

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну  
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»  
(повне найменування кафедри)

**Пояснювальна записка**  
до дипломного проєкту (роботи)

магістра  
(ступінь вищої освіти)

на тему **ПІДВИЩЕННЯ ОПОРУ ВТОРИННИХ АЛЮМІНІЄВИХ  
СПЛАВІВ КАВІТАЦІЙНО-КОРОЗІЙНОМУ РУЙНУВАННЮ**

Виконав: студент 2 курсу, групи БАД-213м

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Композиційні та порошкові матеріали,  
покриття»

Павло БЕЗСОНОВ  
(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н., проф. МІТЯЄВ О.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент к.т.н., доц. КАПУСТЯН О.  
(прізвище та ініціали)

2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Будівництва, архітектури та дизайну  
Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»  
Ступінь вищої освіти магістр  
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»  
(код і найменування)  
Освітня програма (спеціалізація) «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олександр МІТЯЄВ

« 11 » 10 2024 року

ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

БЕЗСОНОВА Павла Георгійовича

(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) «Підвищення опору вторинних алюмінієвих сплавів кавітаційно-корозійному руйнуванню»

керівник проекту (роботи) Олександр МІТЯЄВ, д.т.н., професор,  
(науковий ступінь, вчене звання, ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 11 » жовтня 20 24 року № 407

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 20 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) вихідні властивості вторинних алюмінієвих сплавів; заводська технологія виготовлення; обладнання та устаткування

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Загальна характеристика кавітаційно-корозійного руйнування. 2. Фактори, що найбільше впливають на процес. 3. Шляхи підвищення опору руйнуванню. 4. Матеріали та методика досліджень. 5. Розробка дослідної технології. 6. Висновки. 7. Перелік літературних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Презентація

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
 Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Будівництва, архітектури та дизайну  
 Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»  
 Ступінь вищої освіти магістр  
 Спеціальність 132 «Матеріалознавство»  
(код і найменування)  
 Освітня програма (спеціалізація) «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олександр МІТЯЄВ

« 11 » 10 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

БЕЗСОНОВА Павла Георгійовича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) «Підвищення опору вторинних алюмінієвих сплавів кавітаційно-корозійному руйнуванню»

керівник проекту (роботи) Олександр МІТЯЄВ, д.т.н., професор,  
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 11 » жовтня 20 24 року № 407

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 20 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) вихідні властивості вторинних алюмінієвих сплавів; заводська технологія виготовлення; обладнання та устаткування

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Загальна характеристика кавітаційно-корозійного руйнування. 2. Фактори, що найбільше впливають на процес. 3. Шляхи підвищення опору руйнуванню. 4. Матеріали та методика досліджень. 5. Розробка дослідної технології. 6. Висновки. 7. Перелік літературних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Презентація

## РЕФЕРАТ

Наукова робота складається з 62 сторінок, 3 рисунків, 6 таблиць, 52 літературних джерел.

Проводився порівняльний аналіз впливу технології отримання та оброблення вторинних алюмінієвих сплавів на структуру та кавітаційно-корозійну стійкість.

**Об'єкт досліджень** – процеси кавітаційно-корозійного руйнування вторинних силумінів.

**Предмет дослідження** – фізико-механічні та експлуатаційні властивості вторинного силуміну АК8МЗ, що отриманий за різними технологічними варіантами.

**Метою роботи** є пошук і розробка ефективного та низьковитратного методу забезпечення необхідної мікроструктури та високих показників кавітаційно-корозійної стійкості вторинних алюмінієвих сплавів для виготовлення деталей відповідального призначення.

**Наукова новизна** роботи полягає в тому, що отримано нові дані про характер і механізми кавітаційно-корозійного руйнування вторинних силумінів в умовах агресивного середовища (водний розчин 3,5 % NaCl).

**Практична цінність** результатів роботи полягає в тому, що на підставі проведених досліджень і отриманих даних, щодо опору сплавів руйнуванню в умовах кавітаційного навантаження та активного корозійного середовища, можливе прогнозування надійності і довговічності виробів, котре розширює області застосування вторинних силумінів.

Робота виконана в рамках держбюджетної НДР № 02918 «Розробка процесів нано- та мікромодифікування конструкційних матеріалів» та ГД № 2917 «Розробка та промислова апробація технології виробництва алюмінієвих сплавів з інвертованою структурою для фасонного лиття деталей

відповідального призначення» між НУ «Запорізька політехніка» та ПАТ «Мотор Січ».

Виконана дипломна робота включає такі складові: літературний огляд технічної інформації за темою дипломної роботи; опис методик, що застосовували в процесі дослідження; оброблення експериментальних даних; висновки.

Ключові слова: АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, МОДИФІКУВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС, МІКРОСТРУКТУРА, КАВІТАЦІЙНО-КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ.

## ABSTRACT

The scientific work consists of 13 pages, 3 figures, 2 tables, 9 literary sources.

A comparative analysis of the influence of the technology of production and processing of secondary aluminum alloys on the structure and cavitation-corrosion resistance was carried out.

The object of research is the processes of cavitation-corrosion destruction of secondary silumins.

The subject of the study is the physical, mechanical and operational properties of the secondary silumin AK8M3 obtained by various technological options.

The purpose of the work is to find and develop an effective and low-cost method of ensuring the necessary microstructure and high indicators of cavitation-corrosion resistance of secondary aluminum alloys for the manufacture of parts of a responsible purpose.

The scientific novelty of the work lies in the fact that new data were obtained on the nature and mechanisms of cavitation-corrosion destruction of secondary silumins in the conditions of an aggressive environment (aqueous solution of 3.5% NaCl).

The practical value of the work results is that, based on the research conducted and the data obtained, regarding the resistance of alloys to destruction under conditions of cavitation load and an active corrosive environment, it is possible to predict the reliability and durability of products, which expands the areas of application of secondary silumins.

The work was carried out within the framework of the state budget NDR No. 02918 "Development of processes of nano- and micromodification of structural materials" and GD No. 2917 "Development and industrial approval of the technology for the production of aluminum alloys with an inverted structure for shaped casting of parts of responsible purpose" between NU "Zaporizka Polytechnic" and PJSC "Motor Sich".

The completed thesis includes the following components: a literature review of technical information on the topic of the thesis; a description of the methods used in the research process; experimental data processing; conclusions

**Keywords:** ALUMINUM ALLOYS, MODIFYING COMPLEX, MICROSTRUCTURE, CAVITATION AND CORROSION RESISTANCE.

## ЗМІСТ

|   |           |
|---|-----------|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ.....   | 9         |
| ВСТУП.....  | 10        |
| <b>1 КАВІТАЦІЙНО – КОРОЗІЙНЕ РУЙНУВАННЯ.....</b>  | <b>12</b> |
| 1.1 Загальна характеристика і механізми руйнування .....  | 12        |
| 1.2 Основні типи кавітації.....   | 15        |
| 1.3 Фактори, що найбільше впливають на процес .....   | 17        |
| 1.3.1 Механічні фактори.....  | 17        |
| 1.3.2 Хімічні фактори.....  | 19        |
| 1.3.3 Матеріальні фактори .....   | 21        |
| 1.3.4 Експлуатаційні фактори.....   | 22        |
| 1.4 Матеріали підвищеної стійкості до гідродинамічного навантаження .....   | 23        |
| 1.5 Загальна характеристика вторинних силумінів .....   | 26        |
| 1.6 Шляхи підвищення опору руйнуванню .....   | 27        |
| 1.6.1 Вплив складу сплаву.....  | 28        |
| 1.6.2 Вплив термічної обробки .....   | 29        |
| 1.6.3 Модифікування структури .....   | 31        |
| 1.6.4 Поверхневе зміцнення.....   | 32        |
| 1.6.5 Оптимізація процесу лиття .....   | 33        |
| 1.6.6 Механічна обробка.....  | 33        |
| 1.7 Визначення мети і задач дослідження .....   | 34        |
| <b>2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>  | <b>35</b> |
| 2.1 Обґрунтування методу дослідження .....  | 35        |
| 2.2 Обладнання та технологія отримання дослідного сплаву.....   | 36        |
| 2.3 Визначення хімічного складу .....   | 39        |
| 2.4 Визначення механічних властивостей .....  | 40        |
| 2.5 Металографічний та фрактографічний аналізи.....   | 41        |
| 2.6 Визначення кавітаційно – корозійної стійкості .....   | 42        |
| <b>3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ СИЛУМІНІВ З ПІДВИЩЕНИМ ОПОРОМ<br/>КАВІТАЦІЙНО-КОРОЗІЙНОМУ РУЙНУВАННЮ.....</b> | <b>45</b> |

|   |    |
|---|----|
| 3.1 Технологічні заходи підвищення механічних і службових властивостей.....   | 45 |
| 3.2 Розробка складу рафінувально-модифікувального комплексу .....             | 46 |
| 3.3 Технологія обробки розплаву рафінувально-модифікувальним комплексом. .... | 48 |
| 3.4 Кавітаційно - корозійна стійкість дослідних сплавів .....                 | 50 |
| ВИСНОВКИ .....  | 54 |
| ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ .....   | 56 |

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ**

pH – рівень кислотності або лужності середовища;

AISI316, AISI304 – марки сталей;

AK, AM – маркування алюмінієвих сплавів;

Al-Si – силуміни;

Al<sub>2</sub>Cu, Mg<sub>2</sub>Si, TiAl<sub>3</sub> – інтерметалідні фази;

E – відносна кавітаційно-корозійна стійкість;

AK8M3 – маркування сплаву;

ENW5000 – тип полуменевої відбивної печі;

KCl, NaCl, AlF<sub>3</sub> – складові рафінувального флюсу;

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, SiC, Ti, S – складові модифікатора;

P120-P240, P400-P600, P240-P1200 – зернистість наждачного паперу;

OES – оптико-емісійна спектроскопія;

УММ-20 – марка розривної машини;

HRB – твердість за методом Роквелла;

MIM-8 – марка оптичного мікроскопа;

T5 – режим термічного оброблення;

$\sigma_b$  – границі міцності;

$\delta$  – відносне видовження;

Al<sub>3</sub>Fe, Al<sub>5</sub>SiFe, Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe – інтерметалідні фази;

$\rho$  – густина.

## ВСТУП

З моменту початку промислового освоєння алюмінію пройшло менш ніж 200 років, а він та його сплави вже міцно посіли позиції провідного конструкційного матеріалу після сплавів на основі заліза. Темпи виробництва і освоєння крилатого металу вражають: 1855 рік – 0, 006 т; 1885 рік – 15 т; 1900 рік – 8000 т; 1920 рік – 128000 т; 1946 рік – 681000 т; 1999 рік – 24 млн. тонн первинного алюмінію; 2004 рік - 31 млн. тонн, 2021 рік – 67 млн тонн.

Проблема полягає в тому, що виробництво алюмінію, з урахуванням всіх стадій його отримання, споживає велику кількість паливно-енергетичних ресурсів і дуже сильно забруднює навколишнє середовище. У той же час, широке застосування цього конструкційного матеріалу призвело до накопичення значної кількості алюмінієвого брухту та відходів виробництва. Тому в світі спостерігається стійка тенденція випереджального зростання темпів виробництва вторинних сплавів по відношенню до первинних. Процес, з економічної точки зору, є дуже вигідним та дозволяє зменшити енергетичні витрати в 20 разів і знизити рівень шкідливих викидів до навколишнього середовища на 95 %. Однак вторинні сплави мають значно нижчу якість ніж первинні.

На сьогоднішній день кожен третій кілограм алюмінію та його сплавів, що експлуатуються промисловістю, отриманий шляхом рециклінгу. Також тенденції сьогодення свідчать про те, що потреба зменшення ваги автомобільного, залізничного, водного та повітряного транспорту, з метою підвищення корисного навантаження та потужності, задовольняється, у першу чергу, поширенням застосування алюмінієвих сплавів. Широке використання алюмінієвих сплавів у транспортному машинобудуванні обумовлює їх контакт з різними агресивними середовищами, у тому числі швидкорухомими (корпуса двигунів внутрішнього згорання з рідинною системою охолодження; картера; корпуси двигунів моторних човнів, яхт; помпи для перекачування рідин і палива

та ін.). Силуміни характеризуються гарними ливарними властивостями, високою герметичністю і сприятливим сполученням механічних, а також експлуатаційних властивостей. Герметичність особливо необхідно враховувати при проектуванні, виробництві і контролі литих заготовок для деталей гідравлічних і пневматичних пристроїв, а також різних деталей водного транспорту. При цьому не менш важливою задачею є забезпечення високого рівня кавітаційної стійкості матеріалів.

