ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти *Магістра*
Бакалавра (Магістра)

Структура та властивості силуміну для виготовлення дисків автомобільних коліс

Назва теми

Галузь знань *13 Механічна інженерія*
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність *132 Матеріалознавство*
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма *Відновлення та технічний сервіс автомобілів*
Назва

Шифр *КРМ МТВА 25 24327. 000 ПЗ*

Виконав студент(ка) *2-го* курсу
група *МТВАм 24-1*
Шифр

Віталій КАПЛУН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Підпис

Керівник *к.т.н, ст. викл.*
Науковий ступінь, вчене звання

Анатолій ВИЧАВКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Підпис

Нормоконтролер *доцент кафедри ТАМ*
Посада

Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Підпис

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри *ТАМ*
Назва

Олександр ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Підпис

Дата *11 12 2025*

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

акультет *інженерії, транспорту та архітектури*
афедра *трибології, автомобілів та матеріалознавства*
світньо-кваліфікаційний рівень *магістр*
апрям підготовки (спеціальність) *132 «Матеріалозновство»*
світньо-професійна програма *«Відновлення та технічний сервіс автомобілів»*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *ТАМ*
проф., д.т.н. Диха О.В.
13 жовтня 2025 року

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

Каплуну Віталію
Прізвище, ім'я, по батькові

Тема роботи *«Структура та властивості силуміну для виготовлення дисків автомобільних коліс».*

ерівник роботи *Вичавка Анатолій Анатолійович, к.т.н., ст. викладач*
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

атверджено наказом університету від *25 серпня* 2025 р. № *65 (Д28)*
Строк подання студентом роботи на кафедру *1 грудня 2025 року*
Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузла тертя; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи підприємства.*

Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1 Аналіз вимог до матеріалів автомобільних дисків та властивостей силумінів (сплавів Al–Si).

2 Дослідження впливу хімічного складу та технології лиття на структуру силуміну.

3 Визначення фізико-механічних властивостей (міцності, твердості, в'язкості) силуміну, отриманого за обраною технологією.

4 Обґрунтування рекомендацій щодо вибору оптимального складу та технології для забезпечення високої якості колісних дисків.

5 Розрахунок економічної доцільності використання обраного матеріалу або технології.

Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання_----

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітк
1	*Літературний огляд*	*30.09.2025*	
2	*Технологічний розділ*	*25.10. 2025*	
3	*Дослідницький розділ*	*15.11. 2025*	
4	*Оформлення розрахунково–пояснювальної записки*	*22.11. 2025*	
5	*Оформлення презентації кваліфікаційної роботи*	*1.12. 2025*	
6	*Нормоконтроль кваліфікаційної роботи*	*5.12. 2025*	
7	*Підписання розділів. Затвердження дати захисту*	*5.12. 2025*	

Студент _____ *Віталій Каплун*
Підпис ІМ'Я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник роботи _____ *Анатолій Вичавка*
Підпис ІМ'Я, ПРІЗВИЩЕ

РЕФЕРАТ

Випускну кваліфікаційну роботу виконано студентом групи МТВАм 24-1 Каплуном Віталієм на тему: «Структура та властивості силуміну для виготовлення дисків автомобільних коліс».

Силуміни — це група алюмінієвих сплавів, легованих кремнієм, які завдяки поєднанню низької густини, високої корозійної стійкості та задовільних механічних властивостей широко застосовуються у сучасному автомобілебудуванні. Однією з найбільш відповідальних деталей, що виготовляються з силуміну, є автомобільні диски. Від їхньої міцності, ударостійкості та експлуатаційної довговічності залежить безпека руху та надійність роботи транспортного засобу.

Поведінка силуміну значною мірою визначається його структурою, яка формується під час кристалізації та може істотно змінюватися в залежності від технології лиття, типу модифікування, швидкості охолодження, вмісту кремнію та додаткових легувальних елементів (Mg, Cu, Mn, Ti). Кремнієва фаза, її розподіл, розмір та форма кристалів безпосередньо впливають на міцність і пластичність литих деталей. Правильна модифікація (наприклад, натрієм чи стронцієм) дозволяє подрібнити первинні кристали кремнію, що значно покращує механічні характеристики виробів.

Актуальність теми полягає у необхідності підвищення надійності та довговічності автомобільних колісних дисків за рахунок оптимізації структури силуміну та використання сучасних методів його обробки. Незважаючи на широке застосування цих сплавів, проблема забезпечення стабільних властивостей литих дисків залишається актуальною через високу відповідальність деталі та її експлуатаційні навантаження.

Метою роботи є дослідження структури та властивостей силуміну, придатного для виготовлення литих автомобільних дисків, а також визначення оптимальних умов їх виробництва.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

1. Провести огляд хімічного складу силумінів, що застосовуються для литва автомобільних дисків.

2. Дослідити формування структури силуміну під час твердніння та вплив легувальних елементів.

3. Проаналізувати механічні властивості сплаву залежно від технології обробки.

4. Розглянути сучасні технології лиття дисків та їх вплив на якість структури.

5. Визначити оптимальні структурні параметри, що забезпечують високу міцність і довговічність виробу.

6. Наукова новизна полягає у комплексному аналізі взаємозв'язку між мікроструктурою силуміну та експлуатаційними характеристиками колісних дисків із застосуванням сучасних технологічних рішень. Практична цінність роботи визначається можливістю використання результатів для підвищення надійності литих дисків, оптимізації процесів лиття та покращення якості готової продукції.

Кваліфікаційна робота містить 122 сторінок машинописного тексту, ілюстрована 87 рисунками, 19 таблицями та містить 14 найменувань джерел. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків.

Ключові слова: СИЛУМІН, АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, АВТОМОБІЛЬНІ ДИСКИ, СТРУКТУРА, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ЛИТТЯ, МОДИФІКУВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....6

РОЗДІЛ 1 ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ КОЛЕС З СПЛАВІВ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ.....11

1.1. Перспективні сплави для виготовлення автомобільних коліс методом лиття під низьким тиском.....11

1.2. Вплив чистоти розплаву на властивості алюмінієвих сплавів та якість литих коліс.....17

1.3. Сучасні технології модифікації доевтектичних та евтектичних алюмінієвих сплавів.....29

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕРІАЛИ.....40

2.1. Стадії виготовлення коліс 40

2.2. Методи оцінки забрудненості сплаву за неметалевими включеннями та водню.....43

2.3. Методи оцінки структури та властивостей алюмінієвих сплавів.....47

2.4. Методи оцінки якості литих коліс.....49

2.5. Моделювання процесу лиття автомобільних коліс зі сплаву АК12.....52

РОЗДІЛ 3 ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ ЗАЛІЗА І МАРГАНЦЮ В СПЛАВІ АК12 НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ А7 НА ВЛАСТИВОСТІ АВТОМОБІЛЬНИХ КОЛЕС.....56

3.1. Аналіз впливу технології рафінування на якість виливків.....56

3.2. Аналіз впливу вмісту заліза на рівень механічних властивостей виливків коліс.....79

3.3. Дослідження зміни властивостей колеса по окремих його зонах.....81

					ДРМТВА 25.24327.000. ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Каплун			Структура та властивості силуміну для виготовлення дисків автомобільних коліс	Літ.	Арк. 4 / Акрушів 122
Перевір.		Вичавка					
Реценз.						ХНУ група МТВАм 24-1	
Н. Контр.		Бабак					
Затверд.		Диха					

ВСТУП

Сплави на основі алюмінію займають особливе місце серед конструкційних матеріалів. З одного боку, це пов'язано з можливістю досягнення унікального поєднання основних експлуатаційних властивостей (міцності, пластичності, корозійної стійкості тощо) з низькою щільністю (зокрема, порівняно зі сталлю та мідними сплавами). З іншого боку, алюміній відноситься до найбільш поширених в природі елементів, займаючи за вмістом в земній корі третє місце (і перше серед металів, перевершуючи за цим показником мідь в 800 разів). Вже зараз він займає міцне перше місце за обсягом виробництва і споживання серед усіх кольорових металів. Все це говорить про хороші перспективи збільшення його виробництва і споживання. Однак існує актуальна проблема, пов'язана з необхідністю значного зниження собівартості продукції з алюмінієвих сплавів (у вигляді фасонних відливки, в у злитків, деформованих напівфабрикатів) при збереженні (а бажано при підвищенні) основних експлуатаційних і технологічних характеристик. Маркові алюмінієві сплави, орієнтовані на застосування у відповідних виробах, як правило, мають суворі обмеження щодо домішок, перш за все, це стосується заліза. Такі суворі обмеження вимагають застосування алюмінію підвищеної чистоти, що, в багатьох випадках, призводить до надзвичайно високої собівартості сплаву і, отже, вартості готових виробів.

На підставі аналізу літературних даних щодо стану технологій виробництва автомобільних коліс з легких сплавів сформульована така мета роботи – вдосконалення наскрізної технології приготування та лиття під низьким тиском силуміну на основі первинного алюмінію А7, що забезпечує стабільність фізико - механічних та експлуатаційних властивостей

автомобільних коліс.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

– запропонувати та експериментально обґрунтувати методи оперативного контролю забрудненості ливарних сплавів типу силумінів воднем та оксидними плівками;

– виконати експериментальні дослідження з пошуку співвідношення леза та елемента-компенсатора (марганцю) в силуміні на основі алюмінію А7, що забезпечує стабільність фізико-механічних та експлуатаційних властивостей автомобільних коліс;

– дослідити з використанням програмного комплексу ProCast процес формування коліс при литті під низьким тиском за часом затвердіння і розподілом пористості по об'єму колеса при різному вмісті в силуміні заліза;

– експериментально досліджувати вплив різних модифікаторів і технологій їх використання на структуру і властивості силуміну на основі алюмінію А7;

– провести дослідно-промислове випробування наскрізної технології приготування та лиття під низьким тиском коліс із силуміну на основі первинного алюмінію А7.

Для вирішення поставлених завдань були застосовані методи: індексу щільності, технологічної проби ; спектрального аналізу; оптичної, електронної растрової і та просвічувальної мікроскопії; контролю рівня механічних властивостей; ресурсних випробувань автомобільних коліс, що забезпечило достовірність отриманих результатів, для обробки яких використовувалися стандартні комп'ютерні програми.

Наукову значимість мають такі результати:

1. Встановлено взаємозв'язки прогнозування індексу щільності від вмісту водню та оксидних включень у розплаві для алюмінієвих ливарних сплавів. Визначено граничне значення індексу щільності, що забезпечує отримання якісних виливків коліс методом лиття під низьким тиском з алюмінієвих сплавів. При індексі щільності 8 % ураженість оксидними плівками на макрошліфі становить від 0,5 до 1,5 %, вміст водню в сплаві – 0,2–0,25 $см^3$ /100г.

2. Досліджено взаємозв'язок між структурою, механічними властивостями, вмістом заліза і марганцю в силуміні, приготованому на основі первинного алюмінію А7, що дозволяє прогнозувати високі механічні властивості автомобільних коліс. За допомогою комп'ютерного моделювання в програмному комплексі ProCast досліджено та встановлено раціональні технологічні параметри лиття автомобільних коліс із силуміну на основі алюмінію А7.

3. Встановлено вплив ультрадрібнодисперсних модифікаторів (таблетованого модифікатора на основі карбіду кремнію та комплексного гранульованого флюсу на основі солей калію) на структуру та механічні властивості силюмінів, призначених для лиття конкурентоспроможних автомобільних коліс під низьким тиском. Експериментально обґрунтовано механізм модифікації силуміну таблетованим модифікатором основі ультрадрібнодисперсного карбіду кремнію, що дозволило підвищити відносне подовження сплаву на 50 %, тимчасовий опір розриву – на 20 % за рахунок управління морфологією β -фази.

4. Показано, що комплексний гранульований флюс на основі солей калію має рафінуючу (індекс щільності знижується в 1,3–1,5 рази) і модифікуючу дію (розмір макрозерна зменшується до 0,7 мм), що до, що дозволяє поєднувати ці операції обробки розплаву.

Практичну значимість мають наступні результати:

1. Реалізовано методи оперативного контролю водню та оксидних плівок у виробничих умовах – індекс щільності та метод технологічної проби для доевтектичних та евтектичних силумінів, що дозволило підвищити показник відтворюваності процесу приготування сплаву у 2 рази.

2. Розроблено сплав типу силумін на основі первинного алюмінію А7 для виготовлення автомобільних коліс, що відповідають вимогам ГОСТ Р50511-93, методом лиття під низьким тиском. Встановлено, що рівень механічних властивостей автомобільних коліс, виготовлених методом лиття під низьким тиском із запропонованого сплаву, на 25 % за межею плинності умовно- му, на 15 % за тимчасовим опором на розрив і на 40 % за відносним подовженням вище рівня властивостей коліс, отриманих за серійною технологією, що дає можливість автомобільним колесам конкурувати на світовому ринку.

3. Запропоновано технологічне рішення , що забезпечує управління морфологією β-фази в силумінах ультрадрібнодисперсним модифікатором на основі карбіду кремнію, що дозволяє знизити собівартість коліс за рахунок використання більш дешевих шихтових матеріалів (алюміній марки А 7 замість А8, А85).

4. Розроблено технологію, що поєднує рафінування і модифікацію силумінів на основі первинного алюмінію А7 гранульованим флюсом на основі солей калію, що скорочує час позапічної обробки розплаву.

5. Запропонований сплав пройшов промислове освоєння при литті коліс під низьким тиском на ТОВ «КіК», що дозволило знизити витрати на їх виробництво за рахунок використання первинного алюмінію з підвищеним вмістом заліза. Економічний ефект при цьому склав 85,54 дол./1 т придатного лиття. Рівень механічних властивостей автомобільних коліс , виготовлених з силуміна, отриманого на основі алюмінію А7, відповідає DIN EN 1706, ГОСТ Р 50511-93.

На захист виносяться наступні положення:

1. Метод оперативного контролю індексу щільності для оцінки забрудненості ливарних алюмінієвих сплавів воднем і метод технологічної проби для оцінки забрудненості ливарних алюмінієвих сплавів воднем і оксидними плівками.

2. Експериментальні закономірності, що підтверджують ефективність легування марганцем силуміну на основі алюмінію А7.

3. Технологічні рішення, що полягають у виборі раціональної технології рафінування та модифікації силуміну з підвищеним вмістом заліза.

4. Нові технології приготування силуміну з підвищеним вмістом заліза і лиття під низьким тиском автомобільних коліс.

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, бібліографічного списку, що містить 102 джерела, та 4 додатків. Основний матеріал викладено на 150 сторінках, включаючи 19 таблиць і 95 рисунків.

Автор роботи висловлює подяку за велику допомогу в галузі металознавства канд. техн. наук Меркуловій Галині Олександрівні, доценту Інституту кольорових металів і матеріалознавства ФГАОУ ВПО «Сибірський федеральний університет».

1. ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ КОЛЕС З СПЛАВІВ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ

В автомобільній промисловості різних країн все ширше застосовують легкі сплави для виробництва автомобільних коліс методом лиття під низьким тиском. Використання алюмінієвих сплавів (силумінів) замість сталі обумовлено їх високими фізико-механічними та ливарними властивостями [1].

Область використання цих сплавів може бути розширена за рахунок розробок, що знижують екологічну небезпеку технологічних процесів і , що підвищують рівень їх механічних і технологічних властивостей [2].

Завдяки дослідженням вітчизняних і зарубіжних вчених А.В. Курдюмова, М.В.Пікунова, В.М.Чурсіна, В.Г.Саньяна, В.І.Нікітіна, Рі Хосена та багатьох інших створено наукові основи плавлення та кристалізації кольорових металів і сплавів, які використовуються в роботі для обґрунтування тематики дослідження та вирішення поставлених завдань.

1.1. Перспективні сплави для виготовлення автомобільних коліс методом лиття під низьким тиском

На даний час автомобільні колеса виготовляють з наступних сплавів:

– сталь, з якої виготовляють недорогі стокові колеса;

– алюмінієві сплави , що використовуються для виготовлення легкосплавних коліс;

– магнієві сплави , що застосовуються, перш за все, для коліс гоночних

автомобілів;

– інші сплави, які також використовуються для виготовлення легких і міцних коліс [3].

Перевагами сталевих коліс є їх:

– низька вартість;

–пластичність, що дозволяє сталевим колесам при ударі деформуватися, причому певною мірою зберігається геометрія колеса, і є ймовірність, що шина не розгерметизується;

– ймовірність, що шина не розгерметизується;

– можливість відновлення сталевих коліс після пошкоджень, стандартне замикання ободів коліс може бути усунуто прокаткою.

До недоліків сталевих коліс можна віднести низьку корозійну стійкість сталі, тому такі колеса доводиться захищати спеціальними покриттями. У порівнянні з колесами, отриманими з інших металів, сталеві колеса мають досить велику вагу, зменшення якої тягне за собою зниження міцності всього колеса [4].

Колеса з магнію дуже легкі і досить міцні. Через складність в обробці і реакції на високі температури, процес виробництва коліс з магнію вимагає великого професіоналізму і застосування першокласного обладнання. Тому магнієві сплави використовуються тільки при виробництві коліс для категорій «racing» і «supercar» [3, 5].

В автомобільній промисловості використовують сплави алюмінію з кремнієм, магнієм, марганцем і рядом інших елементів. Їх перевагою є – мала вага і міцність, вони мають вищі , ніж сталь, теплопровідність, електропровідність і корозійну стійкість [6].

У роботі [5] зазначається, що з алюмінієвих сплавів найбільшого

поширення набули наступні:

– AlSi7: Сплав з алюмінію і кремнію, використовується при виробництві коліс OEM і Aftermarket. Цей сплав добре переносить термічну обробку і на 20% краще витримує механічні навантаження, що робить його найбільш популярним і використовуваним при виробництві.

– AlSi10/11: Сплав з алюмінію і кремнію, найбільш широко використовується при виробництві коліс Aftermarket. Майже не використовується при виробництві OEM, оскільки в порівнянні з AlSi7 гірше піддається термічній обробці і менш стійкий до навантажень і механічного опору в цілому.

В даний час розвиток автомобільної промисловості спрямований на поступове зменшення частки сталі за рахунок освоєння високоміцних конструкційних алюмінієвих і магнієвих сплавів, а також пінопластів і композиційних матеріалів (у тому числі багатошарових) на основі алюмінію і магнію в зарубіжних автомобілях [7, 8].

Однак, слід враховувати ряд об'єктивних факторів, що гальмують широке застосування алюмінієвих сплавів:

– масовий експорт алюмінію та його сплавів за кордон;

– нестача конструкторських розробок щодо заміни чорних сплавів на алюмінієві сплави;

– технологічні проблеми в досягненні необхідних властивостей (міцності, жароміцності, зварюваності тощо) деталей з алюмінієвих сплавів.

Особливо слід виділити проблему отримання алюмінієвих сплавів з ло - мов, так званих вторинних сплавів.

Виділимо деякі проблеми в технологіях алюмінієвого лиття на прикладі ВАТ «АвтоВАЗ» (таблиця 1.1).

Кінцевий результат такого незадовільного у стану технологій

конструювання виливків, плавки, лиття та контролю якості – це отримання надмірно важких виливків; великі втрати металу від браку; невисокий вихід придатного; отримання дорогих виливків і невисокі механічні властивості сплавів у деталях.

Для виходу з такого складного становища потрібне інноваційне комплексне вирішення проблеми.

Аналіз ситуації в галузі алюмінієвого лиття на ТОВ «КіК» (та інших автозаводах України) дозволяє сформулювати деякі перспективні напрямки робіт:

1. Виконання комплексу досліджень, спрямованих на підвищення якості чушкових вторинних сплавів на підприємствах-постачальниках. Слід переглянути і посилити вимоги до сплавів щодо інтервалів (меж) вмісту легуючих елементів і домішок; вмісту водню і неметалів особистих включень; параметрів структури та рівня механічних властивостей; збільшення частки вторинних сплавів у виробництві виливків до 40–60 %; використання явища структурної спадковості; визначення оптимальних складів шихти для кожної марки сплаву.

Таблиця 1.1 – Проблеми в технологіях алюмінієвого лиття на прикладі ВАТ «АвтоВАЗ» [8]

Проблеми	Отриманий результат
Нестабільність якості шихтових металів, складу шихти та відсутність об'єктивного контролю якості шихтових матеріалів	Нестабільність хімічного складу, якості розплаву, спалахи браку відливок, занижений рівень механічних властивостей
Застосування морально застарілих пла вильних печей	Невисока продуктивність, зайві втрати металу в шлак, мікронеоднорідна будова розплаву
Необґрунтоване розмаїття реагентів для обробки розплаву (рафінування , модифікування), відсутність експресних методів оцінки якості.	Слабкі ефекти обробки розплаву, забруднення атмосфери, нестабільність якості розплаву і виливків
Застосування морально застарілих марок сплавів і способів лиття	Низький рівень міцності, зайво масивні литниково- системи живлення, занижені коеф фіцієнт використання металу і вихід придатного

Вкрай обмежене застосування ком 'ютерних програм і технологій проектування, моделювання та контролю	Підвищена витрата металу на живлення виливки, нестабільність техпроцесу, збільшення виробничого циклу

2. Використання сучасних способів підготовки шихтових металів і якісної обробки розплавів. Особливу увагу слід звернути на пріоритетні технології, які дозволяють вирішувати в комплексі багато завдань. Вкрай ефективні дрібнокристалічні модифікатори, отримані заспеціальним технологіям з переплавів оброблюваних сплавів і лігатур. Перспективні фізико-механічні способи обробки розплавів: ультразвукова, магнітно-імпульсна, температурно-часова, фільтраційна та ін.

3. Підвищення міцності та зменшення маси виливків за рахунок застосування більш сучасних спеціальних способів лиття (лиття під тиском (ЛПД) з вакуумуванням і з підпресуванням, ЛНД з різними варіантами протитиску, ЛКД, рео- і тиксолиття, витягування з розплаву) та комп'ютерних програм (САПР «Відливка», «Полігон», LVM Flow та ін.).

4. Організація жорсткого і безперервного контролю структури та фізичних, механічних і ливарних властивостей сплавів у рідкому та твердому станах і якості виливків [8].

Витрати на виготовлення виливків можуть бути помітно знижені за рахунок застосування при приготуванні сплавів більш дешевих шихтових матеріалів. Однак у цьому випадку обов'язково ретельне рафінування розплавів від водню, металевих домішок і неметалевих включень (НМВ). Конкурентоспроможність вторинних сплавів на ринку металу помітно зросла, що обумовлено не тільки їх меншою вартістю, але і широким застосуванням при їх виробництві технологій комплексної переробки вихідної сировини і позапічної рафінуючої та модифікуючої обробки розплавів [8, 9].

