України . – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0097-18#Text>

46. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Класифікація [Текст] : (EN 133:2001, idt) : ДСТУ EN 133:2005. – [Чинний з 2006-01-07]. – Київ : ДСТУ, 2005.

47. Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони [Електронний ресурс] : Наказ МОЗ України від 14.07.2020 р. № 1596. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0742-20#Text>

48. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку [Текст] : ДСН 3.3.6.037-99. – [Чинний з 1999-01-07]. – Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 1999.

49. Державні будівельні норми природного та штучного освітлення : ДБН В 2.5-28-2006. – [Чинний від 2006- 10-01]. – К. : Держстандарт України, 2008. – 79 с.

50. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення [Текст] : ДБН В.2.2-28:2010. – [Чинний з 2011-10-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 52 с.

51. Розділ з охорони праці в дипломних роботах: Рекомендації до виконання [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О.Г. Левченко, Г.В. Демчук. – Електронні текстові дані (1 файл: 90,9 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 16 с. – Режим доступу : <https://opcb.kpi.ua/wp-content/uploads/2015/05/02-Розділ-з-охорони-праці-бакалавр-ІФФ.pdf>

52. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ-2017. – Київ : Держстандарт України, 2017. – 617 с.

53. Опалення, вентиляція та кондиціонування [Текст] : ДБН В.2.5-67:2013. – [Чинний з 2013-01-25]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. – 46 с.

54. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою [Текст] : ДСТУ Б В.1.1-36:2016. – [Чинний з 2017-01-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. – 10 с.