## **РОЗДІЛ 1 КАВІТАЦІЙНО – КОРОЗІЙНЕ РУЙНУВАННЯ**

### **1.1 Загальна характеристика і механізми руйнування**

Саме явище «кавітація» здебільшого є небажаним [1-33] і виникає тоді, коли тиск рідини падає настільки сильно, що зменшується нижче рівня тиску пари рідини, що спричиняє формування та під дією високого тиску подальший колапс або згортання невеликих порожнин, або ж бульбашок заповнених парою. Ці бульбашки, що згортаються, можуть створювати ударну хвилю, яка вже, в свою чергу, може призвести до пошкодження обладнання або зниження його ККД.

Утворенні ударні хвилі тим сильніше, чим ближче вони знаходяться до порожнечі, яка згорнулася і швидко втрачають свою силу, коли поширюються від неї. Час існування бульбашок є дуже коротким, приблизно мікросекунда, тому побачити звичайним оком процес існування конкретної бульбашки неможливо. Порожнечі, що згорнулися близько до металевої поверхні деталі або обладнання, викликають циклічні напруги через повторювану імплізію. Ці циклічні напруги призводять до поверхневої втоми металу, утворюючи тип зношування, який також має назву «кавітація» [1-33].

Кавітаційне зношування або кавітаційне руйнування проявляється наступним чином: через повторювальні удари, металева поверхня починає деформуватися і піддаватися наклепу. Проявляються межі окремих зерен, виникають лінії зсуву. Багаторазове повторювання ударів призводить до знеміцнення і наклепу матеріалу на окремих ділянках, що супроводжується зародженням тріщин. Найпершою руйнуванню піддається найменш міцна структурна складова. Потім настає викришування і більш міцніших компонентів матеріалу. В залежності від міцності зерен, а також зв'язку між ними, руйнування може розвиватися або в межах зерен або на їх границях.

Наявність агресивного середовища (наприклад, як морська вода) сприяє збільшенню інтенсивності кавітаційного зношування [32]. Проте вона може додатково підвищитись, якщо збільшиться поверхневий натяг рідини. Найбільш поширеними прикладами такого виду зношення є робочі колеса насоса та вигини, де відбувається миттєва зміна напрямку рідини.

З точки зору фізики, між явищем кавітації та кипінням є певна схожість, проте пара в цих явищах утворюється з різних причин. У випадку кипіння це відбувається через досягання рідиною температури насичення, а надходження додаткового тепла подається, щоб рідина в достатній мірі перетворилася на газ. Для кавітації, як вже зазначалось, через зниження рівня тиску.

Через наявність певних відмінностей в процесі проходження кавітації, її зазвичай поділяють на два основних класи поведінки: інерційна (або перехідна) кавітація та неінерційна (або ж стабільна) кавітація (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 Порівняльна таблиця відмінностей двох типів кавітації [15,25,28]

| Параметр           | Інерційна кавітація                       | Неінерційна кавітація          |
|--------------------|---|--------------------------------|
| Механізм           | Схлопування бульбашок                     | Коливання бульбашок            |
| Енергія            | Висока, концентрована у точці схлопування | Низька, рівномірно розподілена |
| Температура і тиск | Дуже високі (локальні)                    | Помірні                        |
| Застосування       | Хімічні реакції, руйнування матеріалів    | Очистка, терапія               |

Інерційна кавітація (або перехідна) – цей тип виникає, коли бульбашка рідини швидко схлопується під дією зовнішніх сил, створюючи інтенсивні

локальні ефекти. Вона використовується у фізичних і хімічних процесах, наприклад, у кавітаційній ерозії, ультразвуковій обробці матеріалів.

Неінерційна кавітація (або стабільна) – цей тип виникає, коли бульбашка в рідині коливається без повного схлопування. Зазвичай застосовується в ультразвуковій терапії, у технологіях очищень поверхонь і та ін. Обидва типи кавітації активно використовуються в науці, промисловості та медицині.

Можливі значні пошкодження частин деталей та обладнання, через досить сильні ударні хвилі, що викликаються згортанням порожнеч, саме явище кавітації здебільшого є негативним у машинах. Хоча варто зазначити, що все частіше для кавітації знаходять застосування у абсолютно різних життєвих сферах, починаючи, як зазначалось раніше, від очищення води та закінчуючи медициною, де вона приносить позитивні результати. Але під час проєктування машин (турбіни чи гвинти) їй навмисно запобігають, а зменшення негативного впливу кавітації є одним з основних напрямків у вивченні динаміки рідин.

Сам механізм утворення кавітації відбувається наступним чином: коли якийсь об'єм рідини зазнає впливу дуже низького тиску, то від цього він може розірватися і створити порожнечу, цю утворену бульбашку ще називають початком кавітації. Вона може виникати не тільки під час швидкого обертання лопатей гвинта чи насоса, а на абсолютно будь-якій іншій поверхні, навіть на інертних матеріалах, якщо вони обертаються в рідині з достатньою амплітудою та прискоренням [1,3,8,9,15].

У цю утворену початкову порожнину, з навколишнього середовища випаровуються парові гази, і таким чином, бульбашка це зовсім не вакуум, а паровий міхур низького тиску. Після зникнення умов, що спричинили формування бульбашки, рідина починає згортатися через вищий рівень тиску, і від цього під часу руху всередину нарощується імпульс.

Під час остаточного згортання порожнечі, цей імпульс рідини викликає миттєве підвищення температури та тиску газу всередині. Після чого бульбашка повертається до свого початкового розміру, а той газ, що був усередині неї, розсіюється в рідині, при цьому вивільняючи велику кількість енергії, як у

вигляді видимого світла, так і у формі акустичної ударної хвилі. В моменті повного колапсу порожнечі, тиск газу в бульбашці може досягати до 1000 атмосфер, а температура кілька тисяч градусів Цельсія.

## 1.2 Основні типи кавітації

Саме ж явище кавітації [1-33], в залежності від причин її виникнення та характеристик процесу, поділяється на такі основні типи:

Гідродинамічна кавітація – це явище утворення та схлопювання газових або парових бульбашок у рідині через зміну її тиску. Воно виникає, коли локальний тиск у потоці рідини знижується до рівня тиску насиченої пари рідини, що спричиняє випаровування. Як тільки тиск знову підвищується, бульбашки схлопуються, створюючи ударні хвилі, високі температури та механічний вплив на поверхні поблизу. Гідродинамічна кавітація часто виникає у потоках рідини через вузькі канали, клапани, насоси або пропелери.

Акустична кавітація – це утворення та схлопювання бульбашок у рідині під дією звукових або ультразвукових хвиль. При проходженні через рідину, ультразвукові хвилі створюють чергування областей високого (стиснення) та низького (розрідження) тиску. У фазі розрідження виникають бульбашки, які під час фази стиснення схлопуються, виділяючи енергію у формі тепла, світла (світіння кавітації) та ударних хвиль. Акустична кавітація широко використовується у хімічних процесах, очищенні поверхонь, медичних додатках (наприклад, ультразвукове дроблення каменів) та інших технологіях. Основна відмінність з попереднім типом полягає в природі сил, які викликають кавітацію: у гідродинамічній це зміни швидкості та тиску в потоці, а в акустичній – коливання звукових хвиль.

Вібраційна кавітація – це процес утворення та динамічної взаємодії газових або парових бульбашок у рідині під дією змінних тисків, викликаних

механічними вібраціями. Такі вібрації можуть створюватися механічними пристроями (наприклад, вібраторами чи ультразвуковими генераторами), що призводять до коливань тиску в рідині. Вона часто виникає у випадках, коли вібрації мають високу частоту (зокрема ультразвук). Також застосовується в обробці матеріалів, очищенні поверхонь, емульгуванні та інших технологічних процесах.

Оптична кавітація – це процес утворення кавітаційних бульбашок у рідині під дією інтенсивного лазерного випромінювання. Кавітація виникає через нагрів рідини у фокусі лазерного променя, що призводить до утворення бульбашок пари або газу. Характерна для високоенергетичних лазерів із короткими імпульсами. Використовується в мікрохірургії, лазерному очищенні тощо.

Термічна кавітація – це явище утворення та колапсу парових бульбашок у рідині під впливом локального нагрівання. Це відбувається в результаті швидкого підвищення температури, яке призводить до утворення областей із перегрітим паром у рідині. Термічна кавітація має застосування в медицині (наприклад, у лазерній хірургії), очищенні поверхонь, інженерії матеріалів і дослідженнях фізичних властивостей рідин.

Індукована кавітація – це процес утворення і динаміки бульбашок у рідині, що виникає під впливом зовнішніх факторів, таких як ультразвук, гідродинамічні потоки, лазерне випромінювання або інші джерела енергії. Застосовується в медицині (ультразвукова терапія, дроблення каменів), гідродинаміці та хімічній інженерії.

Тож, враховуючи вище сказане можна зрозуміти, що металам або сплавам, які будуть працювати у таких складних умовах, має бути притаманний певний набір фізико-механічних властивостей, а саме:

- механічна міцність (щоб витримувати ударні хвилі рідини і високий тиск);
- твердість (знижує швидкість абразивного зношування від частинок, що рухаються у потоці рідини);

- пластичність (вона дає металу можливість поглинати енергію впливу без руйнувань самого металу);
- стійкість до корозії (знижує пошкодження в агресивних або морських середовищах);
- ерозійна стійкість (спроможність протистояти кавітації та абразивному впливу).

### **1.3 Фактори, що найбільше впливають на процес**

Кавітаційно-корозійне руйнування відбувається через поєднання кавітації та корозійних процесів, що посилюють дію один одного. Основні фактори, які впливають на цей процес, можна поділити на механічні, хімічні та матеріальні [1-33].

#### **1.3.1 Механічні фактори**

***Швидкість потоку рідини.*** Швидкість потоку рідини має значний вплив на виникнення кавітації, оскільки вона визначає зміну тиску у потоці. Згідно з рівнянням Бернуллі, коли швидкість потоку рідини збільшується, тиск у рідині зменшується. Якщо тиск падає нижче за тиск насичення пари рідини при даній температурі, то утворюються кавітаційні бульбашки. У вузьких місцях потоку (наприклад, на вході в клапан, у звуженнях труб, або поблизу лопатей турбін) швидкість рідини збільшується, що може призводити до локального падіння тиску і виникнення кавітації. Також, зі збільшенням швидкості потоку кількість і розмір кавітаційних бульбашок зростає, що може посилити явище кавітації.

Інтенсивна кавітація може призводити до руйнування поверхонь (кавітаційна ерозія) і зниження ефективності обладнання.

**Тиск.** Підвищення тиску знижує ймовірність утворення бульбашок, оскільки для їх формування потрібна зона з нижчим тиском. При високому тиску енергія колапсу бульбашок зростає, що збільшує механічне навантаження на поверхню матеріалу. Зі зростанням тиску зменшується розмір бульбашок, але їх колапс стає інтенсивнішим, що призводить до локального підвищення тиску і температури на поверхні. Вищий тиск може збільшити розчинення газів (наприклад, кисню) у рідині, що посилює електрохімічну корозію.

**Гідродинамічні характеристики.** Нерівності, гострі кути або вузькі місця викликають локалізоване падіння тиску, сприяючи утворенню кавітації. Турбулентність потоку може сприяти більш нерівномірному утворенню та руйнуванню бульбашок, підсилюючи абразивний ефект.

**Частота колапсу бульбашок.** Частота колапсу бульбашок є одним із ключових факторів, які впливають на інтенсивність кавітаційно-корозійного руйнування матеріалів. Колапс кавітаційних бульбашок генерує ударні хвилі та мікрострумені високої енергії. При високій частоті колапсу бульбашок ці ударні хвилі повторюються частіше, що посилює механічну ерозію поверхні.

**Вібрація та турбулентність.** Вібрація та турбулентність значно впливають на кавітаційно-корозійне руйнування, оскільки вони змінюють умови утворення кавітації, її інтенсивність та механізм впливу на матеріали.

Вібрації створюють додаткові змінні тискові коливання у рідині. Ці коливання можуть сприяти зниженню локального тиску, що полегшує утворення кавітаційних бульбашок. А коливання частоти вібрації можуть резонувати з частотою схлопування бульбашок, посилюючи їх руйнівну дію. Вібрації збільшують частоту контакту між бульбашками та поверхнею матеріалу, що сприяє інтенсивнішому кавітаційному впливу. Вони також можуть викликати механічне напруження у матеріалі, знижуючи його стійкість до механічного впливу бульбашок. Вібрація може прискорити видалення продуктів корозії з

поверхні матеріалу, постійно прибираючи свіжі шари, що підсилює корозійне руйнування.