Слід зазначити, що не існує стандартних рішень щодо хімічного складу

вторинних сплавів, які за своїми властивостями могли б бути повністю аналогічними до первинних, що раніше застосовувалися на цих заводах. Часто неприйнятним є і перехід на сплави, запозичені зі стандартів інших країн. Простої, легкої заміни первинного сплаву вторинним, як правило, зробити не вдається. Дослідженнями доведено, що сплави, які відповідають ГОСТ 1583-93 за хімічним складом і властивостями, але виготовлені з первинних металів або відходів (брухту, повернення та власного виробництва, стружки, шлаку, злив, бракованих деталей ів і виливків) часто істотно відрізняються за структурою і технологічними властивостями. У зв'язку з цим для адаптації вторинного сплаву до конкретних умов виготовлення виливки і вимог, що пред'являються до неї конструкторською документацією, потрібні всебічні дослідження його структури і властивостей [8].

При використанні низькосортної шихти для виготовлення деталей автомобілів технології плавлення і лиття алюмінієвих сплавів повинні адаптуватися до конкретних виробничих умов і вимог, що пред'являються до деталей (відливки) конструкторською документацією [10].

Це можна пояснити тим, що використання підвищеного кількості низькосортної шихти при виплавці алюмінієвих ливарних сплавів значно знижує їх властивості: сприяє насиченню газами, неметалевими включеннями, призводить до неминучого накопичення небажаних домішок, у тому числі й заліза, що утворює з компонентами сплавів складні інтерметалеві сполуки, які призводять до зниження пластичності та корозійної стійкості, погіршення обробки виливків різанням [11, 12].

У України вимоги, що пред'являються до коліс з легких сплавів, викладені в ГОСТ Р 50511-93 «Колеса з легких сплавів для пневматичних шин». Загальні технічні вимоги. Відповідно до цього ГОСТ механічні властивості матеріалів коліс повинні відповідати вимогам, наведеним у таблиці 1.2.

Як випливає з таблиці 1.2, сплав для виготовлення литих автомобільних коліс повинен мати високий рівень механічних властивостей: міцності, пластичності та твердості.

Крім хороших механічних і експлуатаційних властивостей сплав повинен мати високі технологічні властивості: хорошу текучість, малу схильність до утворення гарячих тріщин. Сплав повинен мати невелику усадку, переважно у вигляді усадочної пористості [13].

Таблиця 1.2 – Механічні властивості матеріалів коліс [13]

Вид матеріалу	Механічні властивості			
	Тимчасовий опір на розрив, МПа	Межа текучості умовний, МПа	Відносне подовження, %	Твердість за Брінелю, НВ
Нетермооброблюваний	160	80	5	45
Термооброблюваний	210	140		75–95

1.2. Вплив чистоти розплаву на властивості алюмінієвих сплавів та якість литих коліс

Рафінування алюмінію та його сплавів – це технологічна операція, без якої, так чи інакше, не обходиться жодне ливарне підприємство [14, 15].

Це пов'язано, перш за все, з використанням у шихті підвищеної кількості низькосортних матеріалів, оскільки первинні матеріали досить дорогі, а виробництво останнім часом збільшується [15].

В даний час для видалення з алюмінієвих сплавів неметалевих включень застосовують такі методи рафінування: рафінування хлористими солями; продувка нейтральним газом; продувка хлором і фільтрація.

Рафінування алюмінію об'єднує процеси дегазації та очищення розплавів від твердих включень. Специфічність взаємодії окремих сплавів з газами та оксидами, різноманітність вимог до ступеня чистоти металу,

відмінності в ефективності методів залежно від умов застосування враховуються при виборі способів очищення або їх комбінацій.

Способи рафінування за впливом на розплавлений алюміній поділяють на неадсорбційні та адсорбційні.

До неадсорбційних способів відносяться відстоювання, вакуумування, обробка ультразвуком, постійним струмом та деякі інші. При неадсорбційних методах рафінування оксидні включення та водень видаляють під впливом, що чиниться на всю масу металу.

До адсорбційних методів відносяться фільтрування, обробка флюсами, нейтральними або активними газами або летючими галогенідами. При адсорбційних методах розплав стикається з рафінуючим засобом, що взаємодіє з оксидними включеннями і газами (воднем), і видаляє їх з розплаву [16].

У роботі [17] зазначається, що численні способи рафінування алюмінієвих сплавів, що використовуються в металургійній практиці, можна звести до п'яти основних груп, виходячи з відмінностей у характеристиках рафінуючих середовищ.

Відстоювання. Очищення розплавів відстоюванням базується на різниці щільності металу та включень, через що витримка розплаву без перемішування сприяє спливанню або осаду включень [16, 18].

Більша частина неметалевих включень осідає на міксера. Швидкість осадження залежить від газового вмісту розплавів: із збільшенням газового вмісту швидкість осадження зменшується [18].

Цей метод застосовують після замішування в у флюсу, тугоплавких металів або лігатур або після інтенсивного перемішування розплаву для вирівнювання хімічного складу. Як самостійний процес відстоювання застосовується в тих випадках, коли включення досить віддалені один від

одного і розмір частинок не надто малий. Але і в цих випадках процес йде повільно, вимагає підвищеної

витрати палива і виявляється малоефективним. Тому, як правило, відстоювання застосовують у поєднанні з обробкою розплаву флюсами або продуванням газами [16, 18].

На практиці відстоювання застосовують, в основному, для очищення розплаву від грубих включень. Однак осідання грубих включень може сповільнюватися адсорбованим на їх поверхні воднем.

Процес відстоювання призводить і до деякої дегазації внаслідок перенесення водню, адсорбованого на твердих частинках, у верхні шари ванни (спливання Al_2O_3) або в донні шари (осідання Al_2O_3) і переходу розчиненого в металі водню через дзеркало розплаву в атмосферу печі. Процес дегазації в цьому випадку прискорюється, якщо з дзеркала металу зчищати оксидну плівку або в разі присутності в складі сплаву компонента, що руйнує суцільність (газопроникність) плівки [16].

До недоліків цього способу відноситься те, що він проводиться на такій стадії технологічного процесу, коли не виключається подальше забруднення розплаву при переливі розплаву; тривале відстоювання (понад 60 хв) призводить до укрупнення структури, зростання інтерметалевих сполук, а також до втрати продуктивності плавильно-ливарних агрегатів [18].

Вакуумна обробка розплаву. Процес дегазації при вакуумуванні заснований на тому, що при зниженні загального тиску над розплавом виділяється розчинений водень не тільки через дзеркало розплаву, але і в його обсязі у вигляді бульбашок [16].

Зі зниженням зовнішнього тиску над розплавом рівновага системи метал–розчинений газ, що встановилася під час плавлення, зміщується в бік менших концентрацій газу, що створює сприятливі умови не тільки для дифузії розчиненого газу в напрямку до вільної поверхні, але і для

виникнення і зростання газових бульбашок.

Повнота дегазації залежить від багатьох факторів: тривалості вакуумування, питомої величини вільної поверхні, глибини ванни металу, щільності оксидної плівки на поверхні розплаву, його температури, величини залишкового тиску та ін. Дегазація тим повніша, чим менша величина залишкового тиску над розплавом і більший час вакуумування [18].

Таким чином, з алюмінієвих сплавів можна досягти видалення деяких домішок (цинк, магній). При дегазації металу також відбувається його часткове очищення від твердих включень. При цьому ефект очищення буде тим вищим, чим вищий вихідний газовий вміст розплаву [16, 18, 20]. У роботі [18] зазначається, що динамічне вакуумування – один з найбільш ефективних методів зниження вмісту натрію в алюмінієвих сплавах.

Представлені в роботі [21] дані свідчать, що вакуумно-плазмова обробка розплаву дозволяє отримати характеристики міцності в деформованих сплавах на рівні тестованих (металл з чушки) при вмісті відходів в шихті до 80 %. При рафінуванні металу холодним аргоном у вакуумі такі значення властивостей досягаються в сплавах із шихти, кількість металовідходів у якій не перевищує 50 %.

Ультразвукова обробка. Обробка розплаву ультразвуком викликає в ньому кавітацію – розрив суцільності рідкої фази з утворенням порожнин, в які, як у вакуум, дифундує розчинений в ньому водень. В результаті утворюється мікропорожнина, заповнена газом. Ультразвук об'єднує мікропорожнечі до помітних розмірів бульбашок, прискорюючи процес дегазації. Бульбашки, досягаючи певної величини, піднімаються до поверхні, і водень виходить за межі розплаву [16, 22, 23].

Дегазація обробкою розплавів постійним струмом. Цей метод залишається поки що на стадії експериментального випробування. Першими відкрили взаємозв'язок впливу на розплав постійного струму і концентрації

в ньому розчиненого водню А. Г. Спаський і Д. П. Ловцов. За запропонованою ними схемою після проходження струму через розплав у режимі: сила струму 5 А, напруга 10 В, щільність струму 0,5–3 А/см$^{(2)}$ протягом 15 хв знижувалася його газонасиченість.

Автори припустили, що водень знаходиться в металі у вигляді позитивно зарядженого іона і зосереджується в прикатодному просторі. Відібрані експериментальні проби підтвердили це. Дегазацію прианодного простору і, отже, всього оброблюваного постійним струмом розплаву можна використовувати в виробничих умовах [16].

Створення над дзеркалом розплаву інертної атмосфери. Алюмінієві сплави від розчинених газів можна рафінувати створенням над дзеркалом розплаву інертної атмосфери. При вибудовуванні такої системи відбувається помітна дегазація розплаву, тривалість процесу визначається швидкістю дифузії розчиненого в металі водню до поверхні розділу фаз. З огляду на вплив швидкості дифузійного вирівнювання концентрації водню, рекомендується перемішувати розплав, що прискорить очищення металу від водню. Однак дегазуюча дія атмосфери зменшується при збільшенні в її складі концентрації водню. Зниження парціального тиску водню в атмосфері печі досягають створенням потоку рафінуючого газу над поверхнею розплаву [16].

Метод рафінування продуванням розплаву газами. Дегазація продуванням газами базується на двох процесах:

1) дифузії розчиненого газу в бульбашки продувного,

2) адсорбуючої дії продувного газу по відношенню до неметалевих включень і найдрібніших газових бульбашок.

Дифузія водню в бульбашки продувного газу відбувається внаслідок різниці парціальних тисків його в металі і бульбашці. Згідно із законом

Дальтона, перехід розчиненого газу з металу в бульбашку продувного газу буде відбуватися до тих пір, поки парціальні тиски не зрівняються. Однак така рівновага настати не може, тому що водень, розчинений в металі, знаходиться в атомарному стані, а водень, що проник в бульбашку, – в молекулярному. Тому незалежно від тривалості перебування бульбашки продувного газу в розплаві парціальний тиск атомарного водню в ньому буде близьким до нуля.

Оскільки дифузія водню в алюмінієвих розплавах протікає з малою швидкістю, а час перебування бульбашок продувного газу в розплаві порівняно малий, дегазація за рахунок дифузії відбувається повільно. Зменшення газового вмісту на початку продувки досягається головним чином внаслідок видалення найдрібніших бульбашок молекулярного водню ,що не спливли навіть при тривалому вистоюванні. При проходженні через розплав порівняно великих бульбашок продувного газу найдрібніші бульбашки молекулярного водню адсорбуються на їх поверхні і видаляються в атмосферу. Одночасно видаляються і неметалеві включення, в тому числі і ті, які утворюють з водопоходженням стійкі комплекси γ-Al2 O3 ·xH. Для досягнення максимального очищення розплаву від неметалевих включень і газу необхідно, щоб бульбашки продувного газу мали малі розміри, рівномірно пронизували весь його об'єм і повільно піднімалися в розплаві. Чим більші бульбашки, тим триваліший час продувки, необхідний для досягнення однакового ступеня очищення [18, 23].

Рекомендується застосовувати очищені від кисню і вологи гази, оскільки ці домішки сприяють утворенню оксидної плівки на поверхні бульбашок, що ускладнює дифузійне проникнення в них розчиненого в металі водню, і ефект очищення різко знижується. Навіть невелика домішка кисню, води в застосовуваному інертному газі істотно знижує ефект дегазації сплавів. Тому при виборі рафінуючого газу звертають увагу на

ступінь їх забрудненості зазначеними домішками. Вміст домішок в газах, що випускаються вітчизняною промисловістю, показано в таблиці 1.3 [18].

Таблиця 1.3 – Вміст домішок у газі [17, 18]

Газ	O2 (N2), об.%	Волога, г/м3
Азот:		
особливої чистоти	0,001	0,005
сорт вищий	0,005	0,005
сорт I	0,4	0,07
II	1	–
III	3,0	–
Аргон:		
сорт вищий	0,000 7 (0,006)	0,007
сорт I	0,002 0 (0,010)	0,01
Хлор	–	0,05

Рафінуючі гази можна розділити на дві основні групи: нейтральні та активні. До першої групи належать гази, що не вступають у хімічну взаємодію з алюмінієвим розплавом, до другої – хімічно активні при температурі рафінування гази, що утворюють з алюмінієм або компонентами сплаву хімічні сполуки. Деякі фізичні властивості газів, що використовуються при рафінуванні алюмінієвих сплавів, наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Фізичні властивості рафінуючих газів [17, 18]

Характеристика	Газ			
	He	Ar	N	Cl2
Атомний номер	2	18	7	17
Молекулярна маса	4,003	39,948	28,013	70,906
Щільність (t = 0∘ C, p = 0,1 МПа), кг/м3	0,178	1,784	1,251	3,214
Температура плавлення (p = 0,1 МПа), C	– 272,2	–189,4	–	–101,6
Температура кипіння (p = 0,1 МПа),∘ C	– 268,9	–185,7	–195,8	–34,05

Щільність рідини при температурі кипіння, кг/м3	124,9	1400	810	1560
Кількість газу, що утворюється при випаровуванні 1 м3, м3	700,3	784	647,7	492,8

Найбільш широке поширення з інертних газів у металургії отримав аргон, який не є дефіцитним, порівняно дешевий і може бути отриманий у будь-яких кількостях. Аргон нетоксичний і не вибухонебезпечний, але він важчий за повітря і може накопичуватися біля підлоги, в підвалах і приямках слабопровітрюваних приміщень, знижуючи тим самим вміст кисню [17, 18].

У роботі [24] запропоновано комбінований спосіб з використанням двохнезмішуваних рідин, що імітують метал і флюс, встановлено, що верхня рідина за певних умов емульгується в нижню, більш важку. Розглянутий метод обробки в порівнянні з відомою обробкою алюмінієвих розплавів сумішшю інертного (або нейтрального) газу і пилоподібного флюсу дозволяє:

– істотно збільшити міжфазну поверхню взаємодії рафінуючих реагентів з оброблюваним розплавом, що створює реальні передумови підвищення ефективності видалення водню і неметалевих включень з рідкого металу, зменшення тривалості рафінування і зниження витрати газу і флюсу при рафінуванні;

– спростити пристрій для введення флюсу в оброблюваний розплав, зробивши його надійним в експлуатації.

До групи нейтральних газів відноситься також і азот, широко поширений як рафінуючий газ при обробці алюмінієвих розплавів. Перед введенням у розплав з азоту видаляють вологу і кисень. Азот вводять через графітові або кварцові трубки, оснащені насадками з діаметром отворів 1–2 мм під надлишковим тиском 0,07–0,15 атм. Тривалість продувки коливається від 5 до 15 хв. Витрата азоту становить 0,3–1,0 % від ваги сплаву [23].

Присутність магнію в сплаві істотно підсилює взаємодію азоту з розплавом, в результаті чого спостерігається утворення нітриду магнію. Дослідження показали, що при продувці розплаву алюмінію азотом при температурі 730–740 °С утворення нітридів відбувається при вмісті магнію понад 2 % [17, 18].

При рафінуванні розплаву інертними газами найбільший ефект дає застосування пористих діафрагм. Пористі діафрагми виготовляють з різних вогнетривких матеріалів (корунд, графіт). Ефект рафінування при застосуванні пористих діафрагм зростає внаслідок подрібнення бульбашок газу і різкого збільшення його кількості, що вводиться в розплав [23].

Серед активних газів найбільш широке поширення отримав хлор. Ефективність очищення в даному випадку зростає – забрудненість неметалевими включеннями може бути знижена до 0,05 мм$^{(2)}$ /см$^{(2)}$,а газовий вміст – до 0,04–0,08 см$^{(3)}$ /100 г металу. На відміну від азоту при рафінуванні алюмінієвих розплавів хлором утворюються субхлориди алюмінію, а на кінцевій стадії – хлористий алюміній і хлористий водень. Ці продукти мають високу пружність пари і знаходяться в розплаві в пароподібному стані, у вигляді дрібних бульбашок, які спливають значно повільніше, ніж бульбашки хлору. Обробка хлором супроводжується зменшенням поверхневої активності неметалевих включень, що призводить до утворення сипучих шлаків.Знімається шлак майже не містить корольок металу.

Розплави зазвичай продувають хлором у герметичних камерах або ковші, що має кришку з відведенням відпрацьованих газів у вентиляційну систему. Для продувки повинен використовуватися очищений хлор. Рафінування ведуть при температурі 710–720 ◦ С протягом 10–12 хв при надлишковому тиску хлору 0,1–0,15 атм.Витрата хлору становить 0,2–0,8 %

від маси сплаву. Застосування неосушеного хлору істотно знижує ефект рафінування [23].

Рафінування хлором виявляється більш ефективним, ніж азотом або аргоном. Однак через високу токсичність його застосування обмежене. Для зменшення негативного впливу хлору на навколишнє середовище і обслуговуючий персонал, а також для збереження необхідного рівня очищення сплавів, випробувані інертні гази з домішкою хлору в кількості до 5–10 %. Така суміш дає такий же високий ефект рафінування, як і чистий хлор, хоча тривалість процесу очищення дещо збільшується в порівнянні з тривалістю обробки розплавів чистим хлором [16].

Рафінування флюсами. Механізм очищення від зважених неметалевих включень заснований на вилученні їх з розплаву за рахунок адсорбції, розчинення або хімічної взаємодії з розплавленими солями. Ефективність очищення досягається тоді, коли флюси змочують неметалеві включення краще, ніж метал. В результаті змочування розмір включень збільшується відрізняється, і вони осідають або спливають з більшою швидкістю, ніж до обробки флюсом. Частина включень видаляється також внаслідок флотуючої дії бульбашок пари, що утворюється в процесі дисоціації складових флюсу.

Ефективність рафінування залежить від повноти опрацювання флюсом всієї товщі розплаву. При невеликих обсягах розплаву це досягається ретельним перемішуванням під час рафінування або пропусканням струменя металу через шар рідких солей під час розливання. У печах великої ємності досягти такого опрацювання практично неможливо. Тому забрудненість злитків алюмінієвих сплавів після рафінування флюсами залишається все ще значною і становить 0,15–0,40 мм$^{(2)}$ /см$^{(2)}$ за технологічною пробою.

Обробка флюсом супроводжується дегазацією сплавів. Дегазуюча дія

флюсу менш ефективна, ніж хлору. У в виробничих умовах цим способом можна довести газовий вміст до 0,2–0,25 $см^2$/100 г металу.

Для рафінування алюмінієвих сплавів застосовують флюси, що представляють суміш галоїдних солей лужних і лужноземельних металів [19, 23, 25–27].

Найкращу рафінуючу здатність мають флюси, до складу яких входять фтористі солі – кріоліт, плавиковий шпат, фтористий натрій та ін. Склад деяких флюсів наведено в таблиці 1.5. Найбільш широке промислове застосування отримав флюс з 23 % кріоліту.

В даний час номенклатура випускаються флюсів досить велика і вибір препарату буде залежати від вимог до нього. Наприклад, ПП «САС інженерна компанія» для видалення оксидів, дегазації та виведення алюмінію зі шлаку пропонує препарат PROBAT-FLUSS AL 2126. Норма витрати такого препарату становить 0,05–0,2 %. Автори відзначають , також, що цей препарат зменшує втрати алюмінію при плавці мінімум на 1 % [25].

Необхідна умова застосування флюсів – ретельне просушування або переплавлення їх з метою видалення адсорбційної та кристалізаційної вологи [23].

Таблиця 1.5 – Склад флюсу для рафінування алюмінієвих сплавів [18, 23]

Склад флюсу, %						Область застосування
KCl	NaCl	Na3AlF	MgCl2 ·KCl	CaF6	NaF	
47,0	30	23				Для всіх алюмінієвих сплавів, крім Al–Mg і Al–Mg–Si; температура рафінування становить 700–750 ºС
–	–	–	60	40	–	Для Al–Mg і Al–Mg–Si; температура рафінування становить 715–770 ºС
			80	20		Те саме

11,5	56	7			25	Для з у сплавів системи Al–Si, універсальні, рафінуючі і модифікуючі флюси
10,0	50,0	10			30	Те саме
–	45,0	15			40	
	25,0				60	

Рафінування розплавів хлористими солями. Цей вид очищення розплавів заснований на їх летючості, термічній дисоціації та здатності вступати в обмінні реакції з компонентами сплаву.

Для рафінування алюмінієвих сплавів застосовують хлористий цинк, хлористий марганець, гексахлоретан, хлористий бор, чотирихлористий титан і ряд інших хлоридів. З огляду на гігроскопічність хлористі солі перед рафінуванням сушать або переплавляють. Залежно від ступеня забрудненості розплавів кількість хлоридів, що вводяться для рафінування, коливається в межах 0 ,05–0,5 % від маси сплаву. Введення більшої кількості обмежується можливістю забруднення розплаву металевими домішками [17, 28–31].

Хлористі солі взаємодіють з алюмінієм, утворюючи хлористий алюміній, який кипить при 180°, тому в розплаві він перебуває в пароподібному стані. Взаємодія хлористого цинку з алюмінієм відбувається за реакцією $3ZnCl_{(2)} + 2A1 = 2A1C1_{(3)} + 3Zn$.

Пари хлористого алюмінію забирають із собою бульбашки газів. Хлористий цинк повинен бути зневоднений, для чого його попередньо розплавляють і відливають у формочку. У розплавленому вигляді сіль зберігається в сушильній шафі.

Введення хлористого цинку в розплав здійснюється за допомогою дзвіночка [17].

Переваги рафінування алюмінієвих сплавів хлористим цинком або

хлористим марганцем – простота реалізації методу у виробничих умовах і невисока вартість реактивів.

Недоліки: спосіб важко реалізувати при необхідності рафінування великих ємностей, наприклад металу в тритонних ковшах: відновлений з хлориду метал переходить до складу алюмінієвого розплаву, що в деяких випадках є абсолютно неприпустимим.

Використання гексахлоретану є більш прийнятним, оскільки він малогігроскопічний і при взаємодії з алюмінієм не утворює елементів, що розчиняються в рідкому алюмінії. Істотний недолік – токсичність продуктів взаємодії, що виділяються при цьому.