Турбулентність створює хаотичні зміни тиску в рідині, що сприяє утворенню та схлопуванню бульбашок в різних ділянках потоку. У зонах високої турбулентності можуть формуватися більші концентрації бульбашок, що підвищує локалізоване руйнування. Турбулентний потік сприяє нерівномірному розподілу бульбашок і підвищує їхню швидкість, що збільшує енергію удару при схлопуванні. Ударні хвилі в турбулентному потоці можуть бути більш хаотичними і важче прогнозованими, а також мають більший руйнівний потенціал. Турбулентність збільшує масообмін між рідиною та поверхнею, що пришвидшує проникнення агресивних речовин (наприклад, кисню чи іонів) у матеріал. Також, як і при вібрації відбувається постійне змивання продуктів корозії, що збільшує доступність нових активних зон для хімічного руйнування.

Вібрація і турбулентність часто взаємопов'язані, оскільки вібрація конструкції може провокувати виникнення турбулентного режиму потоку, і навпаки. Їх комбінація призводить до ще більшого прискорення кавітаційно-корозійного руйнування через створення численних зон звуженого тиску, нерівномірного схлопування бульбашок та посиленого масообміну.

### **1.3.2 Хімічні фактори**

*Склад робочого середовища.* Наявність агресивних речовин у рідині значно підсилює кавітаційно-корозійне руйнування за рахунок комбінації механічних, хімічних і електрохімічних процесів. Агресивні речовини, такі як кислоти, луги, хлориди, сульфати та інші, взаємодіють із поверхнею матеріалу, викликаючи його хімічну корозію. Розриви пасивного захисного шару через кавітацію відкривають нові ділянки металу для контакту з агресивними речовинами. Метали та сплави, які мають природний оксидний шар (наприклад,

алюміній або нержавіюча сталь), зазвичай краще захищені від корозії. Проте ударні хвилі від колапсу бульбашок механічно руйнують цей шар, а агресивні речовини швидко проникають у відкриті зони, повторно активуючи процес корозії.

***pH середовища.*** Кислотність або лужність середовища (рівень pH) має значний вплив на кавітаційно-корозійне руйнування, оскільки вони визначають характер хімічної взаємодії між матеріалом та середовищем.

У кислому середовищі (низький pH) активність зазвичай підвищується через високу концентрацію іонів  $H^+$ . Вони прискорюють розчинення металів і можуть каталізувати утворення оксидів чи інших продуктів корозії. Кавітаційно-корозійне руйнування посилюється, оскільки кавітація пошкоджує захисний шар оксидів, а кислотність середовища швидко відновлює контакт активного металу з агресивними речовинами.

У лужних умовах (високий pH) корозія може уповільнитися завдяки формуванню стійких пасивних шарів (наприклад, оксидів або гідроксидів металів), які захищають матеріал. Проте, якщо пасивний шар пошкоджується під дією кавітації, в лужному середовищі теж можуть утворюватися корозійні продукти, особливо за наявності хлоридів чи інших агресивних іонів.

***Кисневий режим.*** Розчинений кисень у рідині має значний вплив на кавітаційно-корозійне руйнування, оскільки він сприяє хімічним і електрохімічним процесам, які посилюють руйнування матеріалу. Розчинений кисень є окислювачем у корозійних реакціях. Він сприяє утворенню іонів металу (наприклад,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) через реакцію з електронами, які утворюються під час окислення металу. Кількість та стабільність бульбашок кавітації змінюється залежно від концентрації розчиненого кисню. Чим більше кисню, тим активніше проходять хімічні реакції після вибуху бульбашки. Розчинений кисень сприяє утворенню локальних анодних та катодних зон на поверхні металу. У зонах анодів метал інтенсивно окислюється, а кисень бере участь у катодних реакціях, формуючи гідроксид-іони, що можуть підсилювати лужність в окремих ділянках. Це поглиблює локальні пошкодження металу.

**Температура.** З підвищенням температури зменшується в'язкість рідини та збільшується її парціальний тиск, що сприяє формуванню бульбашок. Висока температура зменшує кількість зон низького тиску, де відбувається кавітація, але пришвидшує процес колапсу бульбашок. При високих температурах бульбашки швидше заповнюються паром, що знижує енергію їх колапсу. У помірному температурному діапазоні (залежно від рідини) енергія кавітації максимальна. Температура прискорює хімічні та електрохімічні реакції, збільшуючи швидкість корозії. Розчинність кисню в рідині зменшується при високих температурах, але зростає активність корозійно-агресивних іонів, наприклад хлоридів.

**Комбінований вплив.** Високий тиск і температура: призводять до інтенсивного механічного впливу (через сильний колапс бульбашок) і прискореної корозії. Низький тиск і висока температура: можуть знижувати енергію кавітації, але посилювати корозійний вплив. Оптимальний баланс цих параметрів залежить від конкретного середовища, матеріалу й умов експлуатації. Таким чином, контроль тиску і температури є важливим фактором у зменшенні ризику кавітаційно – корозійного руйнування.

### 1.3.3 Матеріальні фактори

**Механічні властивості матеріалу.** Висока міцність сплаву знижує ймовірність утворення мікротріщин і деформацій під дією імпульсів тиску, що виникають при колапсі кавітаційних бульбашок. Слабші матеріали (з низькою міцністю) схильні до швидкого руйнування. Підвищена твердість поверхні зменшує ризик механічного пошкодження поверхні під час впливу кавітації. Однак надмірно тверді, але крихкі матеріали можуть бути вразливими до раптового руйнування. Пластичні матеріали здатні краще поглинати енергію

ударів кавітаційних бульбашок, але якщо вона надмірна, то може спричиняти більш інтенсивне зношування поверхні.

**Корозійна стійкість.** Хімічний склад сплаву та наявність у ньому домішок визначають його корозійну стійкість. Вторинні алюмінієві сплави можуть містити домішки, які знижують їхню стійкість до корозії, особливо в агресивних середовищах.

**Мікроструктура.** Однорідна мікроструктура сприяє рівномірному розподілу напружень, зменшуючи локалізацію дефектів. У вторинних Al сплавах часто спостерігається неоднорідність через наявність оксидів, шлаків або інших включень, що можуть стати осередками кавітаційно-корозійного руйнування.

**Захисні покриття.** Захисні покриття відіграють важливу роль у зменшенні кавітаційно-корозійного руйнування матеріалів, оскільки вони створюють бар'єр між агресивним середовищем і основним металом.

### 1.3.4 Експлуатаційні фактори

**Тривалість впливу.** При обмеженій тривалості навантаження основну роль відіграє кавітаційне навантаження. Оскільки, корозійні процеси ще не встигають значно вплинути на матеріал через недостатній час для роз'їдання оксидної плівки. При тривалому впливі кавітаційні процеси взаємодіють із корозією, посилюючи руйнування. Корозія, у свою чергу, ослаблює матеріал, роблячи його більш чутливим до кавітаційних навантажень.

**Періодичність навантажень.** При безперервному навантаженні, постійна дія кавітаційних ударів та корозійного середовища призводять до швидкого руйнування матеріалу. Руйнування захисних шарів відбувається швидше, ніж їх відновлення, що прискорює корозійний процес. При циклічному навантаженні, чергування періодів навантаження і відновлення дає можливість матеріалу частково регенерувати оксидні захисні шари. Проте тривала

циклічність із часом також призводить до накопичення пошкоджень і руйнування матеріалу.

**Режим експлуатації.** Наприклад, унаслідок частих запусків і зупинок обладнання створюються умови для утворення кавітації.

Механічна дія кавітації руйнує захисний шар, що прискорює корозію, тоді як корозійні процеси послаблюють матеріал, роблячи його вразливішим до механічного впливу. Таким чином, кавітаційно-корозійне руйнування – це комплексний процес, який вимагає врахування всіх зазначених факторів.

#### **1.4 Матеріали підвищеної стійкості до гідродинамічного навантаження**

Тому враховуючи разом всі ці критерії, наведені вище [1-33], частіше за все в якості матеріалу, який буде працювати, там де є кавітація обирають метали або сплави стійкі до гідродинамічного навантаження, а саме:

- нержавіюча сталь (сталь марок AISI 316, AISI 304 та їх аналоги. Ці сплави мають високу корозійну стійкість, механічну міцність і ерозійну стійкість);
- титанові сплави (вони дуже легкі, міцні та корозійно стійкі, зокрема у морській воді);
- кобальтові сплави (Стелліт) (характеризуються високою твердістю та стійкістю до абразивного та ерозійного зносу);
- нікелеві сплави (мають високу корозійну стійкість і добре протистоять ерозії, а також стійкі до високих температур і агресивних середовищ);
- мідно-нікелеві сплави (використовуються завдяки високій корозійній стійкості у морській воді);
- бронза та латунь (бронза (зокрема, алюмінієва бронза) має високу стійкість до ерозії та корозії в морській воді. А латунь застосовується для низько- та середньо-навантажених систем);

- хромо-молібденові сталі (відзначаються високою міцністю та стійкістю до динамічний навантажень).

Однак, не дивлячись на популярність вище зазначених металів та сплавів, використання алюмінієвих сплавів у середовищах, де є ризик кавітаційно – корозійного руйнування, набуває все більшої актуальності завдяки їхнім перевагам, таким як низька щільність, висока корозійна стійкість та хороші механічні властивості. Проте кавітаційна дія, яка виникає через утворення і колапс бульбашок у рідині, значно впливає на довговічність алюмінієвих сплавів, особливо у агресивних середовищах. Однак, стійкість Al до кавітаційної ерозії можна додатково покращити за допомогою передових способів обробки, таких як гартування, анодування, ультразвукова обробка розплаву, відпал, перекристалізація, лазерна ударна обробка, і так далі. Проте окрім багатьох переваг, які йому притаманні, у процесі виробництва первинного алюмінію є суттєві недоліки, через які все більше людей звертають увагу на рециклінг вже існуючого кольорового металу та отримання так званого «вторинного алюмінію».

До вторинного алюмінію – відноситься перероблений метал, який отримано з різних форм алюмінієвого брухту, також сюди входять нові відходи виробництва, стружки від обробки, застарілі алюмінієві вироби з вичерпаним терміном служби та шлаки. Виробництво вторинного алюмінію, потребує лише 5% енергії, від необхідної для отримання первинного металу. У той час, як для отримання 1 тони нового металу споживається 17000 кВт-год, рециклінг такої ж кількості вторинного алюмінію вимагає лише 810 кВт-год. Наступна перевага, напряму пов'язана з енерговитратами під час плавлення металу, а саме зменшення викидів CO<sub>2</sub>, якщо 1 кг переробленого алюмінію генерує лише 0,48 кг CO<sub>2</sub>, то така сама кількість нового металу генерує 6,6 кг CO<sub>2</sub>.

Вторинний алюміній та первинний алюміній мають різні характеристики, які впливають на їхню стійкість до кавітації та загальні властивості [34-39]. Розглянемо основні відмінності та їхній вплив у контексті гідравлічних і кавітаційних умов (табл.1.2).

Таблиця 1.2 Порівняльна таблиця первинного та вторинного алюмінію [35]

| Характеристики         | Первинний алюміній     | Вторинний алюміній                                     |
|------------------------|------------------------|--|
| Чистота                | Висока(мінімум 99,7%)  | Залежить від процесу переробки, може мати домішки      |
| Стійкість до кавітації | Помірна через м'якість | Часто вища завдяки домішкам, які підвищують твердість. |
| Твердість              | Нижча                  | Вища через вміст домішок, таких як залізо або кремній. |
| Крихкість              | Менш крихкий           | Може бути більш крихким, залежно від складу            |
| Ціна                   | Вища                   | Нижча, оскільки потребує менше енергетичних ресурсів.  |
| Корозійна стійкість    | Краща                  | Залежить від вмісту домішок(може бути гіршою)          |

Серед вторинних алюмінієвих сплавів найкращі кавітаційно – корозійні властивості мають сплави, які характеризуються високою корозійною стійкістю та підвищеною зносостійкістю. Зазвичай це сплави з оптимізованим хімічним складом, що забезпечує формування захисної оксидної плівки, а також містить спеціальні легувальні елементи. Основні сплави з хорошими кавітаційно – корозійними властивостями:

- алюмінієво – кремнієві сплави або силуміни (АК – серія) (містять кремній 6 – 12 %), що забезпечує високу зносостійкість і корозійну стійкість. Часто використовуються в суднобудуванні, де потрібна стійкість до агресивних середовищ);

- алюмінієво – магнієві сплави (АМ – серія) (магній підвищує корозійну стійкість у морській воді. Здебільшого це сплави АМг3 або АМг5);

- алюмінієво – мідні сплави (Д – серія) (забезпечують добрі механічні властивості, але мають нижчу стійкість до кавітаційної корозії порівняно з АМ чи АК – сплавами);

- сплави з додаванням цинку, марганцю та титану (забезпечують підвищену міцність і корозійну стійкість завдяки рівномірному розподілу оксидів на поверхні).

Тому для збереження навколишнього середовища, та скорочення енерговитрат, в цій магістерській роботі буде розглянутий метод підвищення фізико-механічних властивостей вторинних Al, а саме сплави на основі Al- Si.

### **1.5 Загальна характеристика вторинних силумінів**

Вторинні алюмінієві сплави на основі Al-Si (алюміній-кремній) є широко використовуваними матеріалами в різних галузях, таких як автомобільна, авіаційна та машинобудівна промисловість завдяки їх високій міцності, зносостійкості та корозійній стійкості [34-50].

Мікроструктура вторинних сплавів Al-Si є важливим фактором, що визначає їх рівень стійкості до руйнування.

Основні елементи структури:

- евтектичний кремній (забезпечує високу твердість, але у разі великих включень може стати джерелом тріщин);
- інтерметалічні сполуки (можуть виступати як концентратори напружень під дією кавітації);
- оксидна плівка (сприяє захисту від корозії, однак може пошкоджуватися при сильному кавітаційному впливі).

Вторинні алюмінієві сплави на основі Al-Si мають високу стійкість до кавітаційно – корозійного руйнування, в порівнянні з іншими вторинними Al, через такі ключові властивості:

- оптимальна мікроструктура (сплави Al-Si характеризуються наявністю евтектики Al-Si, де кремній утворює тверді частинки в матриці алюмінію. Ці частинки значно підвищують механічну міцність та зносостійкість матеріалу.

Вони слугують бар'єром для поширення мікротріщин, які можуть утворюватися під дією кавітації);

- висока корозійна стійкість (алюмінієва матриця природно утворює шар  $Al_2O_3$ , що ефективно захищає поверхню від корозії. Кремній (Si), що входить до складу сплаву, хімічно стабільний і не сприяє утворенню гальванічних пар, що також знижує ризик корозійного руйнування);

- демпфування енергії кавітаційних ударів (завдяки пластичності алюмінієвої матриці, енергія, спричинена ударами кавітаційних бульбашок, частково поглинається та розподіляється. Тверді включення кремнію запобігають локальній деформації і руйнуванню в місцях контакту з бульбашками);

- модифікація структури вторинного сплаву (вторинні сплави часто мають додаткові легувальні елементи, наприклад, магній (Mg), мідь (Cu) або залізо (Fe), які покращують механічні властивості. Ці добавки можуть зменшувати чутливість матеріалу до циклічного навантаження та кавітації);

- енергопоглинаюча здатність (вторинні сплави Al-Si мають високу міцність при відносно низькій щільності, що дозволяє їм добре протистояти ударним навантаженням без значного руйнування).

Таким чином, поєднання механічної міцності, хімічної стабільності, пластичності алюмінію і твердості частинок кремнію забезпечує найкращу стійкість до кавітаційно – корозійного руйнування серед вторинних сплавів.

## **1.6 Шляхи підвищення опору руйнуванню**

Підвищення опору руйнуванню вторинних алюмінієвих сплавів від кавітації є важливим завданням, особливо у випадках, коли ці сплави використовуються в умовах гідродинамічного навантаження. Кавітаційна ерозія може призводити до поступового руйнування матеріалів, що впливає на

довговічність деталей, таких як гребні гвинти, насосні лопаті, турбінні елементи тощо [40-47].

### 1.6.1 Вплив складу сплаву

*Додаткові елементи легування.* Додаткові елементи легування у вторинних Al відіграють важливу роль у підвищенні їхньої стійкості до кавітаційно-корозійного руйнування. Основні механізми дії легувальних елементів у таких сплавах полягають у зміцненні матриці, покращенні корозійної стійкості та підвищенні твердості. Деякі елементи сприяють утворенню фаз або дисперсних частинок, що зміцнюють структуру алюмінію [40, 49, 50].

Мідь утворює зміцнювальні фази (наприклад  $Al_2Cu$ ), що підвищують міцність сплаву, але може знижувати корозійну стійкість. Магній формує фазу  $Mg_2Si$  разом із кремнієм, що покращує механічні властивості та сприяє рівномірному розподілу напружень під дією кавітації. Титан сприяє утворенню дрібнозернистої структури, що підвищує міцність і в'язкість.

Для підвищення корозійної стійкості використовуються наступні легувальні елементи. Цинк покращує механічні властивості, однак потребує обмеження концентрації, щоб уникнути зниження корозійної стійкості. Кремній збільшує зносостійкість і допомагає формувати пасивувальний шар, який захищає сплав від корозії. Також кремній утворює сполуки з магнієм, що зміцнюють структуру. Манган підвищує стійкість до міжкристалітної корозії, стабілізуючи структуру сплаву.

Для підвищення твердості та зносостійкості використовують наступні елементи. Нікель сприяє підвищенню міцності за рахунок утворення твердих інтерметалічних сполук, що також знижують зношування при кавітаційному впливі. Залізо у невеликих кількостях утворює твердосплавні частинки, які знижують ерозійне зношування. Хром збільшує корозійну стійкість за рахунок

покращення утворення пасивного шару оксидів. Цирконій допомагає зберігати структуру сплаву стабільною при високих температурах та сприяє утворенню дисперсних частинок.

Легування вторинних алюмінієвих сплавів дозволяє оптимізувати їхню структуру і властивості для роботи в умовах кавітаційного впливу. Найбільш ефективними є комбінації елементів, які одночасно підвищують міцність, твердо-кристалічну структуру та корозійну стійкість, зберігаючи при цьому достатню пластичність.

**Очищення від домішок.** Вторинні алюмінієві сплави часто містять домішки, які можуть погіршувати властивості. Домішки, такі як оксиди, нітриди або залишки неметалевих частинок, часто є джерелами мікрodefektів у структурі матеріалу. Ці дефекти можуть сприяти локальній концентрації напружень, що робить сплав більш вразливим до кавітаційного руйнування. Домішки, особливо якщо вони створюють локальні гальванічні пари в матеріалі, можуть знижувати корозійну стійкість сплаву. Видалення небажаних домішок сприяє однорідності розподілу фаз та зменшує ймовірність утворення осередків зародження тріщин під дією кавітаційних навантажень. Чистіші сплави зазвичай демонструють кращі механічні характеристики, такі як міцність і пластичність, які критично впливають на здатність матеріалу протистояти руйнівним кавітаційним навантаженням.

### **1.6.2 Вплив термічної обробки**

Гартування – є одним із ключових методів термічної обробки, що може значно підвищити стійкість вторинного алюмінієвого сплаву до кавітаційно-корозійного руйнування. Це досягається завдяки змінам у мікроструктурі матеріалу та його механічних і хімічних властивостей. У процесі гартування зменшуються мікропори, тріщини та інші внутрішні дефекти, що є осередками

утворення кавітаційних бульбашок. Це зменшує ймовірність виникнення локальних концентрацій напружень, які можуть призводити до руйнування [40, 49, 50].

Гартування сприяє утворенню однорідної структури з дрібними зернами, що підвищує міцність і зносостійкість сплаву. Дрібнозерниста структура забезпечує більш рівномірний розподіл напружень під впливом кавітації. Загартований матеріал має вищу твердість, що зменшує механічне пошкодження поверхні внаслідок імпульсів, які виникають при схлопуванні кавітаційних бульбашок.

Штучне старіння – є завершальним етапом термічної обробки, який сприяє формуванню зміцнювальних фаз у мікроструктурі алюмінієвих сплавів. У вторинних алюмінієвих сплавах цей процес забезпечує оптимальні механічні й корозійні властивості, що підвищують їх стійкість до кавітаційно-корозійного руйнування. У процесі штучного старіння з перенасиченого твердого розчину виділяються дрібнодисперсні зміцнювальні фази, наприклад,  $Mg_2Si$ ,  $CuAl_2$  чи інші інтерметаліди, залежно від складу сплаву. Ці фази зміцнюють матеріал на мікрорівні та знижують пластичну деформацію поверхні під впливом кавітаційних ударів. Штучне старіння значно збільшує твердість матеріалу, що важливо для стійкості до механічного руйнування від ударів кавітаційних бульбашок. Також процес старіння частково розвантажує залишкові напруження, які могли утворитися після гартування. Це підвищує цілісність матеріалу і зменшує ймовірність утворення локальних дефектів, які можуть стати осередками корозії або руйнування.

Відпал – процес термічної обробки, що включає нагрівання матеріалу до певної температури, витримку та поступове охолодження. Він впливає на мікроструктуру та механічні властивості вторинного алюмінієвого сплаву, що, в свою чергу сприяє підвищенню стійкості до кавітаційно-корозійного руйнування. Вторинні алюмінієві сплави часто містять залишкові внутрішні напруження, які виникають під час лиття, механічної обробки чи попередніх етапів термічної обробки. Відпал знижує ці напруження, що зменшує схильність до утворення мікротріщин під впливом кавітаційних ударів, підвищує загальну

міцність і довговічність матеріалу, покращує пластичність матеріалу за рахунок рекристалізації, коли утворюються нові, дрібнозернисті кристали. Це забезпечує кращу здатність матеріалу поглинати енергію ударів кавітаційних бульбашок без руйнування.

### 1.6.3 Модифікування структури

Мікролегування – це процес введення невеликих (мікро) кількостей легувальних елементів у металевий сплав для покращення його фізико-механічних властивостей, таких як міцність, пластичність, корозійна стійкість, термостійкість та інші. Зазвичай концентрація таких елементів не перевищує 0,01...0,1 %. У вторинних алюмінієвих сплавах мікролегувальні елементи, як от титан, ванадій, бор, цирконій, скандій та інші, використовуються для зменшення зернистості, покращення міцності та зниження схильності до утворення дефектів. Мікролегування дозволяє: оптимізувати механічні властивості вторинного алюмінію, поліпшити ливарні характеристики та знизити негативний вплив домішок, що містяться у вторинному металі [40, 49, 50].

Ультразвукова обробка – це вплив високочастотними акустичними хвилями на рідкий метал або розплав для покращення його властивостей. Ультразвукова обробка широко застосовується у виробництві вторинного алюмінію, оскільки вона: дозволяє рафінувати метал від оксидів, неметалевих включень та газів; покращує структуру шляхом подрібнення зерен у процесі кристалізації; активує легувальні елементи та забезпечує їх рівномірний розподіл у сплаві.

Поєднання мікролегування та ультразвукової обробки дозволяє значно покращити якість і властивості вторинних алюмінієвих сплавів, роблячи їх конкурентоспроможними з первинними матеріалами.

### 1.6.4 Поверхнєве зміцнення

Нанесення захисних покриттів – це процес спрямований на поліпшення корозійної стійкості, зносостійкості та декоративних характеристик поверхні. До основних методів нанесення покриттів для алюмінієвих сплавів належать:

Анодування (анодне оксидування): утворює оксидний шар на поверхні алюмінію, що забезпечує високу корозійну стійкість і міцність.

Напилення металевих покриттів: наприклад, цинкування, хромування, нікелювання, які покращують антикорозійні та механічні властивості.

Полімерні покриття: захисні лаки, фарби або порошкові покриття забезпечують додатковий захист і декоративний вигляд.

Керамічні покриття: утворюються шляхом нанесення спеціальних матеріалів, які підвищують стійкість до високих температур і механічних пошкоджень.

Лазерна або плазмова обробка – ці методи базуються на впливі високоенергетичного випромінювання (лазерного або плазмового) для модифікації структури поверхні або нанесення покриттів.

Лазерна обробка використовується для гравірування, зварювання, різання, а також для термічної обробки; дозволяє локально модифікувати структуру матеріалу, підвищувати твердість, міцність і зносостійкість. За допомогою неї можна створювати тонкі оксидні плівки з високими декоративними та захисними властивостями.

Плазмова обробка включає плазмове напилення, що дозволяє наносити високотемпературні, керамічні або металеві покриття; використовується для очищення поверхні, активування або зміцнення. Забезпечує високу адгезію покриття до основного матеріалу.

Для вторинних алюмінієвих сплавів зазначені методи використовуються для: компенсації недостатньої корозійної стійкості; поліпшення зносостійкості

різного призначення деталей; забезпечення необхідного зовнішнього вигляду та довговічності.