Застосування хлор- і фторвмісних реагентів для рафінування супроводжується втратами алюмінію в результаті утворення галогенідів алюмінію [16].

Таблетовані препарати. В даний час НВП «Евтектика» пропонує таблетовані препарати для рафінування алюмінієвих сплавів. Розробники відзначають, що пропонований ними препарат забезпечує глибоке об'ємне рафінування і подрібнення структури ливарних сплавів на основі алюмінію. Підвищує пластичні властивості металу. Витрата такого препарату становить 0,05% до маси рідкого розплаву [32].

Фільтрація. Суть методу полягає в пропусканні рідких розплавів через фільтри.

В алюмінієвій промисловості для очищення розплаву від неметалевих включень використовують такі типи фільтрів: фільтри зі склосітки, з пінокераміки, насипні та керамічні трубчасті [33].

1.3. Сучасні технології модифікації доевтектичних і евтектичних алюмінієвих сплавів

У зв'язку зі створенням нових сплавів системи алюміній-кремній знову зріс інтерес до проблеми модифікації структури силумінів та інших алюмінієвих ливарних сплавів.

Незважаючи на майже півстолітню історію робіт з модифікації силумінів, до теперішнього часу не створено єдиної теорії, яка могла б пояснити все різноманіття явищ і наслідків, пов'язаних із здійсненням операції модифікації [7].

При використанні до- і евтектичних силумінів виникає завдання модифікації як первинних кристалів αAl, так і евтектики.

В даний час існують наступні теорії модифікації силумінів:

- гальмування росту зароджуваних кристалів рідкою фазою (натрій), що адсорбується на їх поверхні; дана теорія є пріоритетною;

- кристалізація силуміну, яка проходить колоїдальну стадію з дуже малим розміром частинок твердої фази. Добавка модифікатора усуває процес коалесценції (укрупнення) частинок, тим самим забезпечується отримання дрібнозернистої структури [34].

В цілому, відомо більше 40 елементів, що надають модифікуючий вплив на структуру силумінів.

Однак практичне застосування отримали тільки такі модифікатори, що впливають на морфологію евтектики, як натрій, стронцій, добавки лужних і лужноземельних металів [34–38].

Вплив вмісту натрію на можливі форми евтектичного кремнію в силуміні AlSi11 представлено на рисунках 1.1–1.4.

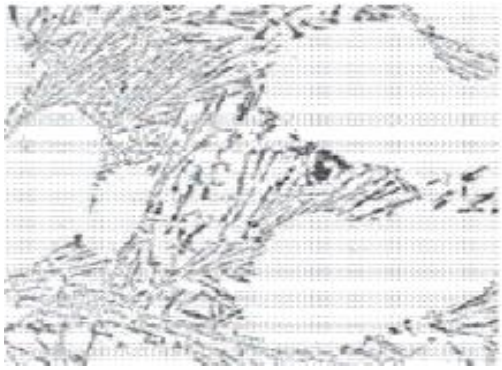
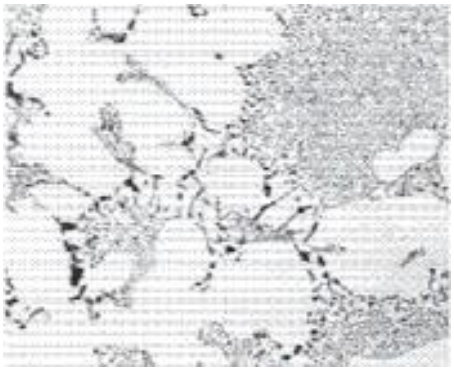


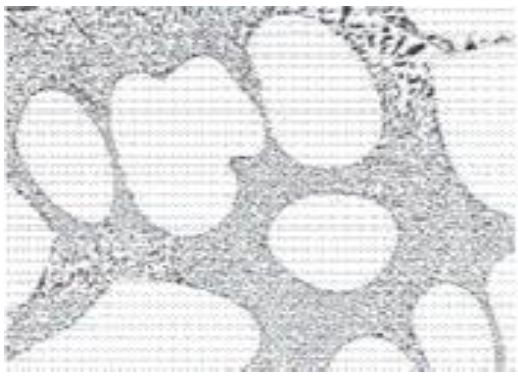
Рисунок 1.1 – Пластинчаста структура евтектичного кремнію [39]

Рисунок 1.2 – Гранулярна структура евтектичного кремнію [39]

У ливарних сплавах при повному відсутності фосфору або модифікуючих добавок, наприклад, натрію або стронцію, формується пластинчастий кремній.



а



б

Рисунок 1.3 – Структура евтектичного кремнію: *а* – недомодифікована; *б* –

модифікована [39]

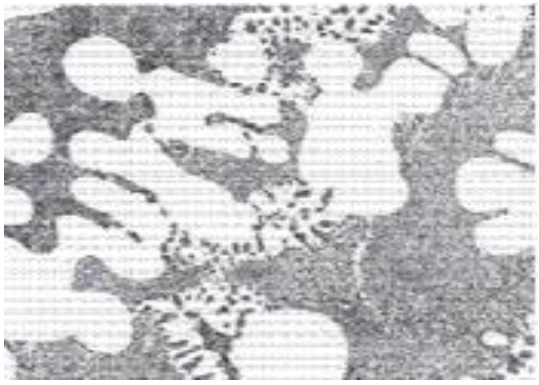


Рисунок 1.4 – «Перемодифікована» структура [39]

Умови для формування гранулярної структури евтектичного кремнію виникають за наявності фосфору, але без натрію або стронцію. Кристалі кремнію існують у вигляді грубих зерен або пластин [39].

Найбільшого поширення набув потрійний модифікуючий флюс (склад, %: 40 NaCl, 45 NaF, 15 KCl), який вводять у розплав у кількості 1,5 % від маси шихти при температурі 740–750°С. Інший спосіб введення даного флюсу полягає в його введенні при температурі 725–740°С після попереднього перегріву розплаву до 900–1 000 °С. Цей спосіб підсилює модифікуючий ефект і підвищує механічні властивості [19].

У роботі [40] було запропоновано модифікувати силуміни шляхом введення їх у сольовий розплав на основі евтектичної суміші KCl–NaCl, що містить NaF у кількості 6–17 мас.% або $BaCl_2$ у кількості 20–40 мас.%, плавку і витримку під шаром солей при 787–1 017 ($^{o)}$ С протягом 1–2 год, після видалення сплаву в сольовий розплав додають нову порцію твердого силуміну, при цьому висоту сольового розплаву над металом підтримують в межах 2,2–30,0 см, а співвідношення металу до розплаву солей беруть 1:(0,5 – 2,5). Спосіб забезпечує підвищення ступеня модифікації сплаву і одночасне рафінування його від оксидних плівок і інтерметалідів.

У роботі [40] зазначається, що в силіміні з вмістом кремнію понад 7 % евтектичний кремній займає більшу частину площі металографічного зразка. При вмісті кремнію від 7 до 13 % тип евтектичної структури, наприклад, зернистий або модифікований, значно впливає на механічні властивості матеріалу, зокрема, на пластичність або на відносне подовження. Тому, коли при випробуванні зразка необхідно отримати більше високе відносне подовження, алюмінієві сплави з вмістом кремнію від 7 до 13 % піддають модифікації шляхом додавання приблизно 0,004–0,010 % натрію (40–100 ppm).

Разом з тим , застосування натрію для модифікації пов'язане з рядом істотних недоліків: збільшенням газонасичення, зниженням текучості рідини, розвитком усадочної пористості (через підвищення коефіцієнта об'ємного стиснення при затвердінні), швидким вигорянням, що вимагає відновлення модифікації через кожні 30 хв, втратою модифікуючого ефекту після рафінування, фільтрації, вакуумування та ін. [19].

У силімінах із вмістом кремнію близько 11 %, особливо для лиття при низькому тиску, як довготривалий модифікатор застосовують стронцій. Відмінність стронцію від натрію як модифікатора в тому, що він значно менше вигоряє з розплаву, ніж натрій. Стронцій додають у кількості 0,014–0,040 % (140–400 ppm). При низьких швидкостях охолодження виливків модифікація стронцієм значно менш ефективна і тому вона не рекомендується до застосування, наприклад, при литті в піщані форми [19, 39].

У роботі [41] було встановлено, що Sr у кількості 0,02 % змінює форму фази евтектичного кремнію з великих пластин і голок на малі, тонко розділені волокна в литих алюмінієвих блоках циліндрів.

Стронцій використовується в основному в металевій формі сплаву, наприклад AlSr10, AlSr5, AlSi13Sr10 тощо [42 – 47]. Склад лігатури та тип її

виробництва мають вирішальний вплив на початок і тривалість ефекту модифікації. Це явище пояснюється часом утворення частинок Al(4) Sr, який залежить від їх розміру. Вплив розміру і форми частинок Al(4) Sr на морфологію евтектичного кремнезему і про початок і тривалість ефекту модифікації було вивчено в роботі [42].

Основним недоліком стронційвмісних лігатур є висока пористість сплавів [47–49].

У роботі [50] показано, що при введенні стронцію з розрахунку всієї маси шихти з відходами в алюмінієвий сплав необхідно рафінувати після модифікації. Якщо стронцій вводять з розрахунку маси шихти без урахування відходів, то сплав можна рафінувати до модифікації. При введенні стронцію замість натрію необхідно враховувати його вплив на усадочні процеси.

У роботі [7] було показано, що для підвищення механічних властивостей доевтектичного силуміна АК9, що містить титан, а отже і для зниження браку литих коліс з вини металу, можна запропонувати модифікування сплаву 0,04 % Sr спільно з 0,02 % B. Тимчасовий опір розриву такого сплаву становить 250 МПа, відносне подовження – 6,3 %.

У роботі [51] було запропоновано здійснювати модифікування силуміну фосфором у кількості 0,07 % від ваги силуміну, модифікатор вводять у розплав у вигляді лігатури Cu-10%P, а модифікування проводять при температурі на 250–300 °C вище температури ліквідусу сплаву. Відзначено, що при даному способі модифікування відносне подовження зразків зростає на 5 % при кімнатній температурі. Тривалість збереження ефекту модифікування, визначена за часом зниження відносного подовження модифікованих зразків до його мінімально допустимого значення при модифікуванні, становить 4 хв (ГОСТ 2685-75). Кінетичні дослідження показали, що у запропонованому способі ефект

модифікування зберігається протягом 65 хв.

У роботі [50] зазначається, що при лиття під тиском фосфор, як і натрій, має істотний недолік: тривалі витримки розплаву в роздавальній печі призводять до вигоряння модифікатора і втрати модифікуючого ефекту.

У роботі [19] запропоновано в якості модифікатора використовувати сурму в кількості до 0,2 %. Модифікуючий ефект при цьому не знижується при витримці до 4 год, але повністю знижується в присутності натрію. Модифікування силумінів сурмою супроводжується поліпшенням текучості, зменшенням усадочної пористості і схильності до утворення тріщин. Цей спосіб модифікування застосовується у Франції.

Однак, як зазначається в роботі [47], у сурми як модифікатора – високий ефект, але введення легкоплавкого елемента несприятливо позначається на властивостях сплавів при підвищених температурах.

У роботі [19] відзначається також можливість і доцільність модифікації евтектики в силумінах кальцієм, що, в порівнянні з модифікацією натрієм , в меншій мірі призводить до утворення усадочних пухкостей. Крім того, кальцій різко підсилює дію натрію.

Відома також можливість модифікації складнолегованих силюмінів германієм. Відзначається, що введення 0,1–0,5 % германію сприяє виділенню евтектики в структурі сплавів в орієнтованій каркасній формі, що сприятливо позначається на характеристиках міцності та герметичності. Крім того, істотно зростає рідкоплинність сплавів, зменшується зона пористості і подрібнюється макрозерно [19].

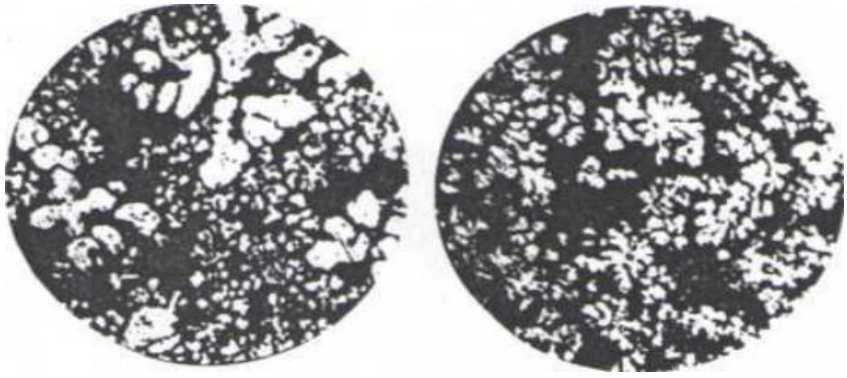
Найбільш ефективними модифікаторами αAl у в сплавах на основі алюмінію є перехідні метали (Sc, Ti, Nb, Zr та інші), а також B. Найбільш поширеним є модифікування алюмінієвих сплавів титаном, який вводять, як правило, у вигляді лігатури, рідше використовують цирконій і бор. Дуже хороші результати дає спільне модифікування титаном і бором [19].

У роботі [52] показано, що застосування дрібнокристалічної лігатури для модифікації сплаву АК9Т доцільніше, ніж використання Cl- і F-вмісного флюсу.

Принципова можливість застосування дрібнокристалічного сплаву на основі алюмінію, що містить титан і сурму, як модифікатора основних фазових складових структури алюмінієво-кремнієвих сплавів наведена в роботі [53]. Встановлено, що обробка цими модифікаторами доевтектичних і евтектичних силумінів у кількості 0,5 % від ваги розплаву дозволяє одночасно диспергувати основні фазові складові виливків від 2 до 20 разів і підвищити екологічну безпеку процесів лиття. При литті під тиском виливків із силуміну АК12 введення таких дрібнокристалічних алюмінієвих сплавів дозволяє знизити брак за газоусадочною пористістю в середньому на 14,7 %.

Можливість модифікації силумінів лігатурами Al–Ti–B і Al–Ti описана в роботах [54, 55].

У роботі [54] запропоновано модифікувати силуміни лігатурою Al–Ti–B (малюнок 1.5).



а *б*

Рисунок 1.5 – Мікроструктура дослідного сплаву [54]: *а* –немодифікованого, *б* –модифікованого лігатурою Al—Ti—B з розрахунку на отримання в сплаві 0,15 % Ti

У немодифікованому сплаві, перш за все, звертає на себе увагу характерна для структур, відлитих під тиском сплавів, яскраво виражена різнозернистість, яка в зразках дослідного сплаву при введенні лігатури Al–5%Ti–1%B зведена до мінімуму. Ступінь подрібнення зерна первинних кристалів твердого розчину склав від 0,09–0,18 до 0,06 мкм, тобто досягнуто подрібнення в 1,5–3 рази. Будова дендритів стала більш дисперсною – товщина вторинних гілок дендритів зменшилася від 0,026–0,035 до 0,009–0,017 мкм. При цьому слід особливо відзначити більш рівномірний розподіл по перетину зразка і очевидну стабілізацію розмірів зерен.

Зміна морфології дендритів також істотна. Дендрити нерегулярної форми вихідного сплаву в результаті модифікації перетворилися на дендрити із зовнішніми обрисами, близькими до сферичних. У виливках ци-

циліндр мотопили «Дружба» виявлено зменшення різнозернистості, подрібнення зерна, кращу рівномірність розподілу по перетину стінки виливка, стабілізація розмірів зерен виражена також досить чітко (малюнок 1.6). Зміна морфології дендритів після модифікування у виливку виражена мене чітко. Модифікація дозволила практично повністю усунути пористість у цьому перерізі, що пояснюється позитивною дією титану, який зв'язує водень у гідриди до кристалізації основної маси сплаву [54].

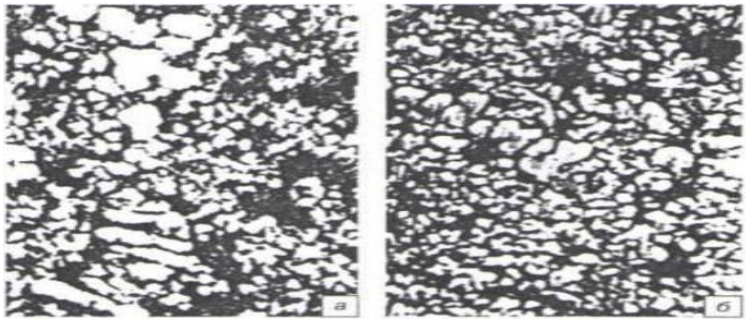


Рисунок 1.6 – Мікроструктура дослідного сплаву у відливці циліндра мотопили «Дружба» [54]: *а* – немодифікованого, *б* – модифікованого

лігатурою Al–Ti–B з розрахунку на отримання в сплаві 0,15%Ti

У роботах [56, 57] запропоновано технологію отримання лігатур з перехідними металами, що мають підвищені модифікуючі та легуючі властивості.

Сплави АЛ9 і АЛ5М обробляли лігатурами двох типів: стандартною (отриманою в м литтям у кокиль) і дослідною (отриманою високошвидкісною кристалізацією перегрітого розплаву). Склади чушкових (стандартних) лігатур – Al–2,2%Zr і Al–2,5%Ti, дослідних – Al–3%Zr і Al–2,5%Ti. Вміст ПМ в Al- Si-сплавах 0–0,27 %. Силуміни виплавляли в шахтній печі зі стандартних шихтових матеріалів, розливали в металеві виливниці. Технологія отримання виливків включала температурно-часову обробку (ТВО) розплаву. Литі заготовки піддавали ступінчастій термообробці – гомогенізації та старінню.

Виявлено, що легування сплаву до 0,5 % Zr не впливає на розмір макрозерна, а при його збільшенні до 0,12 % зерно подрібнюється вдвічі. Додаткове легування Ti підсилює ефект модифікації литої структури. При сумісній концентрації Ti і Zr з'являються надлишкові алюмініди складного складу Al(3) (Zr,Ti).

Виявлено, що дослідні лігатури не викликають подрібнення литого зерна, проте позитивно впливають на розміри дендритної комірки і евтектичного Si, а в структурі виливків, незважаючи на підвищений сумарний вміст Ti і Zr (0,25 %), відсутні надлишкові алюмініди.

У роботі [58] в якості модифікатора доевтектичного силуміну запропоновано використовувати лігатуру 50Zr–50Cu, отриману гартуванням з рідкого стану при швидкостях охолодження 106–107 К/с у вигляді аморфної стрічки товщиною 0,08 мм з міцністю 500 МПа, і показано, що цирконій у складі лігатури 50Zr–50Cu забезпечує при витраті лігатури 0,2

% від маси модифікованого сплаву підвищення межі міцності на розтягнення сплаву АК7М2 на 34 % і відносного подовження в 2,5 рази порівняно з немодифікованим сплавом і на 22 % і в 1,4 рази, відповідно, порівняно зі сплавом, модифікованим пластинами товщиною 6 мм.

Останнім часом у літературі з'являється все більше публікацій, що оцінюють можливість модифікації ливарних сплавів ультрадисперсними порошками [59–62]. Це пов'язано з тим, що ультрадисперсні порошки (УДП) мають високу поверхневу активність, здатні істотно поліпшувати мікроструктуру сплаву, збільшувати когезію частинок порошкового матеріалу. А при утворенні дрібнозернистої структури в процесі кристалізації важливе значення, як відомо з літератури [63–68], відіграє концентрація зародків кристалізації.

Таким чином, розробка методів модифікації алюмінієвих сплавів є одним з перспективних напрямків підвищення якості виливків, отриманих методом лиття під низьким тиском.

2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

Основними факторами, що визначають технічний рівень автотранспортного засобу, є матеріали та конструкції, здатні полегшити автомобіль, знизити споживання палива, підвищити економічний та екологічний аспекти. Постійне підвищення якості автомобільних коліс, що відповідають високим вимогам споживачів основна задача, вирішити яку необхідно дизайнерам, конструкторам і технологам підприємств.

Вітчизняний та зарубіжний досвід металургії алюмінієвих сплавів показує, що отримання якісних сплавів при мінімальних витратах на його виробництво має вирішальне значення в сучасних умовах ринкової економіки.

Високі вимоги до технології приготування сплавів і лиття коліс встановлюють і високі вимоги до оперативного контролю якості. Забезпечення вимог ГОСТ Р 50511-93 к структурі і рівень механічних властивостей коліс з одного боку і отримання високих технологічних властивостей сплаву з іншого, потребує системного і оперативного контролю якості металу.

Новизна представлених конструктивних і технологічних рішень підтверджена в роботі [69–72].

2.1. Стадії виготовлення коліс

Технологія виготовлення колеса на ТОВ «КіК» представляє замкнутий виробничий цикл, починаючи з віртуальної підготовки до виробництва (малюнок 2.1). Процес виготовлення автомобільних коліс починається з етапу моделювання, на якому здійснюється розрахунок режиму лиття, розробляється програма для верстатів ділянки механічної

обробки та лінії фарбування. Програмне забезпечення дозволяє проводити віртуальні випробування колеса на етапі його проектування. При даному випробуванні можна визначити, як колесо буде поводитися при стендових випробуваннях і в реальних умовах експлуатації. Віртуальні випробування з великою точністю дозволяють виявити і усунути на етапі проектування слабкі місця конструкції колеса.

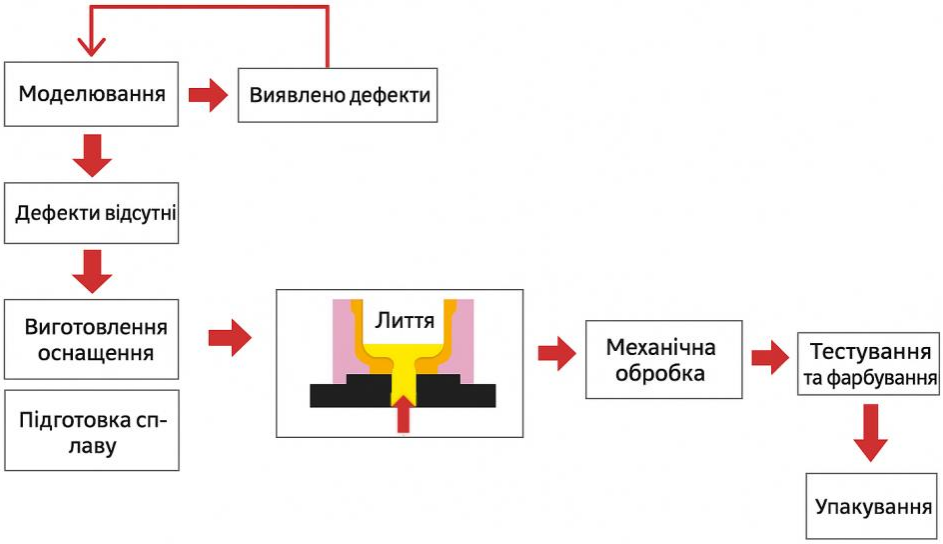


Рисунок 2.1 – Схема технологічного процесу

Наступним і одним з головних етапів у процесі створення колеса є виготовлення прес-форми. Виробництво прес-форми є технологічно складним процесом, що вимагає наявності спеціалізованого обладнання. Правильність виготовленої прес-форми визначає якість виливків і готової продукції. Прес-форма виготовляється з високолегованої інструментальної сталі, що витримує температуру до 800 ˚С.