### **1.6.5 Оптимізація процесу лиття**

Оптимізація процесу лиття відіграє важливу роль у підвищенні стійкості вторинного Al до кавітаційно-корозійного руйнування завдяки покращенню структури матеріалу та зменшенню дефектів. Під час процесу лиття можуть утворюватися газові пори, які стають джерелами напружень. Оптимізація умов лиття (наприклад, контроль температури, швидкості охолодження, дегазація металу) мінімізує пористість, знижуючи ризик ініціації кавітаційного руйнування. Неоднорідний розподіл легувальних елементів та домішок у сплаві може викликати локальну електрохімічну активність, що прискорює корозію. Оптимізація лиття також забезпечує рівномірний розподіл елементів у структурі матеріалу, знижуючи схильність до корозійного руйнування. Процес лиття впливає на розмір та форму зерен у матеріалі. Дрібнозерниста структура, яка досягається шляхом регулювання швидкості охолодження та використання модифікаторів (наприклад, титану або бору), також підвищує міцність матеріалу та його стійкість до кавітації.

### **1.6.6 Механічна обробка**

*Полірування.* Полірування значно підвищує стійкість вторинного алюмінієвого сплаву до кавітаційно-корозійного руйнування. Полірування видаляє мікроскопічні нерівності та дефекти на поверхні сплаву, які можуть слугувати ініціаторами утворення кавітаційних бульбашок. Ці нерівності є

точками концентрації напружень, що пришвидшує руйнування матеріалу під час дії кавітації. Гладка поверхня після полірування зменшує турбулентність рідини на поверхні сплаву, що знижує інтенсивність кавітаційних процесів. Шорсткі поверхні створюють умови для локального перепаду тиску, що сприяє утворенню та колапсу кавітаційних бульбашок. Також полірування допомагає усунути залишки оксидів, забруднень чи домішок, які можуть каталізувати корозійні процеси. Гладка поверхня також сприяє рівномірному утворенню захисної оксидної плівки, яка запобігає подальшій корозії, а рівномірний розподіл напружень під час дії кавітації, знижує ризик утворення тріщин.

Застосування цих методів у комплексі дозволяє значно підвищити кавітаційну корозійну стійкість вторинних алюмінієвих сплавів, зберігаючи при цьому їхню економічну привабливість.

## **1.7 Визначення мети і задач дослідження**

Метою роботи є пошук і розробка ефективного та низьковитратного методу забезпечення необхідної мікроструктури та високих показників кавітаційно – корозійної стійкості вторинних алюмінієвих сплавів для виготовлення деталей відповідального призначення.

## РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Обґрунтування методу дослідження

Дослідження впливу технології виготовлення вторинних алюмінієвих сплавів на опір кавітаційно-корозійному руйнуванню вивчали за допомогою спеціально сконструйованої та виготовленої установки ударно-струменевого типу.

Алюмінієві зразки, у формі прямокутного паралелепіпеда, з розмірами: 24 мм × 10 мм × 10 мм поміщали до машини для випробувань, де з високою швидкістю обертання на обидва зразки рівномірно спрямували ударно-струменеве навантаження морською водою. При впливі такого потоку, крихкі складові сплаву, що мали несприятливу форму руйнувались та викрихчувались, а наявність солі високої концентрації (імітація морської води, 3,5 % NaCl), прискорювала процес деградації поверхні алюмінієвого зразка. Це явище пояснюється наявністю іонів-хлору, які руйнують пасивну плівку на поверхні алюмінію. Окрім того, хлорид-іони Cl<sup>-</sup>, ще виступають як активатори корозії і формують нестислові ядра для кавітаційних бульбашок. Це створює сприятливі умови для утворення кавітації і в поєднанні з ударно-струменевим навантаженням сприяє швидшій ерозії металевої поверхні зразка.

Оцінювання відносної кавітаційно-корозійної стійкості проводили за втратою маси зразків за один і той же час випробувань:

$$E = \Delta m_0 / \Delta m_e, \quad (2.1)$$

де  $\Delta m_0$  – втрата маси зразка зі сплаву, що отримано за заводською технологією, г;

$\Delta m_e$  – втрата маси зразка зі сплаву, що виготовлено за експериментальною технологією, г.

Час випробувань для кожної партії зразків складав 0,25 год.

Зразки для випробувань виготовляли з металу, що було термооброблено за режимом T5 (гартування + штучне старіння). Цей режим термооброблення забезпечує найбільш оптимальне поєднання міцності та пластичності.

## 2.2 Обладнання та технологія отримання дослідного сплаву

Вторинний алюмінієвий сплав АК8МЗ було отримано з 100 % брухту та відходів виробництва в полуменевій відбивній печі типу ЕНВ 5000 ємністю 5,5 т за двома технологічними варіантами (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Технологічні варіанти отримання вторинного алюмінієвого сплаву АК8МЗ[40]

| № варіанту                       | Короткий опис технологічного варіанту   |
|----------------------------------|---|
| I (заводська технологія)         | Плавлення під покривним флюсом (33 % KCl, 67 % NaCl) з наступним обробленням рафінувальним флюсом (15 % KCl, 45 % NaCl, 40 % AlF <sub>3</sub> )                                 |
| II (експериментальна технологія) | Заводська технологія (варіант I) + додаткове оброблення розплаву модифікатором (40 % Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , 20 % SiC, 5 % Ti, решта – S) (пат. України № 57584А) [3] |

Як відомо, алюміній дуже сильно окислюється, тому при плавленні алюмінієвих сплавів, однією з головних причин, що впливають на їх якість є високий вміст газу, а саме водню. Високий вміст водню в алюмінієвих сплавах

має значний вплив на очищення розплаву алюмінієвого сплаву. Під час затвердіння металу виділення водню та усадка, викликана фазовим переходом «рідина-твердий стан», призводять до таких дефектів, як пористість і пухкість, які, у свою чергу, впливають на міцність на розрив, границю текучості, відносне видовження та корозійну стійкість матеріалу. Окрім того, при плавленні вторинного алюмінієвого сплаву досить поширеною домішкою є залізо. Для ливарних сплавів на основі Al-Si або ж силумінів, вона є небажаною. Вона є природною домішкою, яка виникає під час процесу виробництва первинного алюмінію і кількість її вмісту залежить напряду від якості вхідної руди і процесу виробництва. Також, Fe може потрапляти до алюмінієвого розплаву через низьку чистоту легувальних елементів або додавання брухту з вищим фоновим рівнем заліза, ніж у первинного сплаву. Сам негативний вплив домішки Fe полягає у зниженні пластичності Al сплавів на основі Al-Si. Це обумовлено двома основними причинами:

- зі збільшенням вмісту заліза зростає також щільність і розмір інтерметалідів (в тому числі шкідливої E – фази) і тому, оскільки вони беруть безпосередню участь у механізмі руйнування, то чим більше інтерметалідів, тим нижча пластичність;

- при збільшенні рівня заліза також збільшується пористість і цей різновид ливарного дефекту також має значний вплив на пластичність.

Тому, для підвищення фізико-механічних властивостей вторинних сплавів на основі Al-Si розроблений технологічний варіант, який поліпшить очищення розплаву та знизить кількість небажаних домішок.

Ця технологія відноситься до адсорбційного виду очищення. Тобто очищення розплаву алюмінієвого сплаву від газів та включень, відбувається безпосередньо взаємодією адсорбенту та розплаву під час фізико-хімічної реакції.

Перший етап, через який проходив дослідний сплав, це плавлення під покривним флюсом. Оскільки поверхня розплаву алюмінієвого сплаву утворює високощільну плівку окислення і запобігає виділенню водню в розплаві, то

додавання суміші солей 33% KCl та 67% NaCl матиме серію фізичних і хімічних реакцій з плівкою окислення на поверхні розплаву алюмінієвого сплаву, використовуючи різницю в змочуваності між фазами, що контактують. Флюс сприяє швидкому адсорбуванню та подрібнюванню плівки окислення і усуненню плівки окислення, яка перешкоджає виходу  $H_2$ . Водень може легко проходити через потік у атмосферу, тим самим досягається очищення розплаву.

Другий етап, додавання фторидної солі  $AlF_3$  в розчин солей NaCl та KCl, що сприяє зменшенню міжфазного натягу між флюсом та розплавом алюмінію.

Третій етап, додаткове оброблення розплаву модифікатором 40 %  $Na_2CO_3$ , 20 % SiC, 5% Ti, решта – S [51]. Наявність карбонату натрію  $Na_2CO_3$  сприяє подрібненню пухирців пароподібної сірки та зменшує швидкість окислення сірки, що створює вищий рівень рафінування та модифікування, через збільшення поверхні розподілу між розплавом та газовою фазою.

20 % SiC вистачає для утворення дрібнодисперсних центрів кристалізації, що призводить до зменшення до 3 разів довжини дендритів за осями першого порядку та збільшення їх кількості на одиниці площі в 1,8...2,0 рази. Також відбувається зв'язування домішок у частки компактної форми та подрібнення основних структурних складових сплаву. Така форма змін сприяє підвищенню механічних властивостей та упорядкуванню структури алюмінієвого сплаву.

Електролітичний Ti створює досить велику кількість додаткових центрів кристалізації, а саме тугоплавкі і дрібнодисперсні інтерметаліди  $TiAl_3$ .

Наявність S має комплексний вплив на алюмінієвий сплав. Після додавання сірки у розплав алюмінію, виникає велика кількість газоподібного продукту, котрий у вигляді пухирців рафінує розплав. Водночас відбувається зміна морфології фаз, котрі містять залізо, з пластинчастої на більш компактнішу – глобулярну або схожу за виглядом на китайські знаки.

Комплексний вплив всіх модифікувальних елементів забезпечує зменшення негативного впливу домішок, що, в свою чергу, покращує якість вторинного алюмінієвого сплаву і його фізико-механічних властивостей.

### 2.3 Визначення хімічного складу

Визначення хімічного складу вторинного алюмінієвого сплаву АК8МЗ проводили за допомогою оптико-емісійної спектрометрії (ОЕС). Оскільки цей метод визначає концентрації елементів на рівні 0,01 %, має високу швидкість проведення аналізу та одночасно визначає до 30 елементів.

Проба для спектрального аналізу відібралась з литого виробу. Для уникнення можливих забруднень або окислень у крайових зонах, зразок вирізали у центральній частині. За допомогою металевої щітки, наждачного паперу середньої зернистості (P120-P240), видаляли шари оксидів, шлак та поверхневі забруднення, які могли вплинути на точність результату. Після цього поверхня шліфувалася для отримання чистого металевого блиску, для чого використовували наждачний папір із дрібнішою зернистістю (P400-P600). Щоб уникнути перегріву матеріалу, який може змінити структуру поверхні, використовували охолодження водою. Зразок візуально перевіряли на рівність поверхні та відсутність подряпин, тріщин, залишкових оксидів та рівномірність блиску. Правильна підготовка проби гарантує мінімізацію похибок і підвищення точності результатів спектрального аналізу, тому перед безпосереднім встановленням зразку в прилад його було повторно перевірено на відсутність візуальних слідів забруднень або окислень.

Перед початком аналізу, проводили калібрування приладу, для цього використовували стандартні зразки зі схожим складом (еталонні проби), щоб налаштувати прилад. Встановлювали параметри для визначення ліній Al, Si, Cu, Fe, Mn, Zn, Mg, оскільки вони є основними компонентами сплаву. Також, налаштовували стабільність розряду для забезпечення точності аналізу. Зразок був встановлений у спектрометр таким чином, щоб забезпечувався максимальний контакт із електродами.

Після завершення оптико-емісійної спектрометрії (ОЕС), аналізували інтенсивність кожної спектральної лінії і співставляли з відповідним елементом.

За допомогою калібрувальних графіків визначали кількісний вміст елементів у алюмінієвому сплаві. Концентрацію елементів розраховували автоматично за інтенсивністю їх спектральних ліній.

З отриманих даних визначили вміст кожного елемента у складі (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 Порівняння масової частки елементів на відповідність

| Елемент | Масова частка (%) | Вимоги до АК8МЗ (%) | Відповідність |
|---------|-------------------|---------------------|---------------|
| Al      | 86,74             | 83,5 ... 89,0       | Так           |
| Si      | 8,20              | 7,5 ... 9,5         | Так           |
| Cu      | 2,65              | 2,0 ... 3,5         | Так           |
| Fe      | 0,98              | $\leq 1,2$          | Так           |
| Zn      | 0,87              | $\leq 1,0$          | Так           |
| Mg      | 0,33              | $\leq 0,5$          | Так           |
| Mn      | 0,23              | $\leq 0,3$          | Так           |

Як можна побачити з отриманих результатів, масова частка хімічних елементів, як основних так і легувальних, відповідала, вимогам до вторинного алюмінієвого сплаву АК8МЗ.