Приготування розплаву в лабораторних умовах проводили в індукційних плавильних печах ІАТ-2,5. Приготування сплаву для лиття легкосплавних коліс здійснюється в індукційних тигельних печах фірми StrikoWestofen.

Лиття заготовок виконується на ливарних машинах німецької фірми GIMA. Рівень автоматизації ливарного обладнання дозволяє чітко відстежувати і підтримувати в потрібних межах параметри процесів лиття, забезпечуючи їх стабільність і спрямоване затвердіння виливків.

Кожне колесо проходить обов'язковий стовідсотковий рентгеноскопічний контроль, що здійснюється на автоматичних рентгенівських установках німецької фірми Yxlon. Отримані виливки в автоматичному режимі подаються на установку рентгеноскопічного контролю.

Готові виливки проходять механічну обробку і фарбування [73].

Дослідження та аналіз, що проводяться в роботі, розділили на два етапи (табл. 2.1):

Таблиця 2.1 – Методи, методики та прилади, що використовуються в роботі для аналізу якості металу та автомобільних коліс

Параметр	Методи, прилади (методики)
Сплав	
Хімічний склад	Прилад Spectromax (ГОСТ 1583-93)
Вміст водню в сплаві	Метод індексу щільності, прилад 3vt Прилад ALSPEK H MINI Метод В.І. Добаткина Метод вакуумного нагрівання ГОСТ 21132.1-98
Вміст оксидних плів у сплаві	Метод В.І. Добаткина
Параметри ліквідусу	Прилад Thermoanalyse-System TA 110
Диференціальна термограма	Прилад STA 469 Юпітер
Рідкоплинність	Спіральна проба (ГОСТ 16438-70)

Продовження таблиці 2.1

Параметр	Методи, прилади (методики)
Сплав і автомобільні колеса	
Аналіз макроструктури	Стереомікроскоп Carl Zeiss Stemi 2000-C
Аналіз мікроструктури	Інвертований світловий мікроскоп OLYMPUS GX51 Растровий електронний мікроскоп EVO 50 HVP
	Просвічувальний електронний мікроскоп JEM-2100
Механічні властивості	Розривна машина WDW-20 (ГОСТ 1497-84)
Автомобільні колеса	
Визначення опору втоми коліс при згині з обертанням	Випробувальний стенд MAKRA
Визначення опору колеса удару під кутом	Випробувальний стенд SAMSUN (ГОСТ Р 50511)

2.2. Методи оцінки забрудненості сплаву неметалевими включеннями і водню

Вміст водню *прямим методом* визначали за допомогою приладу ALSPEK H Mini і методом вакуум-нагрівання.

Прилад ALSPEK H Mini фірми Foseco дозволяє одночасно проводити вимірювання вмісту розчиненого водню і температури. Вимірювання вмісту водню (мл/100г) здійснюється електрохімічним датчиком, вмонтованим в наконечник зонда.

Для контролю водню в сплаві методом *вакуумного нагрівання* (ГОСТ 21132.1-98) відбиралися зразки в кокиль Ренслі. Недоліком цього методу є тривалість аналізу, тому він не може використовуватися в якості експрес - методу при оперативному коригуванні технології приготування сплавів і лиття виробів.

До непрямого методу визначення вмісту водню відноситься метод визначення *індексу щільності*, який розраховували за вимірами щільності зразків, відібраних з одного роздаточного ковша на приладі 3vt (малюнок 2.2). Маса контрольної проби для аналізу становила 50–60 г розплаву АК12. Затвердіння першого зразка відбувалося при розрядженому тиску 80 мбар і

й температурі 200 °С, затвердіння другого зразка – при атмосферному тиску на установці 3vt. Після охолодження проб вимірювали щільність кожного зразка гідростатичним методом з використанням спеціальних аналітичних ваг ANDGX600.

Рисунок 2.2 – Прилад 3vt [74]

При підготовці зразків приблизно 80 г розплаву поміщають в тигель з підігрівом і кристалізують під низьким тиском близько 80 мБар. Час кристалізації становив 4 хв. Потім зразок охолоджують і вимірюють щільність.

Другий зразок, приблизно такої ж ваги, кристалізують під атмосферним тиском і також визначають щільність. Різниця щільності двох зразків вказує на вміст водню. Чим менше різниця – тим чистіший розплав.

Для якісного лиття різниця щільності не повинна перевищувати 0,08 г/см^3 [74].

Для металографічної оцінки забрудненості сплаву неметалевими включеннями та водороду використовували метод технологічної проби (метод В.І. Добаткина). Метод оцінки забрудненості оксидними плівками за технологічною пробою був розроблений В.І. Добаткиним. Однак його

дослідження були спрямовані на оцінку якості деформованих сплавів, широко застосовуваних для виробів відповідального призначення, наприклад в авіабудуванні.Суть даного методу полягає в оцінці структури зломів осаджених галет, отриманих в процесі гарячої деформації відкритими бойками зразків, відлитих в спеціальний кокиль (малюнок 2.3).

Рисунок 2.3 – Кокиль для виготовлення технологічних проб

Процес осадження сприяє розвитку дефектів, а наступний ний нагрів галет до температури 450 °С і витримка при цій температурі протягом двох годин сприяють фіксації дефектів, а також більш якісному виготовленню зламів. Кількісним результатом аналізу є розрахунковий коефіцієнт ураженості оксидними плівками (К(д)).

Підготовку кокиля проводили наступним чином. Прогрів кокиля здійснювали першою незалежною заливкою. Випробуванням піддавалися друга і наступні відливки , які механічно обробляли до необхідного співвідношення висоти до діаметра ($H_0 / D_0 \leq 2{,}5$), щоб уникнути втрати стійкості та появи поздовжнього вигину (малюнок 2.4).

Далі нагріті заготовки висотою 95 мм і діаметром 60 мм осаджували на гідравлічному пресі фірми Mario Di Maio з максимальним зусиллям 80 кН.

Час витримки при нагріванні зразків при температурі 450 °С становив не менше 2 год.

Після осадження заготовок проводили їх загартування з температурою 530 °С і часом витримки 2 год у відпускній електропечі LAC PP20-540.

а

б

Рисунок 2.4 – Зразки для технологічних проб: *а* – до деформації; *б* – після деформації

На гідравлічному пресі П-6330 зусиллям 5–15 кН виробляли злам термічно оброблених зразків за допомогою клина з кутом загострення 45±15 град. Отримані злами представлені на рисунку 2.5.

Рисунок 2.5 – Зламки технологічних проб

Після оцінки якості злитків за зламами технологічної проби проводили аналіз мікроструктури в литому і деформованому стані за допомогою інвертованого світлового мікроскопа CarlZeiss AXIO Observer.A 1m. Площа зламу, зайнята оксидними плівками, оцінювалася в програмі-аналізаторі

AxioVision за результатами розрахунку відношення площі дефектів $S_Д$ (мм^2), виявлених у зламах технологічних проб, до загальної площі досліджуваного зламу $S_{изл}$ (мм^2):

КД = Sд / Sизл,

де Кд – коефіцієнт ураженості дефектами.

2.3. Методи оцінки структури та властивостей алюмінієвих сплавів

Оцінка хімічного складу сплаву проводилася методом спектрального аналізу на спектрометрі SPECTROMAX німецької компанії SPECTRO за ГОСТ 11069-2001 і ГОСТ 1583-93.

Вивчення макроструктури проводили за допомогою стереомікроскопа CarlZeissStemi 2000-C із збільшенням 0,65–5 разів.

Підготовку макроструктури проводили за допомогою спеціального комплексу пробопідготовки, що включає в себе відрізний верстат Brilliant, пристрій для гарячого запресування мікрозразків Opal 400 і шліфувальний верстат Saphir 520.

Вивчення мікроструктури проводили за допомогою растрового електронного мікроскопа EVO 50 HVP (CarlZeiss) з енергодисперсійним аналізатором In- caENERGY 350 (Oxfordinstrument). Аналіз проводився при зондовому струмі I = 250–264 пА і напрузі U = 20 кВ. У СЕМ EVO 50 HVP встановлена детекторна система, що враховує вторинні електрони (SE) – топографічний контраст, і зворотньо розсіяні електрони (BSD) – для мікроаналізу.

При дослідженні мікроструктури використовували термогравіметричний аналіз для виявлення структурних складових в

евтектичному сплаві. Тер- мограми (криві ДСК-ТГ) знімали на приладі NeitzschSTA 409 Luxx. Тримач ДСК-ТГ Pt-Rh, з Pt/Pt-Rh термопарами (тип S), тиглі PanPt-Rh.

Визначення механічних і ливарних властивостей. Механічні властивості (тимчасовий опір розриву ($\sigma_в$), межа текучості умовна ($\sigma_{0,2}$), відносне подовження (δ)) експериментальних сплавів визначали за ГОСТ 1497- 93.

Для оцінки механічних властивостей сплаву АК12 відливали в кокиль спеціальні зразки відповідно до ГОСТ 2685-75. Базова довжина зразків становила 60 мм при діаметрі робочої частини зразків, що дорівнював 12 мм. Перед заливкою кокиль прогрівався першою порцією залитого металу. Для досліджень відбиралися другий і наступні зразки. Кокиль фарбувався спеціальною роздільною фарбою фірми Foseco. Випробування проводили на універсальній розривній машині WDW-20 при кімнатній температурі.

Випробування на текучість були проведені за допомогою металевої форми (малюнок 2.6, ГОСТ 16438-70); температура форми становила 100 °С, температура розплаву – 710 °С.

Малюнок 2.6 – Металева форма для отримання проб текучості металів

Розділове покриття фірми Foseco наносили на нагріту до 100 °С форму в кілька проходів розпилювачем, в якому використовується стиснене повітря під високим тиском, що дозволяє отримати рівномірний шар без під-

течій (35–40 мкм).

2.4. Методи оцінки якості литих коліс

Випробування готових коліс проводили в лабораторії ТОВ «КіК», акредитованій Федеральним агентством з технічного регулювання та метрології в системі сертифікації ГОСТ Р рег.№ РОСС RU 0001.22МТ79.

Відповідно до вимог ГОСТ Р 50511-93 механічні в і властивості контролюють на зразках, вирізаних з найбільш навантажених частин колеса: центральної частини, перехідної зони від диска до обода, ободка, обох бортових закрайін та інших, зазначених у конструкторській документації. Схема вирізання зразків показана на малюнку 2.7. Контроль механічних властивостей коліс проводили відповідно до ГОСТ 1497-93 на універсальній розривній машині WDW- 20 при кімнатній температурі.

Макро- та мікроструктуру зразків коліс досліджували на світловому мікроскопі OLYMPUS GX51. Мікроструктуру також вивчали за допомогою електронних мікроскопів: растрового (Інститут кольорових металів і матеріалознавства ФГАОУ ВПО «Сибірський федеральний університет», м. Красноярськ) і просвічувального (м. Уфа).

Дослідження фольги проведені в Інституті фізики перспективних матеріалів у м. Уфа (с.т.с. М. Ю. Мурашкін) на електронному просвічувальному мікроскопі JEM – 2100, іонне утоплення виконано на установці фірми JEOL ION SLICER марки EM – 0900100IS.

Під час випробувань коліс на стенді визначали:

– опору втоми коліс при згині з обертанням (Випробувальний стенд MAKRA);

– опору колеса удару під м кутом 13° (Випробувальний стенд SAMSUN, ГОСТ Р 50511).

При випробуваннях коліс на стенді при навантаженні вигином з обертанням моделюють ефект бічних сил, що діють на колесо при русі на повороті.

Випробувальний стенд складається з приводного поворотного пристрою, що забезпечує вплив обертального моменту на нерухоме колесо, відповідно до рисунка 2.8.

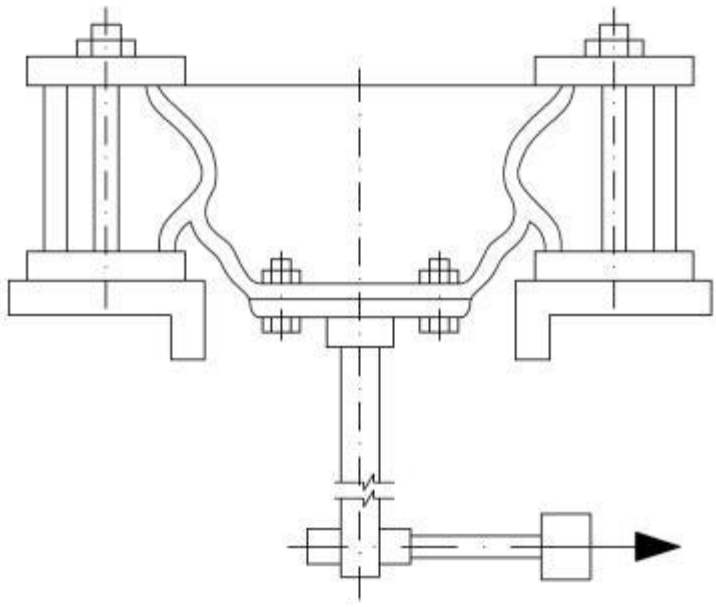


Рисунок 2.8 – Випробувальний стенд для оцінки стійкості автомобільних коліс опору втомі коліс при згині з обертанням [75]

Бортова закрайна ободів коліс повинна бути нерухомо закріплена на фланці випробувального стенду.

Поверхня фланця навантажувального вала випробувального стенду повинна мати місця кріплення, що відповідають приєднувальних розмірам на ступиці автомобіля.

Колеса для випробувань повинні бути без захисно-декоративного покриття.

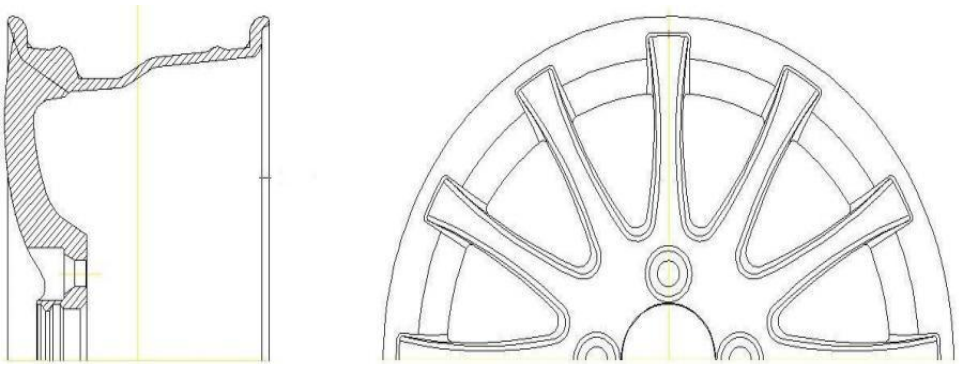


Рисунок 2.7 – Схема різання заготовок зразків для контролю механічних властивостей і хімічного складу серійних колес

Випробування слід проводити за двома ступенями згинального моменту, зазначеними в таблиці 2.2. На кожному ступені повинні бути випробувані два колеса.

Таблиця 2.2 – Ступені згинального моменту [75]

Згинальний момент при обертанні	Мінімальна кількість циклів навантаження
MBI = 0,5 MB	$1{,}8\times10^{6}$
MBII = 0,75 MB	$2{,}0\times10^{5}$

Випробувальний стенд для вивчення опору колеса удару під кутом 13° (малюнок 2.9) повинен мати пристрій, що створює ударне навантаження на бо закрайку обода колеса в зборі з шиною. Колесо під час випробування встановлюють під кутом до опорної поверхні стенду.

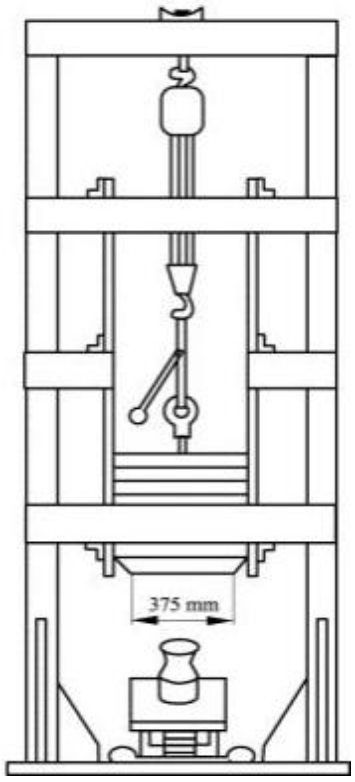


Рисунок 2.9 – Випробувальний стенд для вивчення опору колеса удару під кутом 13° [75]

Кут між віссю колеса і вертикальною площиною повинен становити 13±1°, мінімальні розміри робочої поверхні ударного елемента – 125×375 мм [75].

2.5. Моделювання процесу лиття автомобільних коліс зі сплаву АК12

Отримання заготовок легкоплавкого колеса – складний, дорогий і трудомісткий процес, тому помилки в технологічному проектуванні призводять до великих матеріальних втрат. Значно прискорити цей процес, знизити вартість підготовки виробництва і виключити помилки в техпроцесі можна його моделюванням.

Для встановлення раціональних технологічних параметрів лиття автомобільних коліс із силуміну на основі алюмінію А7 використовували програмний комплекс ProCast .

Об'ємна кінцево-елементна сітка (КЕ) створюється з використанням сіткового генератора MeshCAST, завантаживши в нього геометрію модельного блоку через проміжний формат IGS, збережену в CAD-системі Solid Works.

Далі будуємо об'ємні КЕ – сітки від виливки з ЛПС до опоки з наповнювачем, що дозволило для її оптимізації варіювати розмір елементів в різних частинах виливки. КЕ – сітка моделі представлена на малюнку 2.10.

На наступному етапі слід відзначити термодинамічну базу ProCAST. За допомогою якої можливий розрахунок теплофізичних і механічних властивостей сплаву за його хімічним складом. Розрахунок властивостей проводиться для сплавів на основі Fe, Al, Cu, Mg, Ni і Ti з використанням основних легуючих компонентів. Отримані властивості мають змінне значення в необхідному температурному інтервалі, що забезпечує високу точність розрахунку. Термодинамічна база даних ProCAST дозволяє розрахувати наступні теплофізичні властивості: теплопровідність (Вт·К/м(2)); щільність (кг/м(3)), ентальпію (кДж/кг), частку твердої фази в інтервалі кристалізації, температуру солідус і ліквідус (°С), в'язкість розплаву від температури (сП).

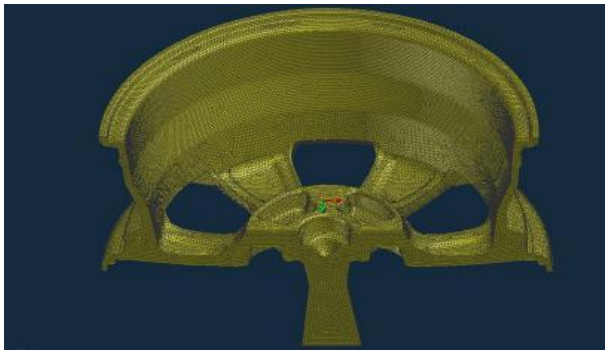


Рисунок 2.10 – Кінцева елементна сітка

Властивості матеріалів прес-форми та відливки, початкові та граничні умови задаємо відповідно до технологічного процесу в модулі PreCAST у такому порядку.

1. Генерація властивостей сплаву АК12 в термодинамічній базі (малюнок 2.11).

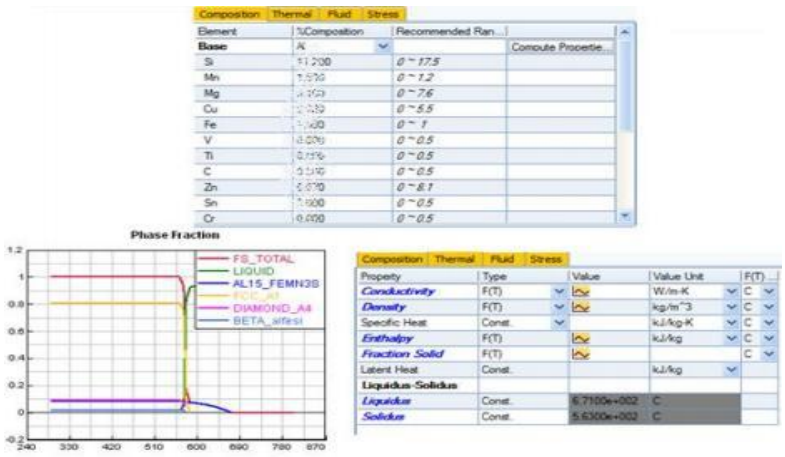


Рисунок 2.11 – Генерація властивостей сплаву АК12

2. Створення і призначення контактних поверхонь між компонентами (малюнок 2.12).

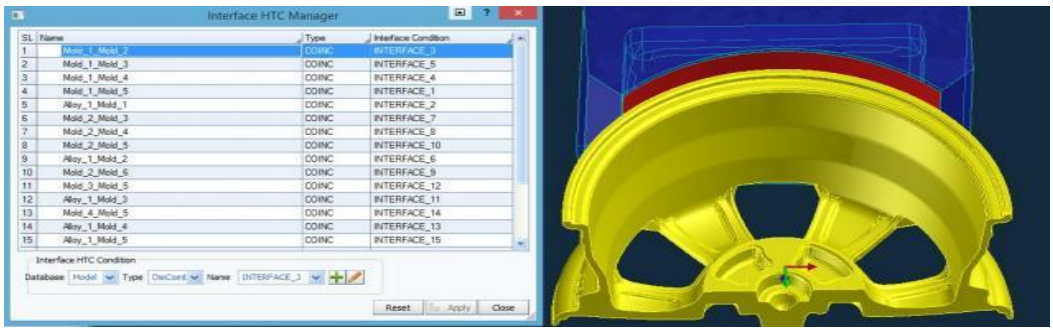


Рисунок 2.12 – Створення та призначення контактних поверхонь між елементами

3. Встановлення граничних умов (малюнок 2.13);

4. Встановлення гравітації.

5. Завдання константи початкових умов (малюнок 2.14).

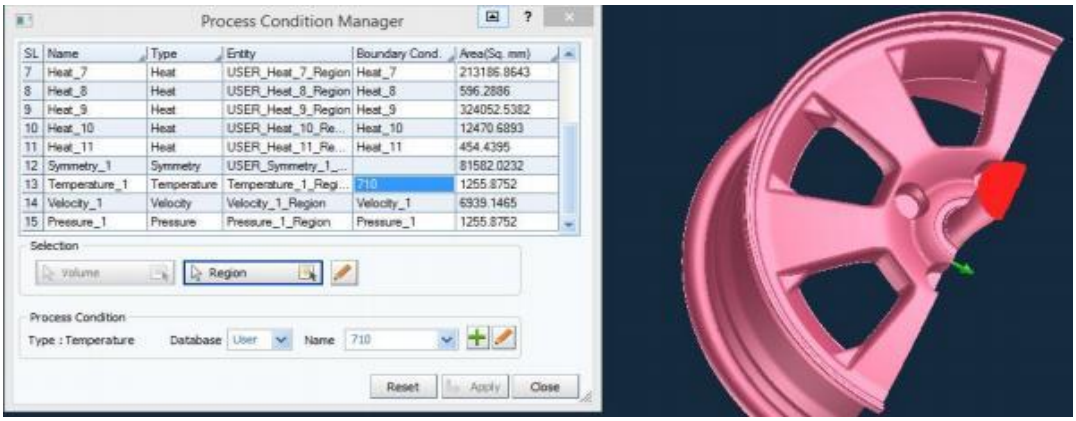


Рисунок 2.13 – Задані граничні умови (температура заливки 710°С)

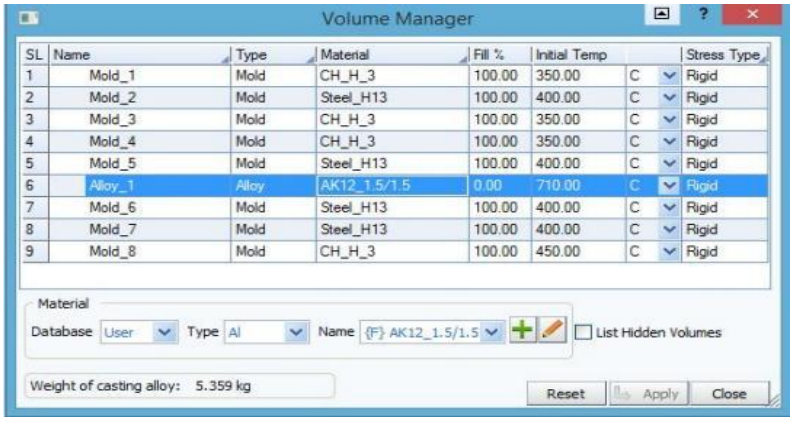


Рисунок 2.14 – Константи початкових умов

6. Встановлення параметрів запуску.

Далі запускається розрахунок в ProCAST. Слід зазначити, що всі модулі працюють одночасно, в один і той же час відбувається розрахунок гідродинаміки – заповнення форми сплавом, кристалізації та охолодження виливки.

Переглянути результати моделювання виливки можна в постпроцесорі програми ViewCAST. За результатами моделювання зробити висновки.

3. ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ ЗАЛІЗА І МАРГАНЦЮ В СПЛАВІ АК12 НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ А7 НА ВЛАСТИВОСТІ АВТОМОБІЛЬНИХ КОЛЕС

У сучасних умовах залежності промисловості від ситуації на світовому ринку чітко видно, що в останні роки відбувається скорочення обсягів виробництва первинного алюмінію. Разом з тим помітно зростає частка випущених алюмінієвих сплавів, використовуваних у в різних галузях промисловості – зокрема, ливарні сплави в України в загальному обсязі виробництва алюмінієвих сплавів становлять близько 20 % [76].

Перед виробниками стоїть завдання випуску конкурентоспроможної, високоякісної продукції при мінімальних витратах на її виготовлення. Це стосується і такої галузі машинобудування, як виробництво легкоплавних коліс автомобільних коліс, для яких неприпустиме застосування відносно дешевих вторинних сплавів через високий вміст у них домішок.

Для виготовлення литих автомобільних коліс методом лиття під низьким тиском застосовують силуміни, сировиною для яких служать первинні шихтові матеріали: алюміній марок А85 і А8, кремній кристалічний, модифікуючі компоненти тощо.

Використання низькосортної шихти з високим вмістом заліза (наприклад, первинного алюмінію марки А7) дозволить зменшити собівартість литих коліс , при цьому знижує їх механічні властивості через утворення включення фази Al–Fe–Si голчастої форми [77].

У роботі [77] зазначається, що залізиста фаза може формуватися у вигляді інтерметалідів, що мають форму голок або інтерметалідів у формі «скелетів» і «ієрогліфів». Мабуть, в першому випадку це β-фаза (Al(5) FeSi), а в другому – α-фаза (Al(12) Fe(3) Si).

З точки зору механічних властивостей силумінів найбільш несприятливою є β-фаза. У промислових умовах використовуються складнолеговані заевтектичні силуміни, до складу яких входять такі компоненти, як марганець, нікель, хром, які змінюють морфологію залізистих фаз і тим самим нейтралізують їх негативний вплив на властивості сплавів.

Широке застосування останнім часом комплексних рафінуючо-модифікуючих препаратів для алюмінієвих сплавів дозволяє скоротити тривалість обробки розплавів без зниження їх якості.

Вирішення цього питання є компромісом між необхідністю зменшити ціну сплаву і в ю отримати необхідний рівень механічних та експлуатаційних властивостей готових виробів шляхом мінімізації шкідливого впливу заліза елементами-компенсаторами, в якості яких рекомендується вводити марганець у кількості 50–100 % від вмісту в сплаві заліза. Добавка марганцю з отриманням особливого співвідношення Fe : Mn є широко поширеною практикою для поліпшення властивостей ливарних сплавів системи Al–Si і допомагає знизити пористість у виливках. Але значення, при яких це відбувається, повинні бути адаптовані до конкретних виробничих умов і вимог, що пред'являються до виливків [78].

Новизна представлених конструктивних і технологічних рішень підтверджена в роботі [79, 80].

3.1. Аналіз впливу технології рафінування на якість виливків

Складний профіль перетину виливків автомобільних коліс передбачає наявність теплових вузлів, які є потенційними зонами утворення дефектів газо-усадочного характеру (малюнок 3. 1).

Основною причиною виникнення пористості у виливках є

газонасичення розплаву, тому на цьому етапі роботи досліджували вплив параметрів на насичення розплаву газами з навколишнього середовища. Такими параметрами є вологість навколишнього середовища при виробництві виливків і температура рафінування розплаву.

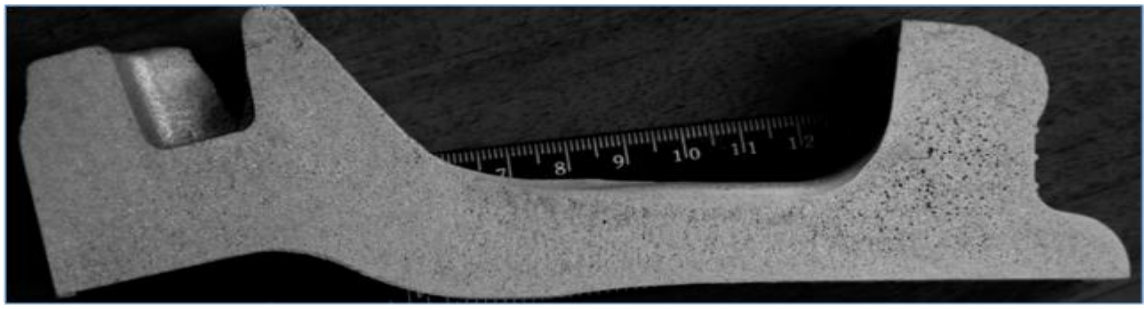


Рисунок 3.1 – Розташування теплових вузлів у виливку «Автомобільне колесо»

Для встановлення порівнянності результатів вмісту водню в сплаві методами вакуумного нагрівання ГОСТ 21132.1-98 та індексу щільності були відібрані проби металу в кокиль Ренслі та проби для вимірювання індексу щільності (малюнок 3.2).

а *б* *в* *г*

Рисунок 3.2 – Контрольні проби індексу щільності з результатами щільності, індексу щільності та вмісту водню за ГОСТ 21132.1-98: а , б – індекс щільності 14,7 %, вміст водню за твердою пробою 0,38 см3 /100 г; в, г – індекс щільності

12,4 %, вміст водню за твердою пробі 0,30 см3 /100 г. Щільність, г/см3 : а – 2,601; б – 2,213; в – 2,579; г – 2,26

Дослідна робота збіжності результатів аналізу вмісту водню показала хорошу відтворюваність результатів вимірювань трьома методами: методом індексу щільності, методом вакуум-нагріву ГОСТ 21132.1-98 і пор - тативним приладом Alspek H mini (Foseco) (малюнок 3.4).

Розташування графіку індексу щільності вище графіків за твердої проби і приладом Alspek H mini пояснює, що метод індексу щільності оцінює чистоту металу, включаючи вміст водню і оксидних плівок.

Оцінку забрудненості металу оксидними плівками проводили, використовуючи відомий метод залежності величини зерна і чистоти металу [16]. Метод полягає в наступному: проба у вигляді циліндра діаметром 60 мм і висотою 15 мм відливається у відкриту виливницю.

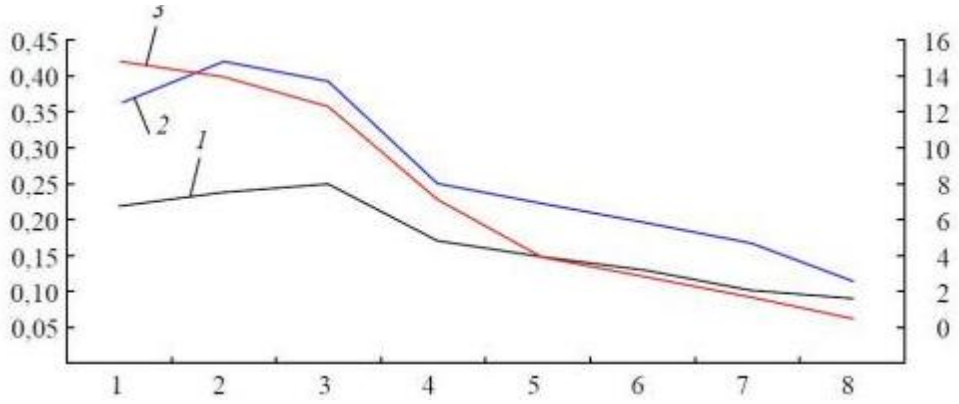
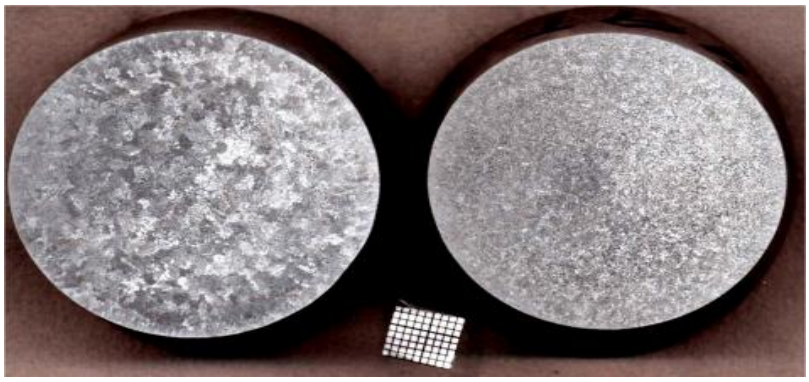


Рисунок 3.4 – Вміст водню в металі та індекс щільності проб, метод вакуум-нагрівання ГОСТ 21132.1-98 і електрохімічним сенсором приладу Alspek H mini

Поверхню проби протравлюють спеціальними реактивами для виявлення макрозерна. Грубозерниста структура виходить на пробах металу,

мало забрудненого оксидними включеннями. Дрібнозерниста структура свідчить про більше забруднення металу оксидами. Ефект пояснюється наявністю в розплаві суспензії Al(2) O(3) різної концентрації, яка в свою чергу, є центрами початку кристалізації сплаву (малюнок 3.5). В даний час ведеться робота по кількісній оцінці чистоти металу щодо неметалевих включень.

Використовуючи метод індексу щільності, було встановлено, що при виплавці металу в індукційних тигельних печах перевищення температури розплаву над температурою ліквідусу на кожні 10 ºС призводить до насичення воднем і зміни індексу щільності (малюнок 3.6).



а *б*

Рисунок 3.5 – Макроструктура проб металу з різними значеннями індексу щільності – вмістом водню та оксидними плівками, %: а – 9,1; 6 – 14

Проведено ряд робіт з оцінки впливу шихтових матеріалів на вміст водню. Встановлено, що зміна частки відходів механічної обробки лиття від 0 до 100 % призводить до підвищення показника індексу щільності металу в 5 разів – з 3 до 15 %

Таким чином, представлений досвід компанії ТОВ «КіК» показує можливість використання методу індексу щільності, як достовірного та ефективного експрес-методу контролю чистоти розплаву виробничих

умовах, контролю дотримання технологічних параметрів приготування сплаву та стабільності його фізичного складу.

Було проведено статистичний аналіз отриманих результатів щодо впливу температури розплаву та відносної вологості на індекс щільності

Показання індексу щільності зростають з підвищенням температури розплаву і відносної вологості навколишнього середовища. Збільшення індексу щільності зі збільшенням температури пояснюється тим, що процес розчинення газу супроводжується ендотермічною реакцією і може описуватися для алюмінію рівнянням розчинності [81].

Зростання показників індексу щільності при підвищенні вологості навколишнього середовища пов'язане з тим, що алюмінієвий розплав взаємодіє з вологою атмосфери, і протікає реакція

$$3H2O + 2Al = Al2O3 + 3H2.$$

Таким чином, рафінування розплаву АК12 дозволяє знизити індекс щільності на 90 %. У дослідженому інтервалі відбувається зниження індексу щільності з пониженням температур.

Паралельно з відбором проб на індекс щільності здійснювали вимірювання вмісту водню в розплаві АК12 прямим методом приладом ALSPEK H MINI до і після рафінування, і проводили статистичний аналіз отриманих даних.

Теоретично кореляційна залежність індексу щільності та вмісту водню повинна наближатися до одиниці, якщо вони змінюються пропорційно один до одного. Експериментальні результати показують, що коефіцієнт R^2 визначає середню залежність між значеннями індексу щільності та вмістом водню. Отже, індекс щільності показує не тільки зміну вмісту водню, але і забрудненість розплаву неметалевими

включеннями.

При приготуванні розплаву відбувається інтенсивне газонасичення воднем, азотом, киснем, і алюмінієвий розплав взаємодіє з киснем, утворюючи оксиди Al_2O_3 у вигляді плівок і суспензій, які є сильним адсорбентом водню. Будучи пухкою, поверхня оксидних плівок значною мірою адсорбує водень і створює умови для формування пор при затвердінні зразка під низьким тиском. Показник щільності зразка, при цьому, залежить від кількості поглиненого водню і кількості суспензій оксидних плівок, що потрапили в розплав при його приготуванні.

Результати проведеного дослідження узгоджуються з даними, представленими в роботі [69], де показана різниця фактичного вмісту водню і відносного його вмісту за індексом щільності. Тому індекс щільності є якісним методом оцінки забрудненості неметалевими включеннями і воднем.

Таким чином, показання індексу щільності неоднозначно пов'язані з фактичним вмістом водню через присутність в розплаві оксидних плівок і вплив їх кількості на його значення.

Аналіз результатів стендових випробувань показав, що основною причиною руйнувань коліс при динамічних навантаженнях є присутність в мікроструктурі оксидних плівок, на яких відбувається зародження і розвиток втомних тріщин. При випробуваннях на визначення опору втоми коліс при згині з обертанням виявилася тенденція до розвитку таких тріщин в зоні маточини (малюнок 3.11).

Розтин тріщини методом «долома по дефекту» встановив наявність втомної тріщини. Фрактографічне дослідження структури зламу виявило багатоосередковий характер зародження тріщини, причиною появи яких є оксидні плівки. Присутність оксидних плівок в зоні вогнища підтверджено дослідженнями мікроструктури (малюнок 3.12).

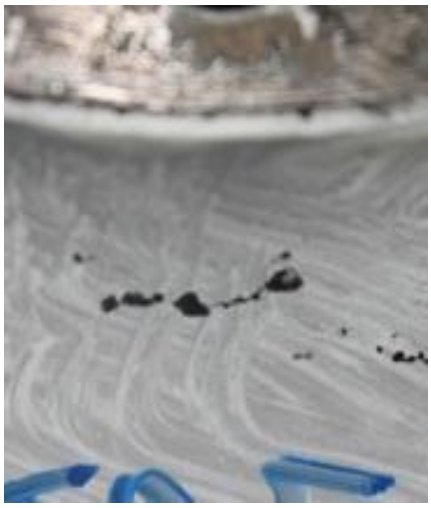


Рисунок 3.11 – Зона зародження тріщини

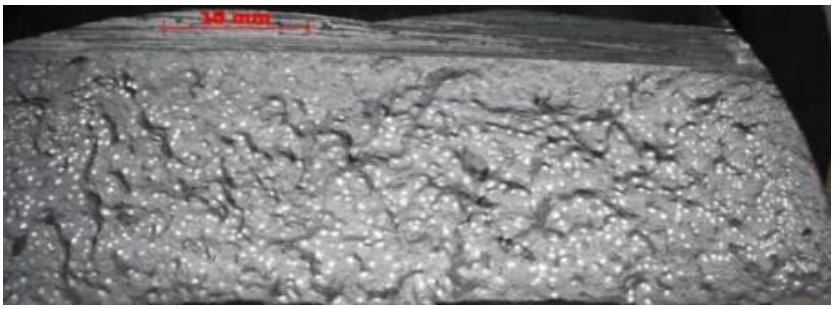
Рисунок 3.12 – Мікроструктура виливки поблизу зони руйнування

Наявність оксидних плівок послаблює конструкцію колеса і може служити причиною його руйнування в процесі експлуатації. Можливими наслідками такого руйнування може стати створення аварійної ситуації, пошкодження майна і загроза життю пасажирів і учасників руху. Тому необхідно кількісно оцінити присутність оксидних плівок в сплаві.

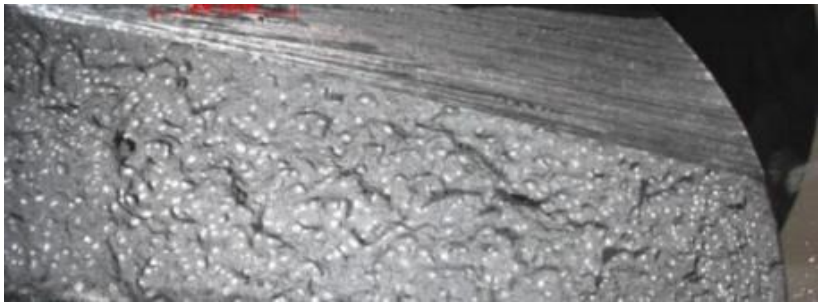
Використовуючи метод технологічної проби, провели порівняльний аналіз проб, відлитих за однакових умов, до і після рафінування з обов'язковим контролем вмісту водню експрес-методом і контролем індексу щільності розплаву.

Внаслідок нерівномірної деформації схема напруженого стану

змінюється, викликаючи появу розтягуючих напружень у радіальному та тангенціальному напрямках значної величини, що викликає на поверхні заготовки при малій пластичності поздовжні тріщини [82, 83]. При цьому для якісної оцінки осадженої заготовки неприпустиме зближення зон ускладненої деформації та їх взаємодії, тобто неприпустиме відношення осадженої заготовки $H / D < 0,25$. В ході експерименту для дотримання даних умов було обрано ступінь деформації для осадки $\varepsilon = 40$ %. Отримані злами представлені на малюнках 3.13–3.16.