## 2.4 Визначення механічних властивостей

Випробування вторинного сплаву АК8МЗ на механічні властивості проводили на машині для розтягування. Цей метод, дозволяє визначити механічні властивості, такі як: границя міцності на розтяг, границя текучості та відносне видовження. Для проведення випробувань використовували розривну машину УММ-20.

Циліндричний зразок виготовлений відповідно до стандартів ГОСТ 1497- 84. Довжина робочої частини пропорційна до діаметру (співвідношення 5:1). Робоча зона була перевірена на однорідність та наявність

видимих дефектів, тріщин чи пористості. Після перевірки точності роботи обладнання та системи вимірювання навантаження і деформації, зразок був встановлений у затискачі машини, забезпечивши рівномірне навантаження без перекосів. Зразки розтягували з постійною швидкістю, відповідно до стандарту. Швидкість навантаження 5 мм/хв. У процесі випробувань записували такі дані: сила навантаження та подовження зразка. Обладнання генерувало графік «напруження – деформація», за яким вже визначали: границю міцності на розтяг – максимальне напруження, яке витримує зразок перед руйнуванням; відносне видовження – відношення залишкової довжини зразка до початкової.

Випробування завершили при руйнуванні зразка та фіксували максимальне навантаження, при якому воно відбулося.

Окрім перевірки на машині для розтягування, також визначали твердість отриманих сплавів, за допомогою методу Роквелла. Твердість за Роквеллом вимірювали за шкалою HRB, яка використовує сталеву кульку діаметром 1,588 мм (1/16 дюйма), як індентора та основне навантаження в 100 кгс. На зразок з плоскою, чистою та гладкою поверхнею без масляних або інших забруднень прикладали індентор з початковим навантаженням 10 кгс, для усунення нерівності та щоб забезпечити стабільний контакт. Потім застосовувалось основне навантаження в 100 кгс. Індентор проникав в матеріал на певну глибину. Після зняття основного навантаження залишалося лише початкове в 10 кгс і фіксували остаточну глибину проникнення індентора. Твердість була розрахована автоматично за шкалою Роквелла, яка пов'язує глибину проникнення з числовим значенням.

## **2.5 Металографічний та фрактографічний аналізи**

Металографічний аналіз включав в себе кілька етапів, що дозволило вивчити мікроструктуру сплаву, виявити дефекти та оцінити його властивості.

Зразки було виготовлено з литого виробу. Потім послідовно за допомогою шліфувального паперу з крупністю зерна (від P240 до P1200) зменшували зернистість оброблюваної поверхні. Для уникнення перегріву проводилося мокре шліфування. Після чого зразок полірувався, з використанням полірувальної пасти з алмазним порошком (1 ... 3 мкм), для досягнення дзеркальної поверхні і підвищення якості аналізу. Для травлення алюмінієвого сплаву використовували розчин з 3 мл HCl, який був нанесений на зразок на 30 секунд.

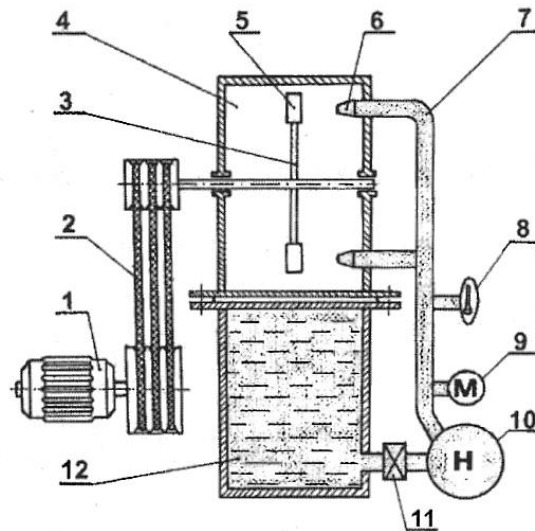
Після чого за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-8 проводили мікроструктурний аналіз. Було виявлено основні структурні компоненти: дендритна структура алюмінієвої матриці, кремнієва евтектика голкоподібної форми. Структура 2 зразків сплаву - однорідна, без наявних дефектів.

Фрактографічний аналіз проводився для дослідження поверхні зламу зразків, які зазнали руйнування. Цей метод дозволяє вивчити механізм руйнування, його причини, а також вплив мікроструктури на процес руйнування. Зразок було відібрано з місця проведення механічних випробувань. Поверхню зламу, після руйнування зразка не чіпали. За допомогою легкого струменя стисненого повітря були видалені забруднення у вигляді пилу. Для огляду поверхні зламу використовували оптичний мікроскоп МІМ-8. За результатами досліджень визначали характер руйнування.

## **2.6 Визначення кавітаційно – корозійної стійкості**

Дослідження процесів кавітаційно – корозійного руйнування проводили на установці, сконструйованій та виготовленій в Національному університеті «Запорізька політехніка». За типом вона відноситься до ударно-струменевих і дозволяє управляти основними параметрами процесу випробувань (довжина, діаметр і форма струменя; швидкість зустрічі зразка зі струменем;

гідродинамічні параметри струменя). Вона призначена для випробувань зразків із різних матеріалів у багаточисельних рідких корозійних середовищах у широкому діапазоні температур (рис 2.1).



1 – електродвигун; 2 – ремінна передача; 3 – диск; 4 – робоча камера;  
5 – вузол кріплення зразків; 6 – сопло; 7 – трубопровід; 8 – термометр;  
9 – манометр; 10 – насос; 11 – кран; 12 – бак з робочою рідиною.

Рисунок 2.1 – Схема установки для випробувань на кавітаційно-корозійне зношування [40]

Технічні характеристики установки: номінальна робоча напруга – 380 В, потужність асинхронного електродвигуна – 4,5 кВт, витрата робочої рідини –  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , габаритні розміри – 1550 мм × 1240 мм × 550 мм, маса установки – 80 кг.

Зразки, які було виготовлено за двома технологічними варіантами з вторинного алюмінієвого сплаву АК8МЗ та з однаковою термічною обробкою, а саме за режимом Т5, були попередньо зважені та записані їх габаритні розміри. До початку випробувань маса зразка виготовленого за заводською технологією

складала 6,264 г, а маса експериментального – 6,48 г. Габаритні розміри обох зразків складала – 24 мм × 10 мм × 10 мм.

Також обидва зразки були візуально оглянуті на наявність видимих дефектів, таких як тріщини, пори або забруднення перед дослідженням на кавітаційно-корозійну стійкість, які б могли вплинути на якість проведення дослідження. Після впевненості, що дефекти відсутні, обидва зразки були поміщені у робочу камеру та закріплені у вузлі кріплення зразків, де відстань між зразком та соплом складала 3 мм. Після закриття робочої камери, в ній створювався необхідний тиск робочого середовища, а саме – 0,08 МПа.

Увімкнений асинхронний електродвигун через ремінну передачу починав обертати зразки на лінійній швидкості в 80 м/с. Потім відкривали кран та вмикали насос, який через трубопровід подавав водний розчин 3,5 % NaCl (імітація морської води). На кінцях трубопроводу було встановлено сопло, яке через звуження потоку, сприяло утворенню кавітації.

Після проходження 0,25 год випробувань електрообладнання було вимкнено, а зразки витягнуті з робочої камери для оцінювання їх кавітаційно-корозійної стійкості. Проте, перед зважуванням необхідно було висушити обидва зразки. Тому, вони були залишені на 1 тиждень для повного випаровування води, після чого проводили контрольні зважування.

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ СИЛУМИНІВ З ПІДВИЩЕНИМ ОПОРОМ КАВІТАЦІЙНО-КОРОЗІЙНОМУ РУЙНУВАННЮ

### 3.1 Технологічні заходи підвищення механічних і службових властивостей.

Для підвищення властивостей дослідного сплаву був обраний режим термооброблення T5 (гартування та штучне старіння), оскільки таке поєднання дає можливість отримати найбільш оптимальне поєднання міцності та пластичності.

Після того, як метал розлили під низьким тиском його знову було нагріто до температури в 520 °C в 2 послідовні етапи. Перший етап був для початкового розігріву. Температура була виставлена на 250 °C, а час на 30 хвилин, це дало змогу зняти залишкові напруження після процесу лиття. Після чого, відбувався вже другий етап з основним нагріванням в 520 °C. Воно відбувалося досить повільно, для того щоб не створювати термічні напруження.

Такий рівень температури має наступне обґрунтування:

- якщо температура нагрівання буде нижчою за 500 °C, то процес розчинення фаз буде відбуватися занадто повільно;

- а якщо ж температура буде надмірною, а саме вище 540 °C, то це може призвести до локального плавлення евтектичної структури сплаву на основі Al-Si та утворювати дефекти.

Тому використаний температурний режим забезпечив перекристалізацію, розчин у матриці сплаву інтерметалічних сполук (таких як  $Al_2Cu$ ) та запобігання локального переплавлення сплаву. Після того як метал нагріли до необхідної температури, йому дали час щоб всі домішки могли рівномірно розчинитися у матриці та сформувати однорідність її структури. Для цього час витримки було обрано протягом 3 годин. Коли цей час вийшов, метал було поміщено у водне охолоджувальне середовище з температурою в 20 °C. Подібна швидкість

охолодження є досить високою, щоб утворити пересичений твердий розчин, проте без дефектів (тріщини або деформація).

Після гартування, дослідний сплав проходив через остаточне термічне оброблення, а саме штучне старіння. Це потрібно для рівномірного розподілу зміцнювальних фаз у структурі сплаву та стабілізації властивостей.

Нагрівання відбувалося поступово, для рівномірного прогрівання всієї деталі до температури 180 °С. Вищий рівень температури не бажаний, оскільки може спричинити дуже швидке осадження фаз, а також знизити пластичність майбутнього сплаву, що призведе до зменшення кавітаційно-корозійної стійкості майбутньої деталі. Час витримки складав 6 годин, тому що за цей проміжок часу із пересиченого твердого розчину виділяються дрібнодисперсні частинки зміцнювальних фаз. При цьому цей час не настільки великий, щоб перетримати сплав та надмірно збільшити ріст частинок зміцнювальних фаз. Після того, як час витримки пройшов, метал охолоджувався при звичайній температурі, щоб не створювати додаткові термічні напруження і не зруйнувати вже сформовану структуру сплаву.

### **3.2 Розробка складу рафінувально-модифікувального комплексу**

Створений рафінувально-модифікувального комплекс [51], був розроблений з метою покращення механічних і технологічних властивостей алюмінієвого сплаву, шляхом очищення розплаву від наявних домішок та модифікування структури. Кожен компонент, що входив до складу рафінувально-модифікувального комплексу, було обрано відповідно до його впливу, котрий було досліджено у попередніх випробуваннях.

Як вже зазначалося раніше [40, 43, 44], високий негативний вплив на структуру сплаву має включення Fe. Інтерметаліди  $AlFeSi$ , можуть виступати осередками кавітаційного руйнування. Тому, для того щоб зменшити ризик

руйнування, до модифікувального комплексу у кількості 35 % було додано сірку (S). Наявність S матиме комплексний вплив на алюмінієвий сплав. Після додавання сірки у розплав алюмінію, виникає велика кількість газоподібного продукту, котрий у вигляді пухирців рафінує розплав. Водночас відбувається зміна морфології фаз, котрі містять залізо, з пластинчастої на більш компактнішу – глобулярну або схожу за виглядом на китайські знаки. Проте сірка має досить високу швидкість окислення, а пухирці пароподібної сірки, що утворювалися, були досить великими за розмірами, тому у склад модифікатора був доданий карбонат натрію.

Наявність карбонату натрію  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  у кількості в 40 % було достатнім, щоб сприяти подрібненню пухирців пароподібної сірки та зменшувати швидкість окислення сірки, що створювало вищий рівень рафінування та модифікування, через збільшений поверхневий розподіл між розплавом та газовою фазою.

Електролітичний Ti створював досить велику кількість додаткових центрів кристалізації, а саме тугоплавкі і дрібнодисперсні інтерметаліди  $\text{TiAl}_3$ . Ультрадисперсних 20% SiC вистачало для утворення дрібнодисперсних центрів кристалізації, що призводило до зменшення до 3 разів довжини дендритів за осями першого порядку та збільшення їх кількості на одиниці площі в 1,8 ... 2,0 рази. Також відбувалося зв'язування домішок у частки компактної форми та подрібнення основних структурних складових сплаву. Така форма змін сприяє підвищенню механічних властивостей та упорядкуванню структури алюмінієвого сплаву.

Комплексний вплив всіх модифікувальних елементів забезпечив зменшення негативного впливу домішок, що, в свою чергу, покращило якість вторинного алюмінієвого сплаву і його фізико-механічні властивості[51].