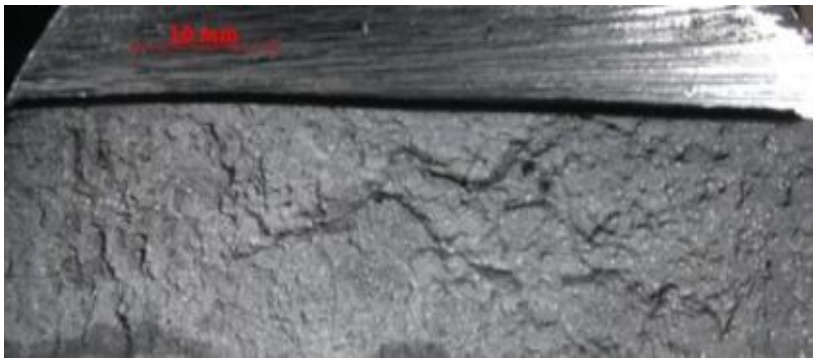


а



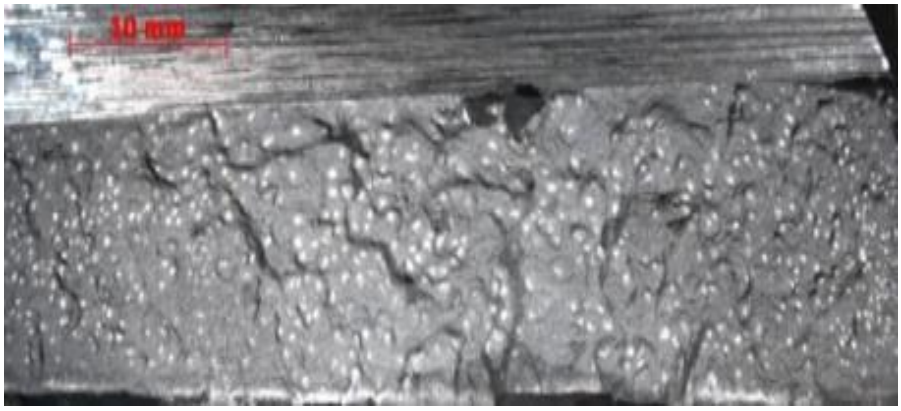
в

б

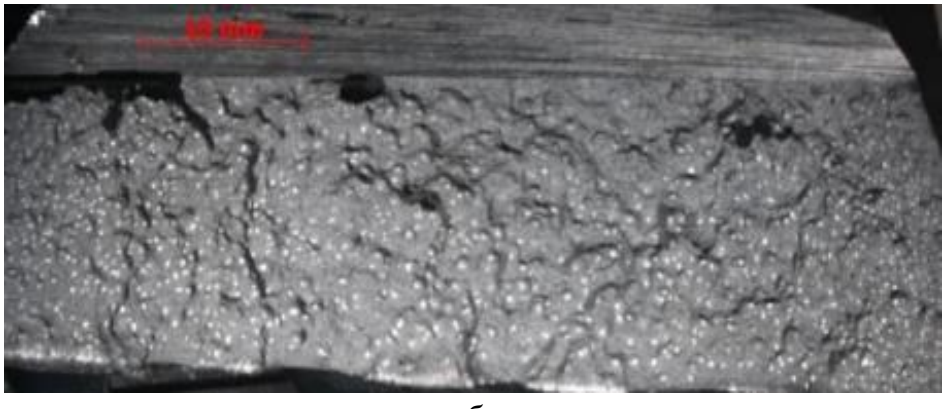


г

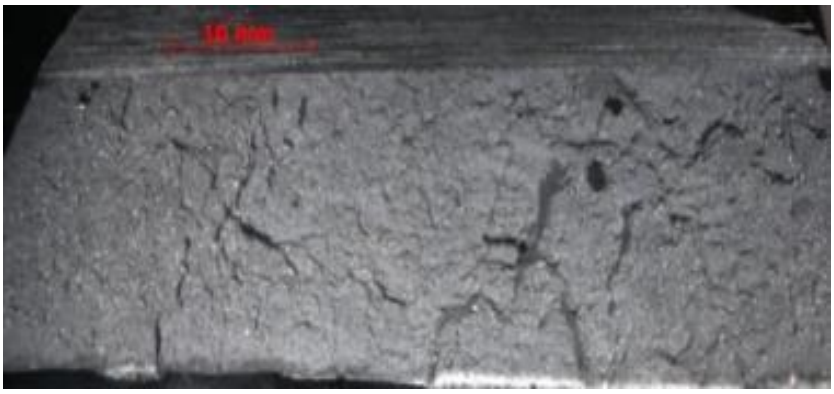
Рисунок 3.13 – Злами технологічних проб до і після рафінування розплаву АК12 (розплав приготований в печі ІАТ № 2): *а* , *в* – до дегазації; *б*, *г* – після дегазації. Кд, % (номер проби): *а* – 3,32 (1); *б* – 1,94 (2); *в* – 3,55 (3); *г* – 1,36 (6)



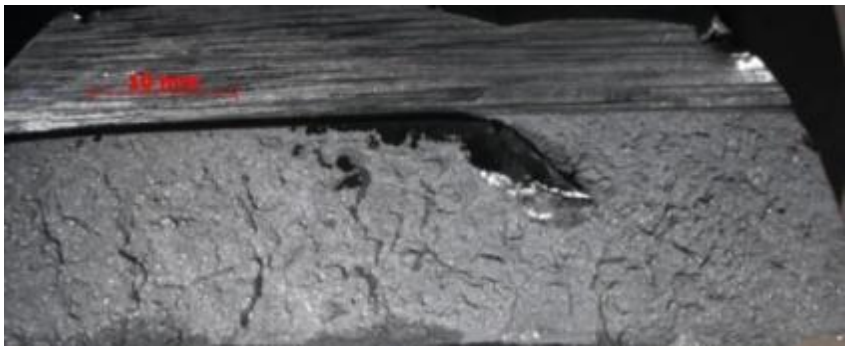
а



б

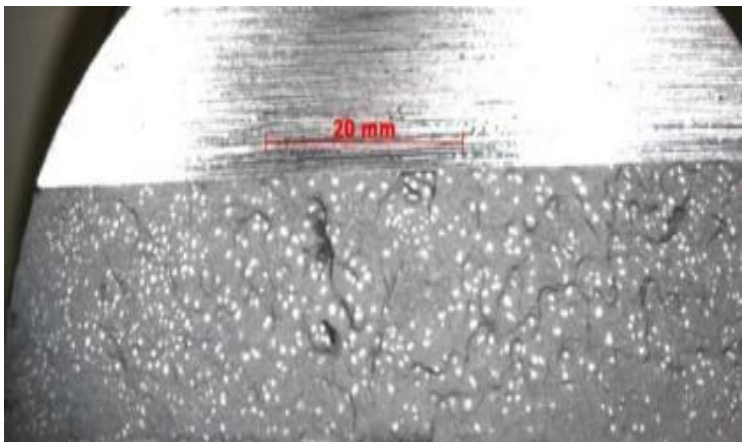


в

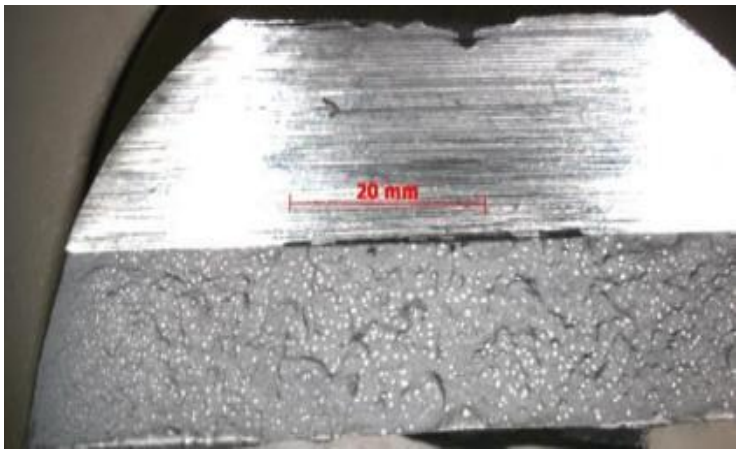


г

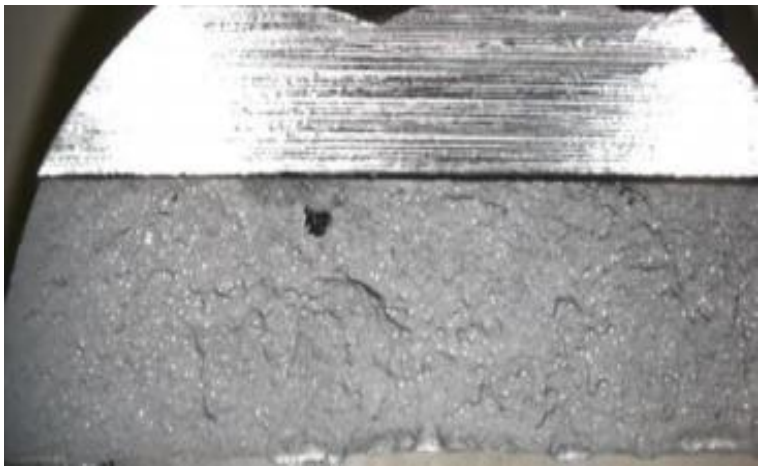
Рисунок 3.14 – Злами технологічних проб до і після рафінування розплаву АК12: *а* , *в* – до дегазації; *б*, *г* – після дегазації. Кд, % (номер проби, номер плавки в печі ІАТ): *а* – 3,48 (5, № 5); *б* – 0,77 (6; № 5); *в* – 3,08 (7; № 1); *г* – 0,6 (8; № 1)



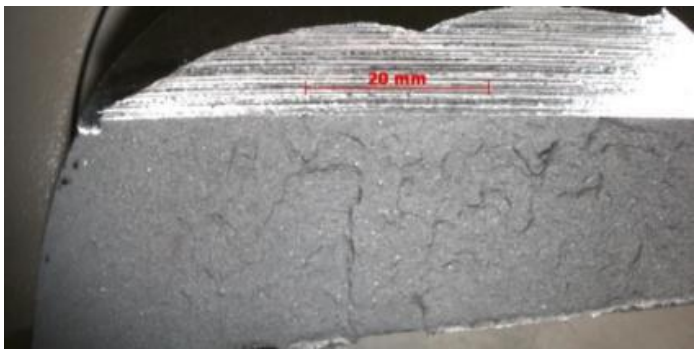
а



в

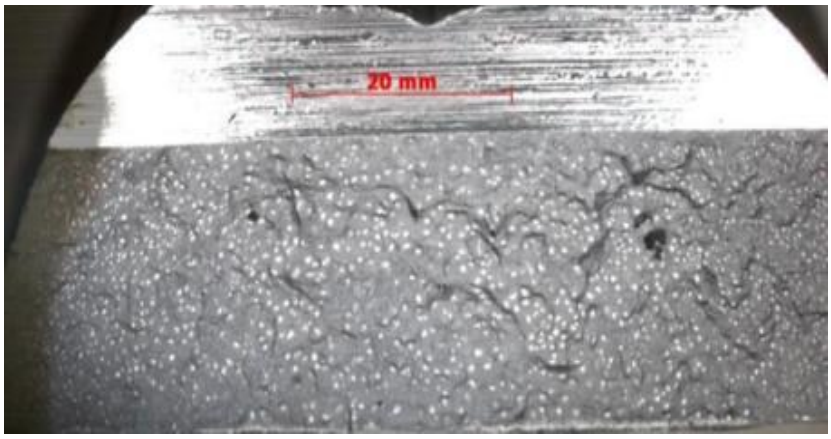


б

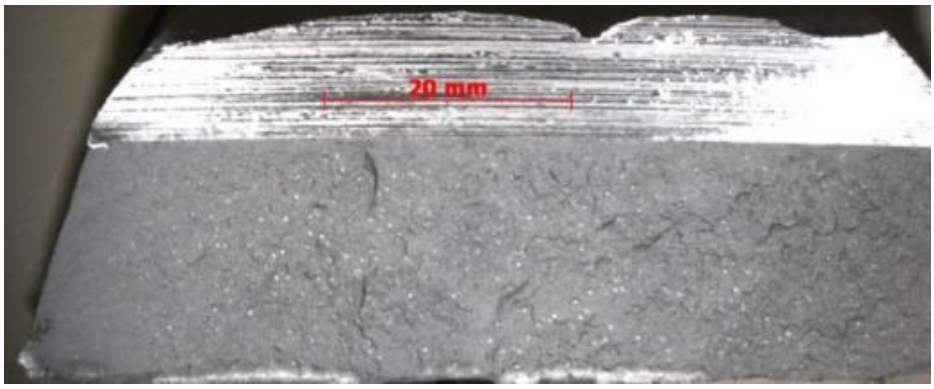


г

Рисунок 3.15 – Злами технологічних проб до і після рафінування розплаву АК12: *а* , *в* – до дегазації; *б*, *г* – після дегазації. Кд, % (номер проби; номер плавки в печі ІАТ): *а* – 6,87 (10; № 5); *б* – 1,76 (11; № 5); *в* – 5,6 (12; № 2; І.П. =14,21 %); *г* – 0,48 (13; № 2)



а



б

Рисунок 3.16 – Злами технологічних проб до і після рафінування розплаву АК12 (номер плавки в печі ІАТ №1):*а* – до дегазації; *б* – після дегазації. Кд, % (номер проби): *а* – 6,3 (14); *б* – 1,08 (15)

З 'ясовано , що після рафінування змінюється об'ємна частка площадок/розшарування на поверхні зламу. Причому їх кількість і розміри можуть змінюватися в різному ступені залежно від вмісту водню і показників індексу щільності (малюнки 3. 17, 3. 18).

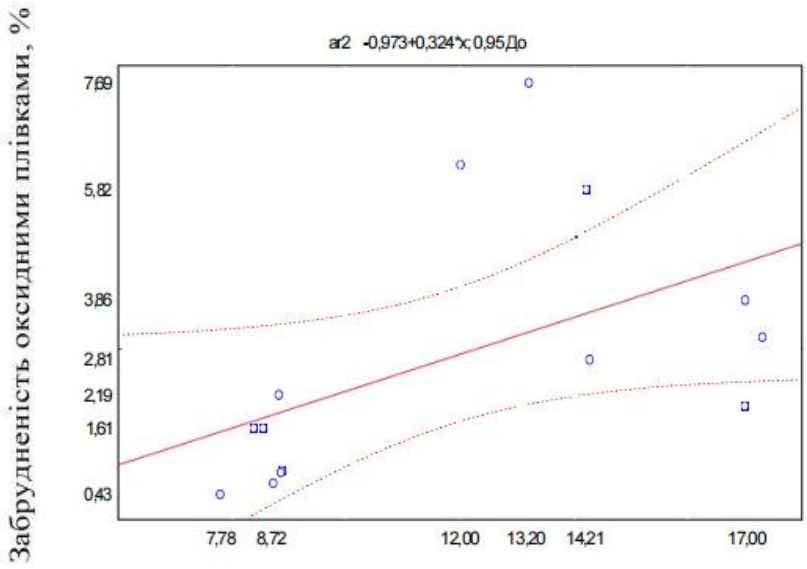
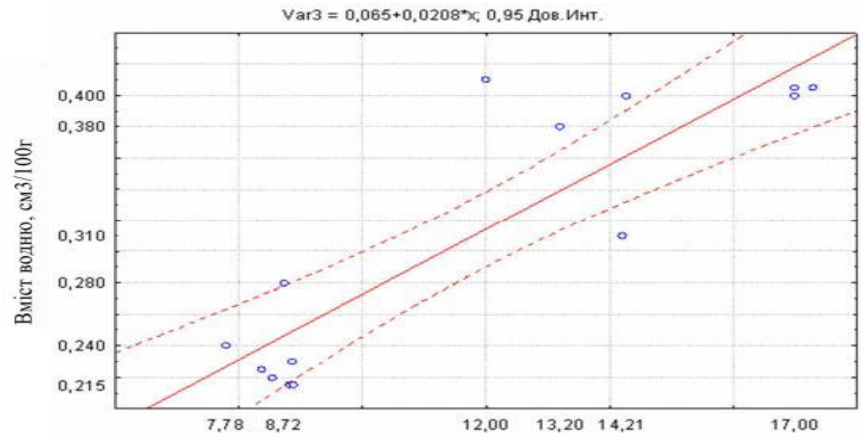


Рисунок 3. 17 – Діаграма розсіювання індексу щільності сплаву та забрудненості оксидними плівками

Значення коефіцієнта ураженості оксидними плівками змінюються залежно від зміни вмісту водню та показників індексу щільності. Надалі досліджували отримані злами при великих збільшеннях з використанням світлового та растрового електронних мікроскопів з метою аналізу характеру та причини їх руйнування (малюнок 3. 19). Аналіз показав , що руйнування заготовок відбувається по оксидних плівках , розташованих по межам зерен і розвинених в процесі деформації у вигляді майданчиків різного кольору.

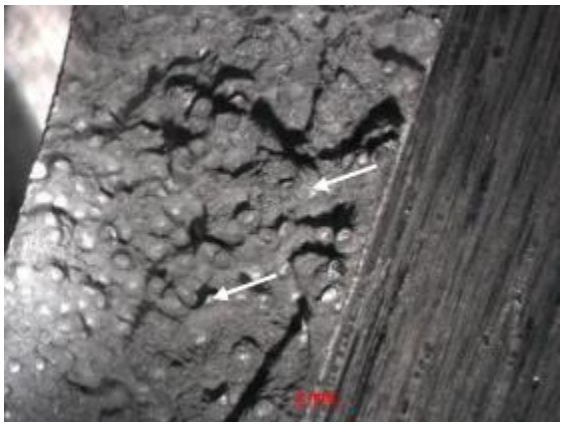


Індекс щільності, %

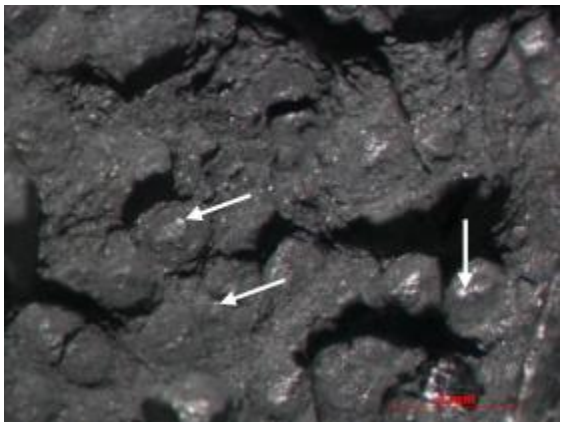
Рисунок 3. 18 – Діаграма розсіювання індексу щільності сплаву і вмісту водню в розплаві

Мікроструктура зламу характеризується значною кількістю дисперсних ямок, що свідчить про значну пластичної деформації. Причому значна деформація спостерігається на межах майданчиків, які, в свою чергу, є безструктурними. Безструктурні майданчики є результатом крихкого руйнування по окисній плівці. Було виявлено присутність у зламках розривних зразків дрібних частинок, які можуть негативно вплинути на механізм руйнування металу. Склад цих частинок характеризується флюсами, використовуваними для комплексного рафінування при позапічної технології очищення розплаву (малюнок 3.20).

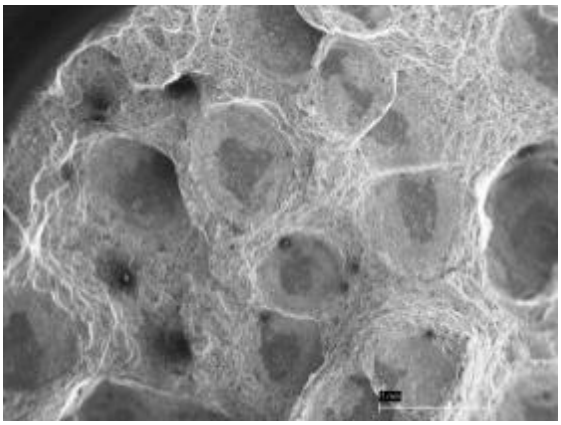
Після металографічного дослідження зломів технологічних проб були вирізані в дольовому напрямку зразки для випробувань механічних властивостей металу з різним коефіцієнтом забрудненості . Результати випробувань наведені в таблиці 3. 1.



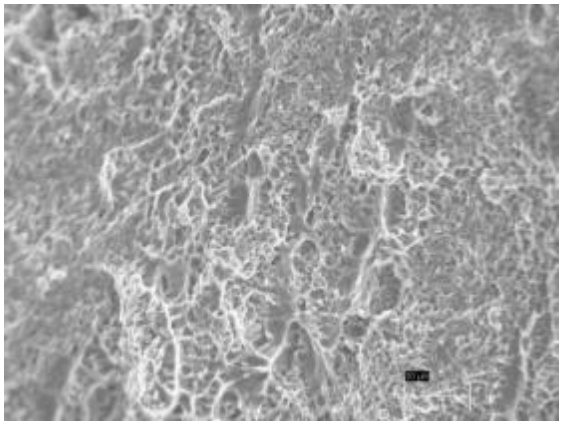
а



б



в



г

Малюнок 3. 19 – Злами технологічних проб до дегазації: а , б – світлова мікроскопія; в , г – растрова мікроскопія . Збільшення, крат: а – х1,6; б – х5; в – х50, г – х1 000

Аналіз отриманих результатів показав , що рафінування розплаву при - призвело до підвищення рівня механічних властивостей сплаву. Найбільший приріст (~45 %) показало відносне подовження зразків. Відомо , що присутність у розплаві алюмінієвого сплаву оксидних плівок знижує відносне подовження деформованих виробів [33, 84]. Рафінування розплаву призвело і до підвищення рівня тимчасового опору розриву, зміна рівня межі текучості не зафіксована .

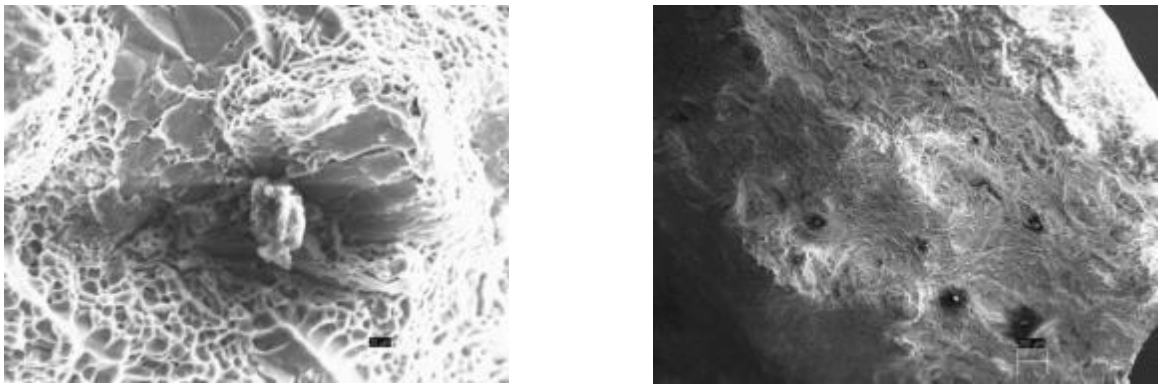


Рисунок 3.20 – Злами після випробувань на розтягнення (РЕМ)

Таблиця 3. 1 – Механічні властивості технологічних проб

Рафінування	Механічні властивості			Примітка	
	σв, МПа	σ0,2 , МПа	δ, %		
До	197,5±3,93	104,5±11,37	19,2±1,7	З модифікаторами	Після осадки
Після	192,0±8, 18	107±3,24	18,0±3,31		
До	164,5±36,0	105,5±0,7	6,2±4,24	Без модифікаторів	
Після	184,5±10,6	100,5±4,94	11,3±1,0		
До	144,7±6, 1	97,7±0,6	2,3±0,4		Без осадки
Після	156,3±0,6	98±2,0	2,8±0,3		

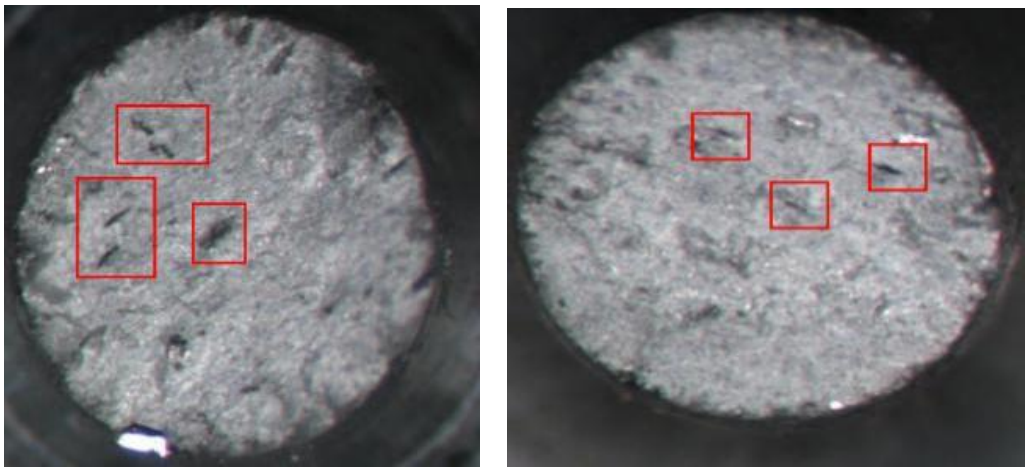
Результати випробувань проб без деформації показали незначне підвищення рівня механічних властивостей литих проб після рафінування. Можливість провести достовірну кількісну оцінку забрудненості розплаву неметалевими включеннями можлива тільки після деформації проб , що провокує розвиток дефектів на присутніх неметалевих включеннях різної величини .

В ході експерименту було встановлено вплив операції модифікації на результати випробувань рівня механічних властивостей зразків, відібраних них з осаджених технологічних проб за тією ж схемою: до і після рафінування розплаву. У присутності модифікаторів зафіксовано зниження міцнісних і пластичних характеристик, що спотворює результати

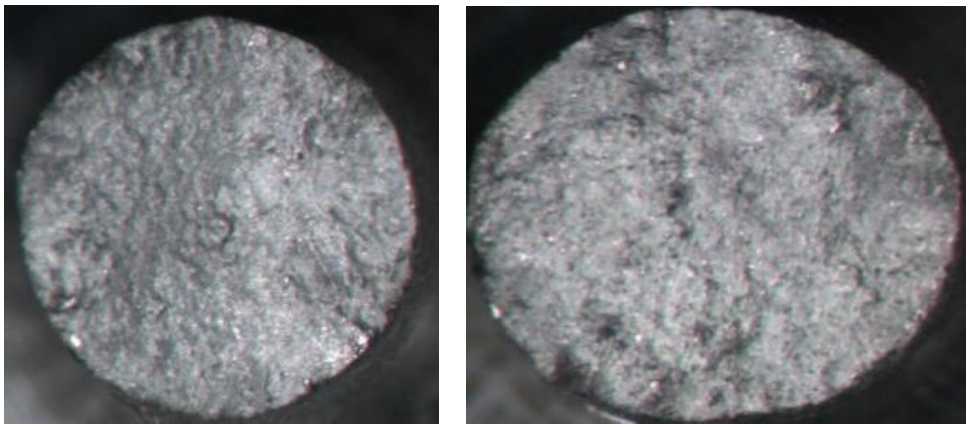
експериментів. Це пояснюється тим , що пересичення твердого розчину модифікаторами , а саме титаном , призводить до зміцнення об'єму зерна , і леговані межі стають у литому сплаві відносно слабшим структурним елементом [85].

Результати випробувань механічних властивостей підтверджують результати металографічних досліджень зломів і отриманих значень коефіцієнтів забрудненості технологічних проб до і після рафінування . Метод технологічної проби дозволить проводити оцінку ефективності обраної технології приготування розплаву: вплив шихтових матеріалів , оцінку стабільності роботи роторної установки дегазації , оцінку технології приготування сплаву та відхилень технологічного процесу. Тому важливо встановити залежність коефіцієнтів забрудненості металу неметалевими включеннями, контрольними значеннями індексу щільності та вмістом водню в розплаві, з метою прогнозування забрудненості розплаву неметалевими включеннями та виключення умов , що призводять до цього. Підтверджуючим прикладом є оцінка ефективності технології -позапічного рафінування , що використовується на ТОВ «КіК» , проведена в процесі багаторазових експериментів , описаних у даній роботі. Механічні властивості деформованих зразків технологічних проб показали істотну різницю до і після дегазації , що свідчить про ефективність рафінування розплаву . Зламки , вирізані в дольовому напрямку з технологічних проб , після випробувань на розрив наведені на малюнках 3.21.

Зразки до дегазації характеризуються наявністю розшарувань, розвинених у процесі деформації. Мікроструктура деформованих зразків до рафінування також характеризується наявністю оксидних плівок (малюнок 3.22, 3.23).



а б



в г

Рисунок 3.21 – Злами зразків , випробуваних на розрив: а , в – до рафінування (в рамках розшарування від оксидної плівки); б , г – після рафінування

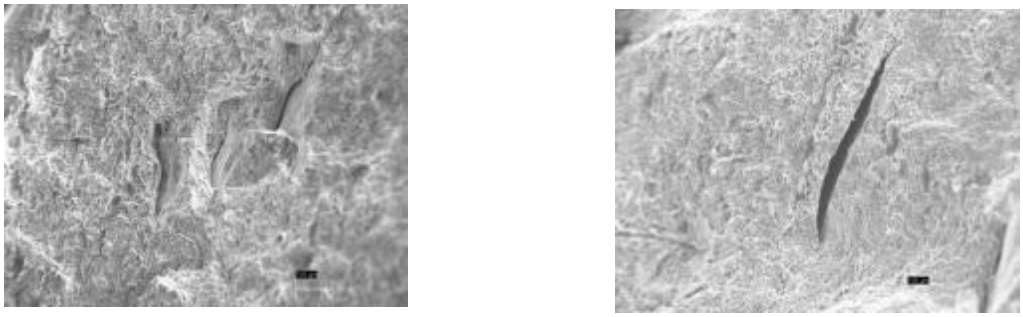


Рисунок 3.22 – Мікроструктура зламів зразків , випробуваних на розрив

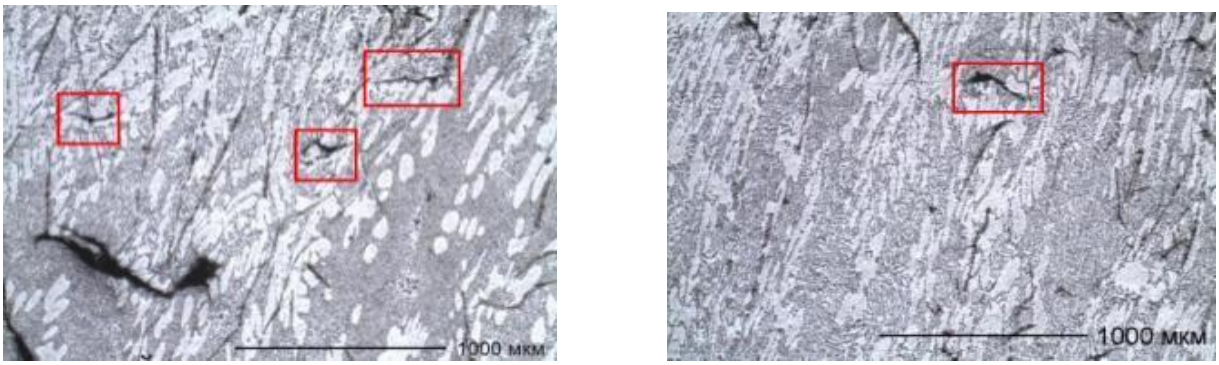


Рисунок 3.23 – Мікроструктура ливарного сплаву АК12 після деформації (ε= 40 %)

Мікрорентгеноспектральний аналіз розривів (малюнок 3.24, таблиця 3.2) виявив присутність кисню на площадках розривів технологічних проб, що підтверджує зародження вогнищ руйнування

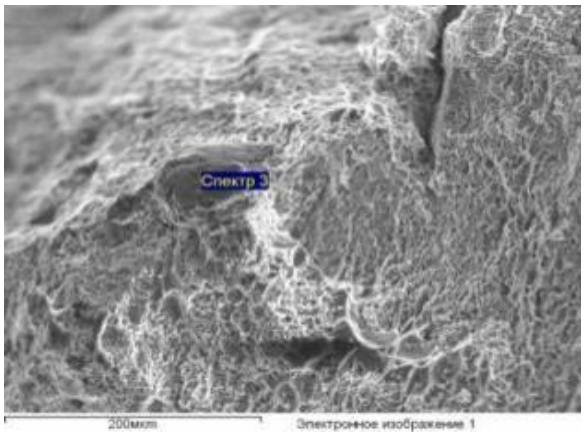


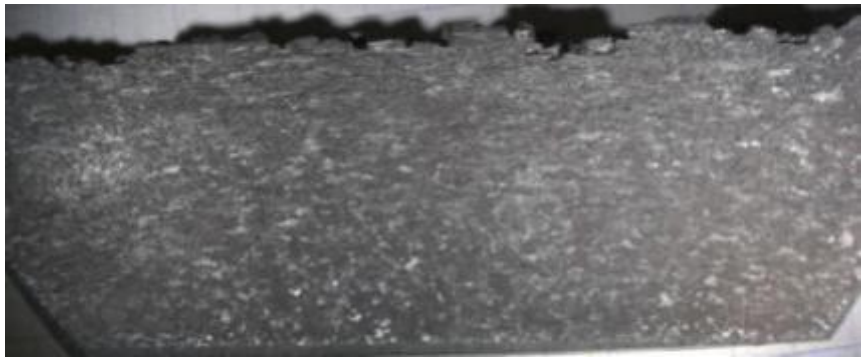
Рисунок 3.24 – Мікроструктура і склад фаз у зломі сплаву АК12, вага. %

Таблиця 3.2 – Елементний склад (див. рис. 3.24)

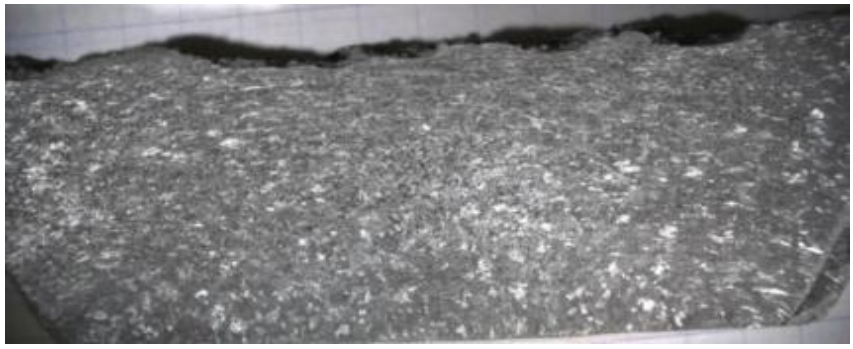
Спектр	Вміст елемента, %				
	O	Na	Al	Si	Ca
Спектр 3	39, 11	0,99	29,55	19,60	10,75

При виконанні осадки заготовок було проведено дослідження впливу гарячої деформації (ε = 40 %) на структуру і міцнісні властивості

сплаву АК12. Після аналізу технологічної проби з вилому було виготовлено макрошліф у частковому напрямку (малюнок 3.25).



а



б

Рисунок 3.25 – Макроструктура технологічної проби після осадження в частковому напрямку, х0,65: а – до дегазації; б – після дегазації

На макрошліфах видно, що максимальний потік металу протікає в центрі заготовки. Випробування на розрив зразків, вирізаних з центральної деформованої зони, підтверджують, що деформація сприяє збільшенню міцності сплаву АК12 (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Механічні властивості модифікованого сплаву АК12, що не пройшов рафінування , після гарячої деформації

Тимчасовий опір розриву, МПа	Умовна межа текучості сті, МПа	Відносне подовження, %
198,75±4,85	116,5±12, 15	16,5±1,23

Відхилення показників механічних властивостей в осаджених злитках пояснюються невеликими лінійними розмірами центральної деформованої зони і можливістю зміщення зразка при його вирізанні. Відхилення відбору зразків від найбільш деформованого перетину і призвело до розкиду значень механічних властивостей . Тобто чим менше деформація, тим менше міцність властивості . Збільшення міцності відбувається за рахунок зміни форми структурних складових , появи текстури деформації (малюнок 3.26).

В процесі гарячої осадки, внаслідок характерного течії металу структура стає орієнтованою; дендрити α - твердого розчину витягуються в напрямку деформації, змінюючи свої поперечні розміри. Помітно і дроблення найбільш крихких складових сплаву – залізистих β-фаз . Це призводить до збільшення механічних властивостей проб. Отримані дані добре узгоджуються з даними роботи [86].

Заключним етапом дослідження було встановлення залежності між вмістом водню в сплаві, ураженістю розплаву оксидними плямами та значеннями індексу щільності. Необхідно було з'ясувати вплив цих показників на механічні властивості сплаву.

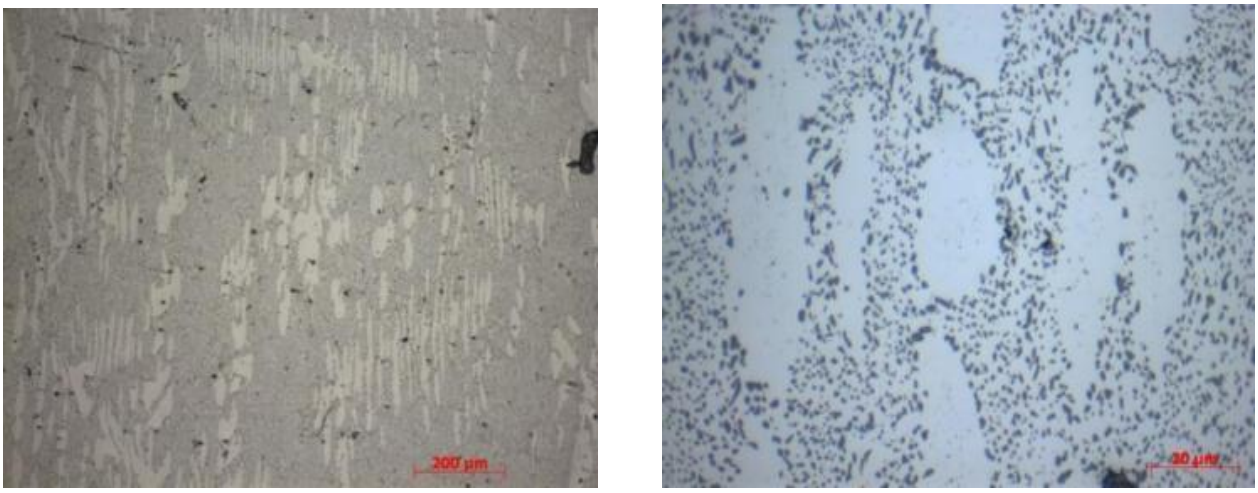


Рисунок 3.26 – Мікроструктура сплаву АК12 після осадження

Як зазначено раніше, умови насичення воднем призводять і до забруднення розплаву оксидними плівками. Адсорбуючи водень, оксидні плівки сприяють виникненню пористості у виливках .

Умови кристалізації розплаву під низьким тиском 80 мбар сприяють переходу розчиненого водню в молекулярний з утворенням газових пор в пробі індексу щільності. Присутність у розплаві суспензій оксидних плівок, у свою чергу, також створює умови для утворення пористості в пробах . При цьому відбувається значне зниження щільності металу проби , закристалізованої під низьким тиском. Щільність металу, закристалізованого в умовах атмосферного тиску, змінюється не істотно. Метод індексу щільності заснований на оцінці різниці щільності проб, закристалізованих під атмосферним і під розрядженим тиском. Чим більша різниця, тим вищі значення індексу щільності , тим вища забрудненість розплаву. Розділити вміст розчиненого і поверхневого водню , утвореного на оксидних плівках, дозволяє метод вакуумної екстракції твердої проби .

Тому значення коефіцієнта ураженості оксидними плівками і показники вмісту водню розчиненого водню, заміряного приладом ALSPEK H mini, є в тій чи іншій мірі незалежними параметрами.

Індекс щільності характеризує якість сплаву за сукупністю цих параметрів.

Підвищення рівня Кд більше 2 % і вмісту водню в розплаві більше 0,25 мл/100 г супроводжується різким збільшенням індексу щільності , а отже і зниженням якості розплаву .

Таким чином, на основі отриманих даних було виконано множинний регресійний аналіз і побудовано математичну модель прогнозування якості розплаву за індексом щільності .

Визначивши залежність між залежною змінною (уі .п – індекс щільності) і незалежними змінними (х1 – коефіцієнт ураженості оксидними плівками , х2 – вміст водню) методом регресійного аналізу була отримана математична модель:

$$y_{и\ .п} = 1{,}72 + 0{,}1 \cdot x_1 + 30{,}764 \cdot x_2 .$$

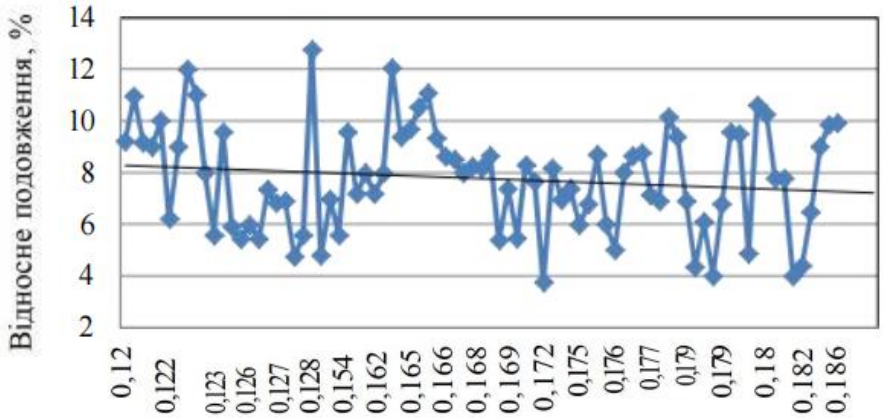
Користуючись цими знаннями за допомогою аналогічних математичних моделей можна оцінювати стабільність встановленої технології приготування сплаву. Ранжувати зміни технології приготування сплаву за значимістю , що призводять до забруднення розплаву оксидними плівками або воднем більшою чи меншою мірою. До змін технології можна віднести: зміни вологості шихтових матеріалів; зміну постачальників; зміну частки «освіження»; порушення технологічних параметрів виконавцями; стабільність роботи обладнання тощо .

3.2. Аналіз впливу вмісту заліза на рівень механічних властивостей виливків коліс

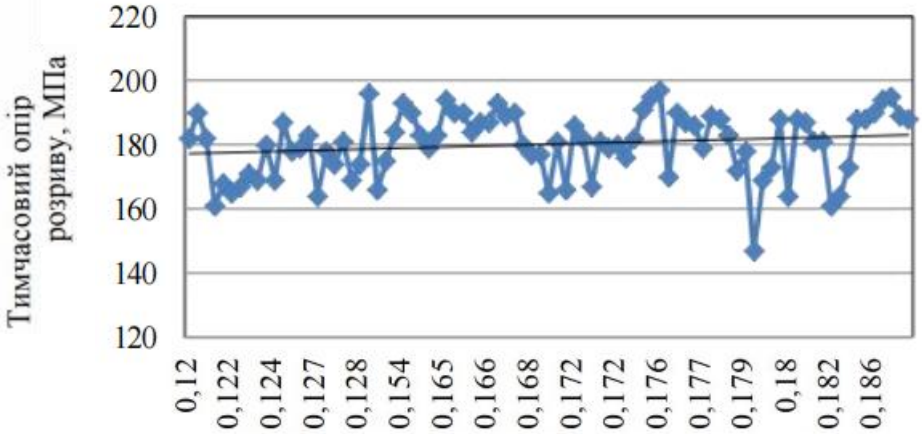
Статичний аналіз проводили за результатами випробувань рівня механічних властивостей виливків за період з грудня 2012 р. по січень 2013 р. з урахуванням зон відбору зразків: спиця , обід і маточина. Обсяг вибірки склав близько 560 зразків. Розрахунковий середній дендритний параметр досліджуваних зон (спиця , обід, маточина) становить , відповідно , мкм: 35, 25 і 40; залежність рівня механічних властивостей виливків від вмісту заліза в сплаві представлена на малюнках 3.29–3.31.

На підставі статистичного аналізу експериментальних даних видно , що в аналізованих сплавах спостерігається розкид значень механічних властивостей , пов'язаний з його ліквідацією по перетину виливки. Підвищення вмісту заліза в сплаві з 0 , 12 до 0 , 186 % призводить до

підвищення тимчасового опору розриву і зниження відносного подовження виливків .

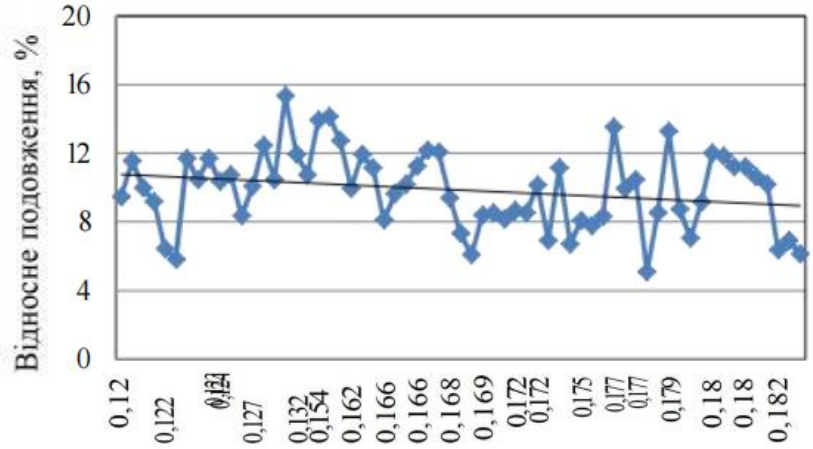


Вміст заліза, %

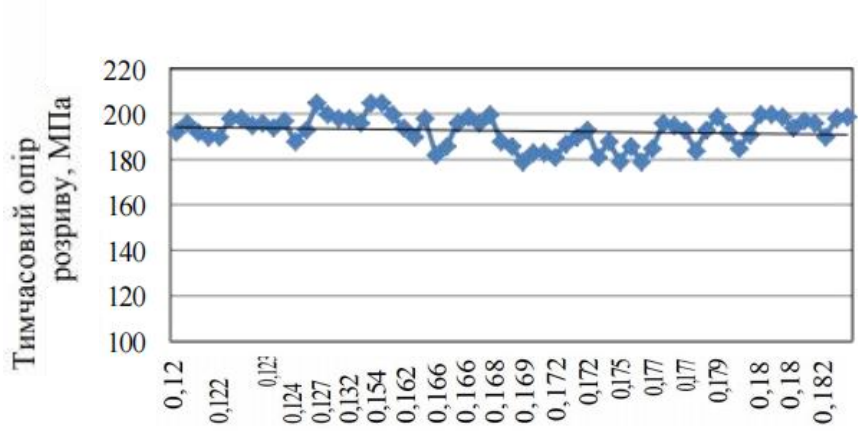


Вміст заліза, % б

Рисунок 3.29 – Відносне подовження (а) і тимчасовий опір розриву (б) в зоні спиці