### 3.3 Технологія обробки розплаву рафінувально-модифікувальним комплексом.

Використання рафінувально-модифікувального комплексу дозволило досягти більш високої якості металу, що допомогло знайти застосування матеріалу у більш широкому діапазоні.

Для рафінування алюмінієвого розплаву та очищення від неметалевих включень, а також зменшення вмісту розчинених газів та інших небажаних домішок використовували рафінування флюсом, що являв собою солей (15 % KCl, 45 % NaCl, 40 % AlF<sub>3</sub>).

Коли алюмінієвий сплав досяг температури в 720 °C, оскільки ця температура гарантує повне розплавлення алюмінієвого сплаву на основі Al-Si, на поверхню розплаву було рівномірно розсипано флюс, після чого його ретельно перемішали. При такій температурі флюс розплавився утворивши активний шлаковий шар. Наявність хлоридів (15 % KCl, 45 % NaCl), як основного компоненту, сприяла зменшенню поверхневого натягу розплаву, а наявність фторидів (40 % AlF<sub>3</sub>) знизила міжфазний натяг між флюсом та розплавом. Після того, як рафінувальний флюс прореагував з розплавом та утворив шлак, його було видалено.

Додавання модифікатора у відповідний момент є дуже важливим, оскільки від цього залежить хімічний склад майбутнього сплаву. Тому для того, щоб модифікувальні елементи не випаровувалися, його додають не раніше ніж за 30 хвилин до закінчення операції лиття.

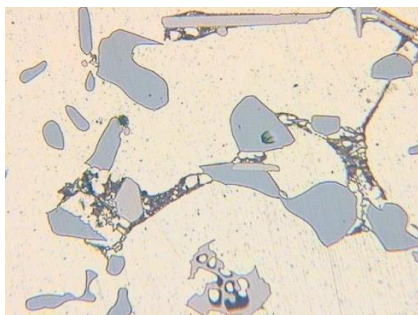
Додавався розроблений модифікувальний комплекс безпосередньо у розплав, у таблетованій формі. Внесення до розплаву проводили за допомогою пристосування, що має назву «дзвоник». При цьому, температура також трималася на позначці в 720 °C, оскільки це необхідно для активації доданих елементів. Недостатньо висока температура призводила до того, що додані елементи або не повністю розчинялися у розплаві або нерівномірно розподілялися.

Наприклад доданий в модифікатор Na є найбільш ефективним в діапазоні температур 680 ... 720 °С. Якщо ж температура перейде за позначку в 730 °С, то він почне випаровуватися, що вже буде значно знижувати ефективність модифікування.

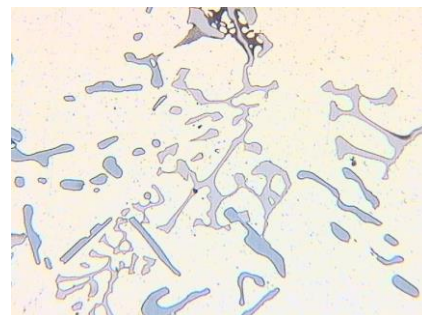
При застосуванні Ti для досягнення дрібнозернистої структури сплаву потрібна температура в 700 ... 750 °С, якщо ж вона буде нижчою, то він може не повністю розчинитися та прореагувати. Якщо ж навпаки температура надмірно висока, то якась частина модифікаторів може випаруватися або ж взаємодіяти з атмосферними газами.

Тому, це є оптимальна температура, яка забезпечила достатній рівень ефективності модифікаторів, для формування у сплаві дрібнозернистої структури. Окрім температури, яка звісно грала дуже важливу роль у поведінці модифікаторів, не менш важливу роль відігравав і час, на який вони були додані у розплав, оскільки тривалість цього етапу мала вирішальне значення для досягнення бажаних властивостей сплаву.

Встановлено, що в результаті використання модифікатора [51] у металі, що отриманий за експериментальною технологією, відбулося впорядкування структури, зменшення шпаристості, подрібнення всіх структурних складових сплаву; змінення морфології та характеру розповсюдження інтерметалідних фаз і евтектичного кремнію (рис. 3.1).



а



б

а – заводська технологія отримання; б – експериментальна технологія

Рисунок 3.1 – Мікроструктура вторинного сплаву АК8М3 (× 500)

Експериментальна технологія забезпечила підвищення рівня показників механічних властивостей металу (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 Вплив технології отримання сплаву АК8МЗ на механічні властивості

| Технологічний<br>варіант отримання | Механічні властивості |              |                   |
|------------------------------------|-----------------------|--------------|-------------------|
|                                    | $\sigma_B$ ,<br>МПа   | $\delta$ , % | Твердість,<br>HRB |
| I                                  | 117                   | 1,0          | 48                |
| II                                 | 170                   | 1,4          | 59                |

### 3.4 Кавітаційно - корозійна стійкість дослідних сплавів

Кавітаційно-корозійну стійкість досліджували на зразках, що були виготовлені за двома технологічними варіантами (див. табл. 2.1), з вторинного алюмінієвого сплаву АК8МЗ. Попередньо зразки було оброблено термічною обробкою за режимом T5, зважено та виміряно.

Також обидва зразки були візуально оглянуті на наявність видимих дефектів, таких як тріщини, пори або забруднення перед дослідженням на кавітаційно-корозійну стійкість, які б могли вплинути на якість проведення дослідження. Після впевненості, що дефекти відсутні, обидва зразки було поміщено у робочу камеру та закріплено у вузлі кріплення зразків, де відстань між зразком та соплом складала 3 мм. Після закриття робочої камери, там створювали необхідний тиск робочого середовища, а саме – 0,08 МПа.

Як показали попередні дослідження [43,44], найбільш негативний вплив на властивості вторинних алюмінієвих сплавів мають інтерметалідні фази пластинчастої морфології, що відповідають стехіометрії  $Al_3Fe$ ,  $Al_5SiFe$  і  $Al_7Cu_2Fe$ . В роботах [43, 44] було показано, що в алюмінієвих сплавах зі

зменшенням середнього периметру фаз і протяжності їх меж, забезпечується зниження концентрації внутрішніх напруг навколо включень, при цьому протікання корозійних процесів сповільнювалося. Відомо, що корозія значно впливає на процес кавітації. Так, наприклад, в морській воді та солевих розчинах руйнування сталі за рахунок кавітації на 50 % вище ніж у дистильованій воді [52].

Дослідження показали, що сплав, котрий отримано експериментальною технологією, мав значно вищу кавітаційно-корозійну стійкість (табл.3.2).

Таблиця 3.2 – Вплив технології отримання сплаву АК8М3 на фізико-механічні властивості та кавітаційно-корозійну стійкість

| Технологічний варіант отримання | Густина $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Шпаристість за ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93), бал | Середня втрата маси зразків, г | Кавітаційно-корозійна стійкість E, разів |
|---------------------------------|------------------------------------|---|--------------------------------|--|
| I                               | 2,61                               | 3...2   | 0,3435                         | 1,00                                     |
| II                              | 2,70                               | 1...0   | 0,0939                         | 3,66                                     |

Це можна пояснити наступним. Силуміни відносяться до сплавів з великою хімічною активністю, які легко вступають до взаємодії з киснем і утворюють на поверхні тонкі оксидні плівки  $Al_2O_3$ . Плівки утворюються практично миттєво, а їх товщина визначається умовами взаємодії та може досягати від 0,01...0,02 мкм до 5...50 мкм [32, 34, 36, 39]. Корозійна стійкість таких сплавів залежить від стійкості плівки в середовищі, де працює деталь, а також від їх цілісності та бездефектності. З цієї точки зору первинні сплави мають переваги завдяки меншій кількості дефектних місць.

У даному середовищі (водний розчин 3,5 % NaCl) активаторами корозії виступають хлорид-іони ( $Cl^-$ ). При кавітації корозійне руйнування металу значно інтенсифікується завдяки ударному впливу турбулентного потоку.

Інерційні сили турбулентного потоку руйнують захисну оксидну плівку, що викликає появу анодних ділянок вільного від плівки металу. При цьому корозія прискорюється внаслідок присутності навкруги пошкоджених ділянок катодних областей, до яких також відносяться евтектичний кремній і інтерметалідні фази, що містять залізо [43, 44].

Вплив турбулентного потоку характеризується вилученням матеріалу з гострих кромek ділянок, які піддаються корозії. Кавітація супроводжується деформацією поверхні, а також утворенням піттингів. При такому впливі крихкі складові сплаву, що мають несприятливу форму, руйнуються та викрихчуються. На їхньому місці в матриці сплаву утворюються надрізи, які в подальшому розвиваються в тріщини та при впливі динамічних навантажень, що передаються пухирцями, приводять до локального видалення окремих об'ємів сплаву. У зв'язку з цим, чим більш компактна форма присутніх у сплаві фаз і чим вища рівномірність їх розповсюдження, а також нижча шпаристість і вища густина, тим більш високий опір кавітаційному руйнуванню має сплав. Тому експериментальна технологія виготовлення вторинного сплаву, що забезпечує низький параметр форми включень і їх високу дисперсність, а також зниження концентрації напруг навколо їх, подовжує строк експлуатації матеріалу (рис.3.2).



а)



б)

а – метал, що отримано за заводською технологією; б – метал, що отримано за експериментальною технологією

Рисунок 3.2 – Характер кавітаційно-корозійного руйнування,  $\times 2,5$ .

Велика кількість пухирців за рахунок циклічного впливу на матеріали викликає виникнення в ньому тріщин втоми, які в подальшому прискорюють процес кавітаційного руйнування, особливо сплавів з менш впорядкованою структурою.

Тож, по закінченню проведення дослідження та розрахунку стійкості до руйнування, можна дійти висновку, що запропонована експериментальна технологія у 3,66 разів поліпшила кавітаційно-корозійну стійкість алюмінієвого сплаву АК8МЗ, у порівнянні з заводською.

## ВИСНОВКИ

1. В результаті застосування модифікатора [3] відбулося упорядкування структури, зниження пористості, подрібнення всіх структурних складових сплаву; також мала місце зміна морфології, топографії і значне зменшення параметра форми  $\lambda$  (відношення максимальної довжини включень до їх ширини) інтерметалідних фаз і евтектичного кремнію, що сприяло підвищенню опору кавітаційному руйнуванню. Це пов'язано з тим, що крихкі складові, які мають несприятливу форму, руйнуються і викрихчуються утворюють у матриці сплаву надрізи, що надалі розвиваються в тріщини і при впливі динамічних навантажень, переданих пухирцями, приводять до локального видалення деяких об'ємів сплаву. У зв'язку з цим, чим компактніше форма фаз, які присутні у сплаві, і чим вище рівномірність їхнього розподілу, тим вищий опір кавітаційному руйнуванню.

2. Велика кількість пухирців циклічно впливає на матеріал і викликає виникнення в ньому тріщин втоми, що надалі прискорюють процес кавітаційного руйнування. В роботі [8] було показано, що вторинні силуміни після визначеної експериментальної обробки суттєво підвищували втомну довговічність при випробуваннях на малоциклову втому зі ступенем деформації від 0,15 до 0,3 %. Таким чином, з підвищенням опору матеріалу втомному руйнуванню, забезпечується підвищення його здатності протистояти кавітаційному руйнуванню. Встановлено [9], що крихкі і погано зафіксовані в тілі матриці сплаву включення, внаслідок підвищеної концентрації напруг навколо них, є активними осередками руйнування. В той же час, малий параметр форми включень та їхня висока дисперсність забезпечує зниження концентрації напруг навколо них, що значно подовжує термін експлуатації матеріалу.

3. Корозійні процеси вторинних алюмінієвих сплавів проходять за законами електрохімічної кінетики. У зв'язку з тим, що силуміни є гетерогенними сплавами, то на їх поверхні присутні як анодні, так і катодні

ділянки. Це призводить до утворення корозійних гальванопар. Швидкість руйнування таких ділянок значною мірою обумовлена їх площею та характером розповсюдження. Тому забезпечення можливості керування процесом структуроутворення (зміною параметра форми фаз; морфології та характеру розподілення і розповсюдження інтерметалідних фаз), а також зниження газової шпаристості дозволяє суттєво впливати на показники кавітаційно-корозійної стійкості. Зміна технології приговування вторинних силумінів дозволяє підвищити опір кавітаційно-корозійному руйнуванню у середовищі, що імітує морську воду, деталей до 3,66 разів.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Манаса Хегде, Джозеф Мохан. Кавітаційна ерозія та корозійна стійкість гідрофобних золь-гелевих покриттів на алюмінієвому сплаві, 2023. – 2 с.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164823001497>
2. Джон Тейлор. Матеріалознавство / Залізовмісні інтерметалічні фази в ливарних сплавах на основі Al-Si, 2012. – С. 19 – 33.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812812000053>
3. Л.Ван, С. Чжан. Журнал дослідження матеріалів і технології / Вплив залишкової напруги та фазових складових на корозійно-кавітаційну ерозійну поведінку нержавіючої сталі 304 шляхом виготовлення ізо-матеріалів лазерного плавлення поверхні, 2023. – 1 с.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542302152X>
4. Г.Сатіясілан, П.Шрінатх. Підвищення міцності та структури сплавів Al-Si для біомедичних застосувань шляхом додавання гранул Sr і Zr до вторинних алюмінієвих сплавів AlSi7Mg, 2024. – 1 с.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667022424001014>
5. Мартін Миколайчик, Єва Тіллова. Процедура дослідження транспорту / Вплив підвищення вмісту Fe на опір втомі вторинного алюмінієвого сплаву AlSi7Mg0.6, 2023. – С. 493-499.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146523004702>
6. Каніта Тайяба, У.Юйшен. Журнал сплавів і металургійних систем / Механічне сплавлення бронзи з алюмінієм і нікелем: вплив на корозійну стійкість і твердість, 2024. – 2 с.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949917824000853>
7. Чен'ян Ван, Жуйфань Чжан. Ультразвукова сонохімія / Чисельне дослідження лазерно-індукованої кавітаційної бульбашки з урахуванням хімічних реакцій, 2024. – С. 1 – 2.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417724002554>

8. Дінджі Суо, Джі Цзінь. Ультразвукова сонохімія / Чисельне дослідження характеристик акустичної кавітації одиночної парогазової бульбашки в м'яких тканинах під дією двочастотного ультразвуку, 2024. – С. 1 – 2.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417724003092>

9. М.А.Аюде, В.В.Ранаде. Хімічний інженерний журнал / Вплив гідродинамічної кавітації на передові процеси окислення та масообмін: концептуальна модель, 2024. – С. 1 – 2.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666821124000218>

10. Георгіос Мусмуліс, Георгій Агідіс. Європейський журнал механіки / Експериментальний аналіз кавітації у відцентровому насосі з використанням акустичної емісії, вимірювань вібрації та візуалізації потоку, 2019. – С. 300 – 302.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0997754617305757>

11. Чен-Чен Пан, Да-Хай Ся. Наука про корозію / Кавітаційна ерозія алюмінієвого сплаву AA7050 у 3,5 мас.% розчині NaCl, 2024. – 1 с.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X24001963>

12. Віктор Кшемен, Джеймс Бротон. Вплив температури води та індукованого акустичного тиску на поведінку кавітаційної ерозії алюмінієвих сплавів, 2023. – С. 1 – 5.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X2300782X>

13. С.Брускі, Р.Бертоліні. Виготовлення листів / Оброблюваність перероблених алюмінієвих сплавів, 2024. – С. 1669 – 1675.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846324002864>

14. Ленка Гурталова, Єва Тіллова, Марія Чалупова / Аналіз структури вторинного (переробленого) AlSi9Cu3. Литий сплав з термічною обробкою та без неї, 2013. – С. 197 – 200.

<https://entra.put.poznan.pl/index.php/et/article/view/16/16>

15. Лоріс Калгаро, Антоніо Маркоміні. / Тенденції та характеристики використання технології кавітації для очищення води та стічних вод з акцентом на гідродинамічну та ультразвукову кавітацію за останні два десятиліття:

наукометричний аналіз, 2023.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722069029>

16. Мортеза Абедіні, Стефані Ханке. Вплив обробки поверхні шліфуванням на стійкість до кавітаційної ерозії 316L та NiAl-бронзи, 2024 – С. 1 – 3.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164824001972>

17. С. Гарб, Ф.Грюн. Структурна цілісність / Вплив підвищеної температури на втомну міцність литих алюмінієвих сплавів AlSi8Cu3, 2017 – С. 497 – 504.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321617304754>

18. Матіас Оберрайтер, Майкл Стошка. Структурна цілісність / Вплив локальної мікроструктури на втому та пов'язані з нею механізми руйнування виливків з AlSi, 2023 – С. 240 – 245.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321622008289>

19. Саша Гербе, Кевін Блейхер. Структурна цілісність / Мікроструктурний вплив на механізми виникнення та поширення втомної тріщини в заевтектичних литих сплавах Al-Si, 2019 – С. 511 – 516.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321620302031>

20. Масатака Іджірі, Тосіхіко Йосімура. Міжнародний журнал легких матеріалів і виробництва / Вплив водоструменевої обробки за допомогою ультразвукових хвиль на чисті поверхні сплавів Al та Al-Cu, 2018 – С. 246 – 251.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840418300507>

21. Емма Шьоландер, Салем Сейфеддін. Журнал технології обробки матеріалів / Термічна обробка ливарних сплавів Al-Si-Cu-Mg, 2010 – С. 1249 – 1259.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013610000993>

22. Камерон Дінніс, Джон Тейлор. Матеріалознавство та інженерія / Залізна пористість у ливарних сплавах Al-Si-(Cu), 2006 – С. 286 – 296.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509306003091>

23. Леонхард Хойслер, Вольфганг Шнайдер. Журнал легких металів / Вплив легуючих елементів на результати термічного аналізу литих сплавів Al-Si, 2002 – С. 17 – 26.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1471531702000093>

24. Г.Уоллес. Основи металургії алюмінію / Виробництво вторинного алюмінію, 2011 – С. 70 – 82.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781845696542500043>

25. Баовей Ван, Бо Чжан. Хімічний інженерний журнал / Гідродинамічна кавітація як перспективний шлях очищення стічних вод, 2021.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894721002837>

26. А. Гусман – Барраса, Н.І.Тото – Арельяно. Оптика та лазерна техніка / Оптична кавітація в неабсорбуючих розчинах за допомогою безперервного лазера через оптичне волокно, 2022.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003039922200487X>

27. Юн-Су Лі, Сун-Кен Хюн. Характеристика матеріалів / Вплив термомеханічної обробки та додавання стронцію на оброблюваність і механічні властивості ливарного сплаву Al-Si-Cu, 2021.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1044580321003788>

28. Дуй Цинь, Бінгу Чжан. Ультразвукова сонохімія / Вплив взаємодії між бульбашками на фізико-хімічні ефекти акустичної кавітації, 2024 – С. 1 – 2.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417724000567>

29. Г.Лю, С.Скудіно. Механіка матеріалів / Вплив сполучення первинних і вторинних пустот на пластичне руйнування термооброблених алюмінієвих сплавів, 2011. – С. 556 – 566.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167663611001098>

30. Д.А.Ладос Основи металургії алюмінію / Конструкція стійкості до втомного розтріскування алюмінієвих сплавів, 2011. – С. 504 – 537.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781845696542500171>

31. Мен'ян Хоу, Венбінь Ху. Електрохімічна дія / Підвищення стійкості до кавітаційної корозії алюмінієвого сплаву 6061 шляхом анодування, 2024.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468624011289>

32. Хосні Езубер, Ф.Ель-Шавеш. Матеріали та дизайн / Дослідження корозійної поведінки алюмінієвих сплавів у морській воді, 2008 – С. 801 – 805.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306907000258>

33. Параг Р. Гогейт, Абхідет М. Кабаді. Журнал біохімічної інженерії / Огляд застосування кавітації в біохімічній інженерії/біотехнології, 2009 – С. 60 – 72.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369703X08003392>

34. Лех Дітріх, Йоанна Радзевська. Матеріали та дизайн / Розвиток втомних пошкоджень у литому сплаві Al–Si–Cu, 2011 – С. 322 – 329.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306910003389>

35. Матильда Лаурент-Брок, Лола Лілестен. Стратегія відновлення та переробки алюмінію, 2023.

[https://hal.science/hal-04270047/file/RecyclageAl\\_textHAL.pdf](https://hal.science/hal-04270047/file/RecyclageAl_textHAL.pdf)

36. Бруно Барлас. Дослідження втомної поведінки та пошкодження ливарних алюмінієвих сплавів, 2004.

<https://hal.science/tel-00162056v1>

37. Себастьян Дезеко, Матьє Рамбодон. Зростання втомної тріщини в литому автомобільному алюмінієвому сплаві в умовах великої текучості, 2023.

<https://hal.science/hal-03962971v1>

38. Зайдао Лі, Наталі Лімодін. Міжнародний журнал матеріалів та металів / Вплив вмісту Fe та Mn на мікроструктуру та поведінку на розтяг сплаву AlSi7Cu3: термічний аналіз та випробування на розтяг, 2022.

<https://hal.science/hal-03662522v1>

39. Зайдао Лі, Наталі Лімодін. Журнал характеристика матеріалів / Вплив тривалості термічної обробки розчину на еволюцію тривимірної мікроструктури в сплаві AlSi7Cu3: кількісне дослідження рентгенівської томографії, 2021.

<https://hal.science/hal-03130336v1>

40. Мітяєв О.А. Науково-технологічні основи формування структури, фізико-механічних і службових властивостей вторинних силумінів:

дис. ... доктора техн.наук: 05.02.01 / Мітяєв Олександр Анатолійович. – Запоріжжя, 2008. – 285 с.

41. Повзло В.М. Механізми корозійного руйнування вторинних силумінів / В.М.Повзло, І.П.Волчок // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2-х т. / Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». - №7. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 2008. – Т.1. – С. 59-62.

42. Волчок І.П., Мітяєв О.А., Рязанов С.Г. Малоциклова втома вторинних алюмінієвих сплавів // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під.Заг.Ред.В.В.Панасюка – Львів: ФМІ ім.Г.В.Карпенка НАН України, 2004. – С. 629-632.

43. Вплив інтерметалідних включень на міцнісні властивості алюмінієвих сплавів / І. П. Волчок, В. П. Силованюк, О. А. Мітяєв, Н. А. Івантишин // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2007. - № 2. - С. 17-21. - Бібліогр.: 4 назв. - укр.

44. Вплив інтерметалідних включень на витривалість алюмінієвих сплавів / В. П. Силованюк, О. А. Мітяєв, А. Є. Островська, Н. А. Івантишин, І. П. Волчок // Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 2009. - 45, № 2. - С. 137-144. - Бібліогр.: 8 назв. - укр.

45. Підвищення якості вторинних силумінів шляхом використання рафінувально-модифікувальної, термічної та лазерної обробок / І. П. Волчок, О. Л. Скуйбіда, О. В. Лютова, Н. В. Широкобокова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - 2014. - № 5. - С. 101-108. - Бібліогр.: 15 назв. - укр.

46. Підвищення опору руйнуванню вторинних силумінів / І. П. Волчок, О. А. Мітяєв, О. В. Лютова, О. О. Круліковська, Т. В. Ванярха // Металознавство та оброб. металів. - 2020. - 26, № 3. - С. 46-53. - Бібліогр.: 9 назв. - укр.

47. Підвищення якості вторинних силумінів в умовах сучасного виробництва / І. П. Волчок, О. А. Мітяєв, Р. О. Фролов, О. О. Круліковська,

Т. В. Ванярха // Вісн. ХНАДУ : зб. наук. пр. - 2020. - Вип. 91. - С. 105-110. -  
Бібліогр.: 8 назв. - укр.

48. Науково-технологічні основи формування структури, фізико-механічних і службових властивостей вторинних силумінів : автореф. дис. ...д-ра техн. наук : 05.02.01 / О. А. Мітяєв; Запоріз. нац. техн. ун-т. - Запоріжжя, 2008. – С. 32. - укр.

49. Закономірності формування дрібнозернистої структури алюмінієвих сплавів, що містять дисперсні частки тугоплавких сполук: Автореф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.16.01 / К.В. Михаленков ; НАН України. Ін-т металофізики ім. Г.В.Курдюмова. — К., 2005. — 42 с. — укр.

50. Мікролегування ливарних алюмінієвих сплавів комплексами мікродомішок вуглецю та титану: Автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.16.01 / К.Ю. Гзовський ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". — К., 2001. — 21 с. — укр.

51. Пат. 57584А Україна, МКВ С22С 1/06. Модифікатор для алюмінієвих сплавів / Волчок І.П., Мітяєв О.А.; заявник і патентоутримувач Запорізький нац. техн. ун-т. - №2002108343; заявл. 22.10.2002; опубл. 16.06.2003, Бюл. №6.

52. Корозія: Справочник / [Пер. С англ. Под. ред. Л.Л. Шрайера]. – М.: Металлургия, 1981. – 632 с.