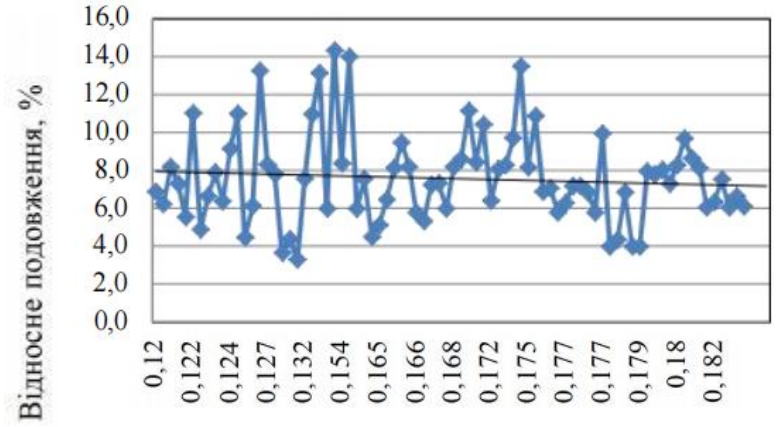


Вміст заліза, %



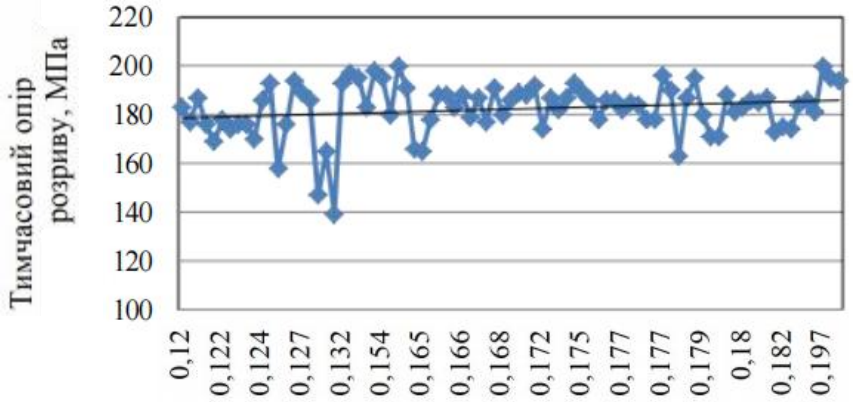
Вміст заліза, % б

Рисунок 3.30 – Відносне подовження (а) і тимчасовий опір розриву (б) в зоні обода



Вміст заліза, %

а



Вміст заліза, %

б

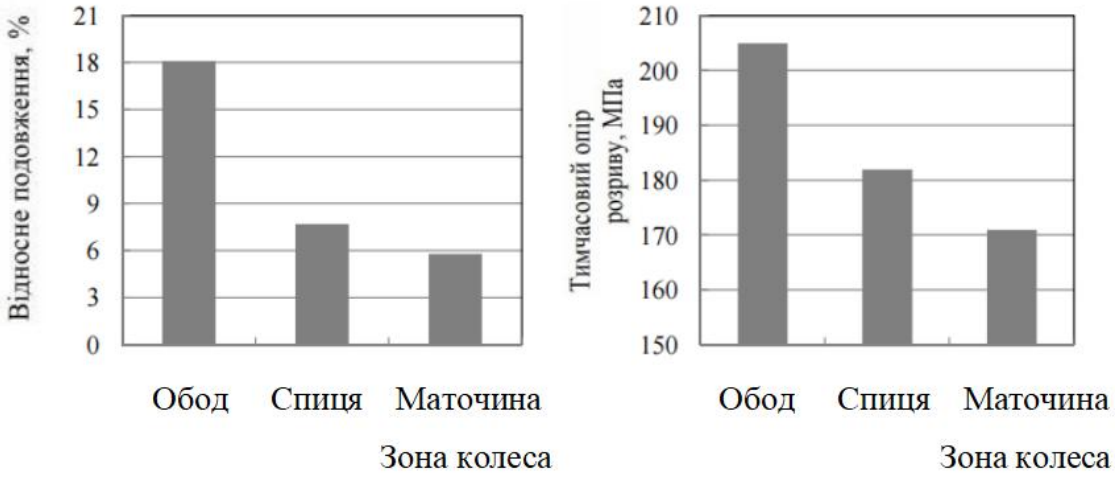
Рисунок 3.31 – Відносне подовження (а) і тимчасовий опір розриву (б) в зоні маточини

3.3. Дослідження зміни властивостей колеса по окремих його зонах

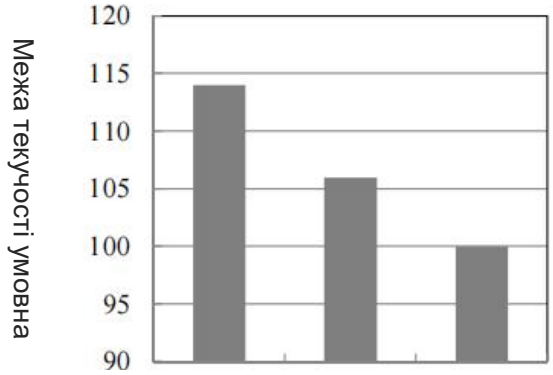
Для досліджень обрано репрезентативне колесо розміром 16 дюймів. Зразки вирізалися з трьох зон: обід , спиця , маточина, кількість зразків – не менше трьох від кожної частини колеса. Механічні властивості таких зразків показані на рисунку 3.34.

З наведених результатів видно , що для зразків , вирізаних із зони обода , характерні максимальні механічні властивості . Це можна пояснити різними швидкостями кристалізації розплаву в трьох зонах автомобільного колеса, пов'язаними з формою автомобільного колеса.

У роботах [28, 87, 88 тощо] зазначено , що швидкість кристалізації можна оцінити за розміром дендритних комірок (малюнок 3.35). Зі збільшенням швидкості кристалізації відбувається зменшення розмірів дендритних комірок α- твердого розчину і евтектичного кремнію , тим самим забезпечуючи збільшення рівня механічних властивостей виливків .



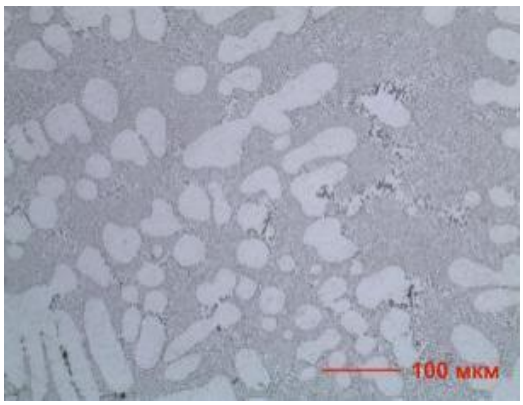
а б



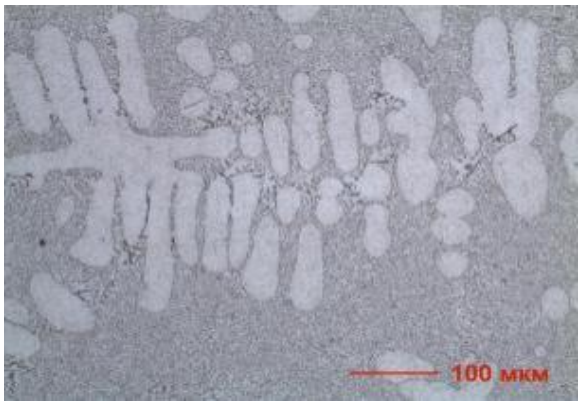
В

Рисунок 3.34 – Механічні властивості зразків , вирізаних з різних зон колеса: а – відносне подовження , б – тимчасовий опір розриву, в – межа плинності умовна

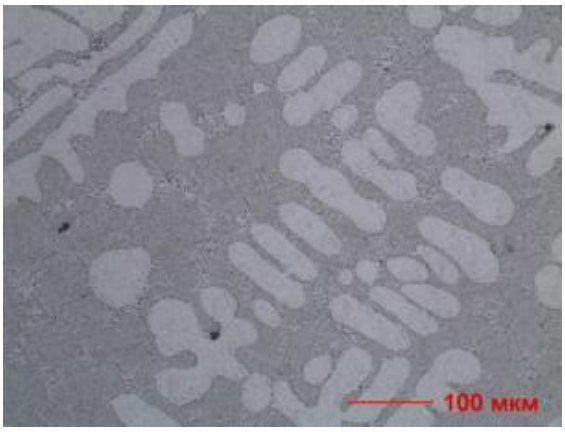
При аналізі структурних складових, а саме розмірів дендритних комірок з використанням номограми «залежність дендритних комірок від швидкості охолодження при кристалізації», можна встановлювати швидкості охолодження [89], що гарантують формування структури, яка забезпечує необхідний рівень механічних властивостей .



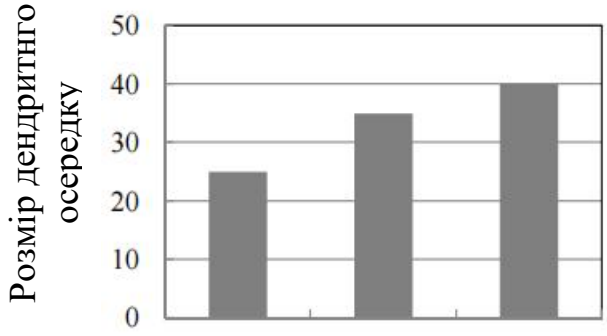
а



б



в



г

Рисунок 3.35 – Мікроструктура зразків , вирізаних з різних зон колеса: а – обід , б – спиця , в – маточина; г – розмір дендритної комірки

Таким чином, умови кристалізації є найважливішими параметрами при виробництві фасонних виливків .

Нерівноважні умови кристалізації сприяють ліквідації. При кристалізації в маточині формується більш груба структура в порівнянні зі спицею і ободом. При цьому відмінність дендритного параметра становить близько 20 мкм. Це призводить до формування грубої структури і більш грубих включень β-фази , за рахунок цього проявляється ефект ліквідації заліза, тобто частина заліза йде на утворення β-фази. Чим грубіша структура , тим більше протікає ліквідація в сплаві .

Таким чином, при подальших дослідженнях зміни структури і властивостей будуть фіксуватися по різних перетинах автомобільного колеса .

3.4. Дослідження властивостей сплаву АК12 при різному співвідношенні Fe :Mn

Критичний вміст заліза в сплаві , як було запропоновано в роботі [90–92], можна розрахувати за формулою:

$Fe_{crit} \approx 0{,}075 . [\%Si] – 0{,}05,$

де [%Si] – вміст кремнію , %.

Тоді , при вмісті кремнію 11 % гранична кількість заліза не повинна перевищувати 0,7–0,8%.

Таким чином, для адаптації алюмінієвого сплаву, приготовленого на алюмінії А7, до умов отримання литих коліс і вимог , що пред'являються до них ГОСТ Р 50511, необхідні всебічні дослідження структури і властивостей останніх .

Приготування розплаву проводили в індукційній печі ІАТ-2,5 на плавильній ділянці ТОВ «КіК» за заводською технологією. Для модифікації сплаву використовували лігатури AlTi5B1 і AlSr 10, чищення розплаву виконали методом позапічного рафінування з використанням установки FDU фірми Fo-seco. Температура лиття становила 700–720 °С .

Дослідження мікроструктури зразків здійснювали на підготовлених мікрошліфах із використанням оптичного мікроскопа OLIMPUS GX51. Спостереження проводили при різних рівнях збільшення, зокрема до 1000-кратного, що дозволило детально вивчити особливості структури матеріалу, характер розподілу фаз та можливі мікродефекти, утворені в процесі наплавлення.

Для визначення оптимальних концентрацій заліза і марганцю в ливарних сплавах системи Al–Si, призначених для лиття автомобільних коліс під низьким тиском , був обраний сплав АК12, що серійно використовується на ТОВ «КіК» .

Встановлення впливу співвідношення заліза до марганцю наструктуру і властивості сплаву проводили на дослідних зразках, хімічний склад яких, визначений спектральним методом , наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Хімічний склад експериментальних сплавів

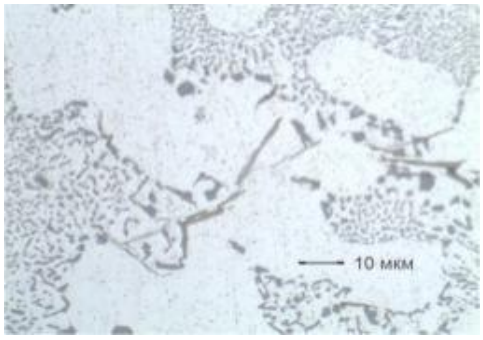
Номер сплаву	Співвідношення Fe :Mn	Вміст елемента , мас .% (алюміній – решта)				
		Si	Fe	Mn	Mg	Sr
1	1 : 0	11,4	0, 15	0,01	0,08	0,003
2	1 : 0,5	11,2	0, 19	0,09	0,06	
3	1 : 1	11,3	0,21	0,20		

Результати досліджень мікроструктури, плинності, механічних властивостей зразків алюмінієвих сплавів системи Al–Si з різним співвідношенням заліза і марганцю наведені на рисунках 3.36–3.38.

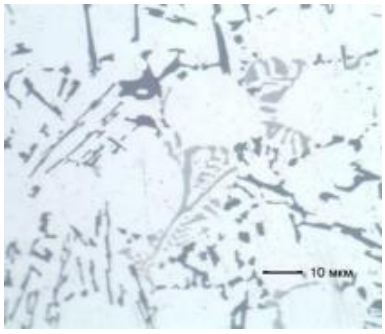
Дослідження мікроструктури показали, що структура сплаву без додаткового легування марганцем складається з модифікованої евтектики і грубих голок β-фази стехіометричного складу Al5FeSi (малюнок 3.36, а).

При співвідношенні Fe : Mn, рівному 1 : 0,5, у структурі спостерігаються мікро - обсяги з грубими включеннями β-фази, а також виявляється присутність Al15 (FeMn)3 Si2 у вигляді китайського ієрогліфа – α-фаза (малюнок 3.36, б).

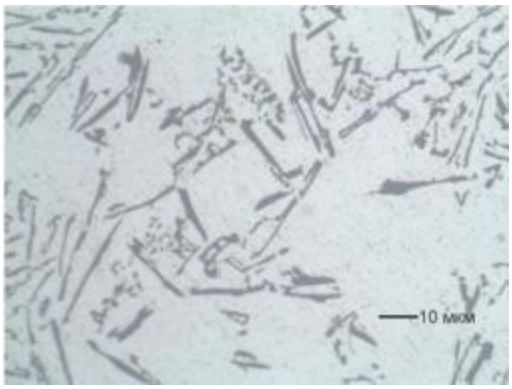
Подальше збільшення вмісту марганцю в сплаві і доведення співвідношення Fe : Mn до 1 : 1 призводить до повного зникнення голчастої модифікації залізистої фази і утворення більш компактної α-фази по всьому перетину шліфу (малюнок 3.36, б).



а



б



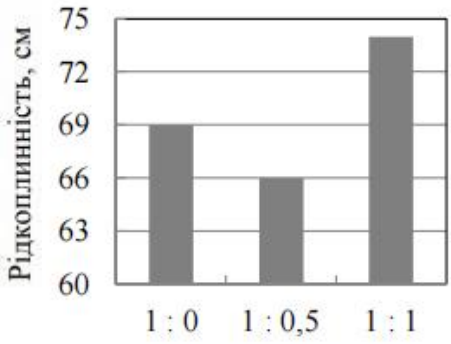
в

Рисунок 3.36 – Мікроструктура алюмінієвого сплаву, отриманого при різному співвідношенні Fe : Mn:а – 1 : 0, б – 1 : 0,5, в – 1 : 1

а

б

в



г

Рисунок 3.37 – Залежність текучості від співвідношення Fe : Mn: а – 1 : 0, б – 1 : 0,5, в – 1 : 1; г – значення текучості

Структура , що отримала назву «китайський шрифт» [89], свідчить про те, що введення елемента-компенсатора в необхідній кількості пригнічує утворення голкоподібної β-фази, в результаті чого збільшується рідкоплинність сплаву.

Для зразків відливань зі сплаву з вмістом Fe:Mn = 1:1 розкид значень механічних властивостей удвічі нижчий , ніж для зразків зі сплаву з вмістом Fe:Mn = 1:0,5. Це пояснюється відсутністю грубих включень немодифікованої β-фази , формуванням більш дисперсної гомогенної структури .Крім цього , 23 % зразків виливків зі сплаву з вмістом Fe : Mn = 1 : 0 ,5 не відповідають вимогам ГОСТ Р 50511 по подовженню , а 3 ,5 % – по тимчасовому опору розриву. Відхилень за механічними властивостями для зразків зі сплаву із співвідношенням Fe : Mn = 1 : 1 не спостерігалося .

Негативного впливу підвищення вмісту заліза в сплаві на результати стендових випробувань за ГОСТ Р 50511 коліс не встановлено. Підвищення міцності та твердості дало позитивний результат при випробуваннях стійкості коліс до удару 13° , виготовлених зі сплаву із співвідношенням Fe : Mn = 1 : 1.

Таким чином, при використанні сплаву з підвищеним вмістом заліза при виробництві коліс литтям під низьким тиском пріоритетним є збереження співвідношення Fe : Mn = 1 : 1. Проведені дослідження показують, що одним із шляхів отримання продукції з підвищеними експлуатаційними властивостями, а саме легкосплавних коліс, при збереженні конкурентоспроможної собівартості , є зміна складу широко застосовуваного силуміна марки АК12.

3.5. Розробка технології лиття легкосплавних коліс зі сплаву АК12 ів з підвищеним вмістом заліза

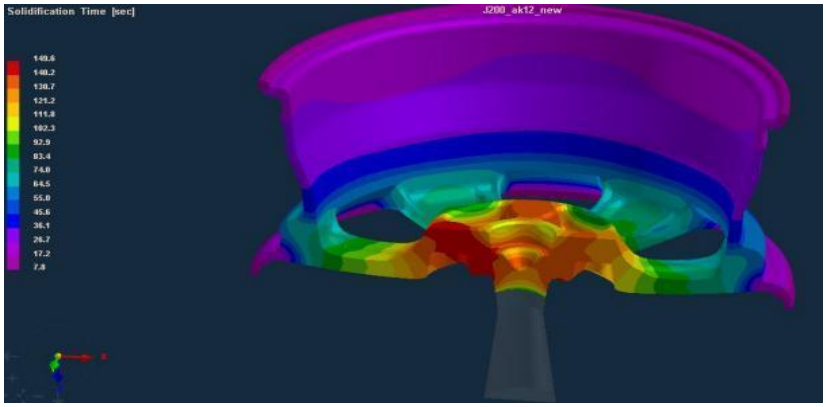
Для виготовлення литих коліс методом лиття під низьким тиском

використовують силуміни, сировиною для яких служать первинні шихтові матеріали: алюміній марок А85 і А8, кремній кристалічний, модифікуючі компоненти тощо .

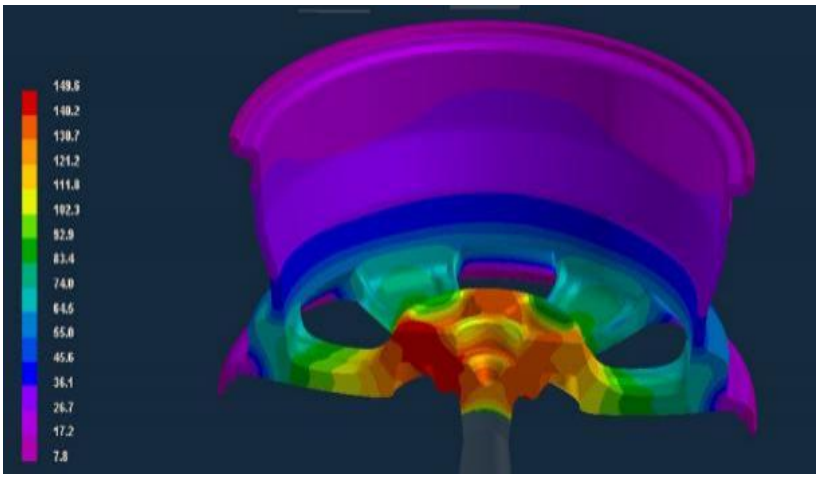
Використання первинного алюмінію марки А7 дозволить зменшити собівартість литих коліс, при цьому знижує їх механічні властивості через утворення включення фази Al–Fe–Si голчастої форми .

Проведені дослідження показали, що одним із шляхів отримання легкоплавких коліс з підвищеними експлуатаційними властивостями при збереженні конкурентоспроможної собівартості є зміна складу застосовуваного силуміну марки АК12 при використанні сплаву з підвищеним вмістом заліза при збереженні співвідношення Fe : Mn = 1 : 1.

Тому для оцінки впливу підвищеного вмісту заліза на якість коліс в системі ProCast було виконано моделювання процесів формування легкосплавних коліс за технологією лиття під низьким тиском при вмісті в сплаві заліза 0, 18; 0,25; 0,5; 1,0 і 1,5 %. Результати моделювання показані на рисунку 3.41, 3.42.

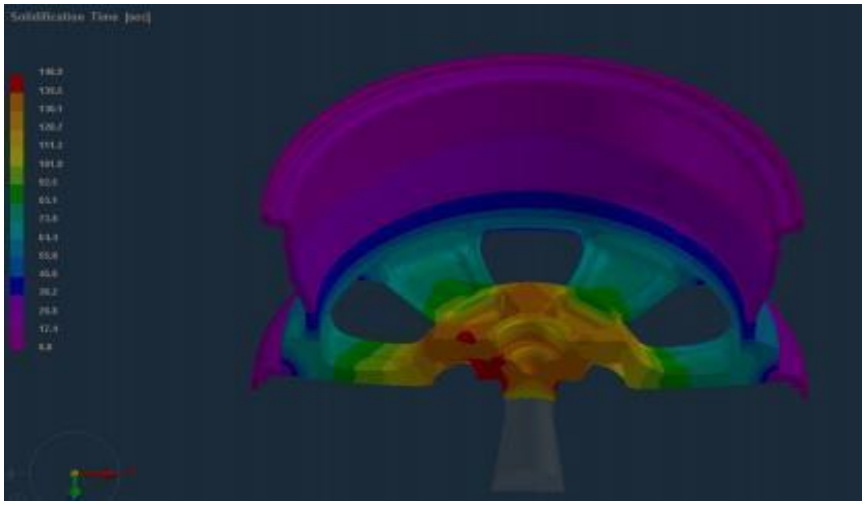


а

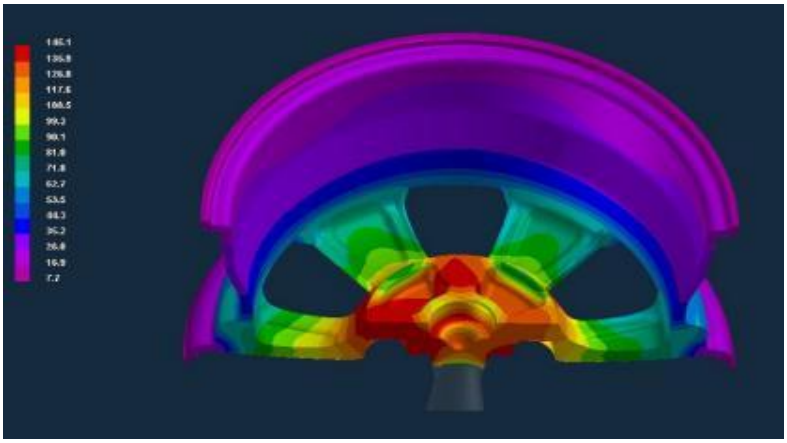


б

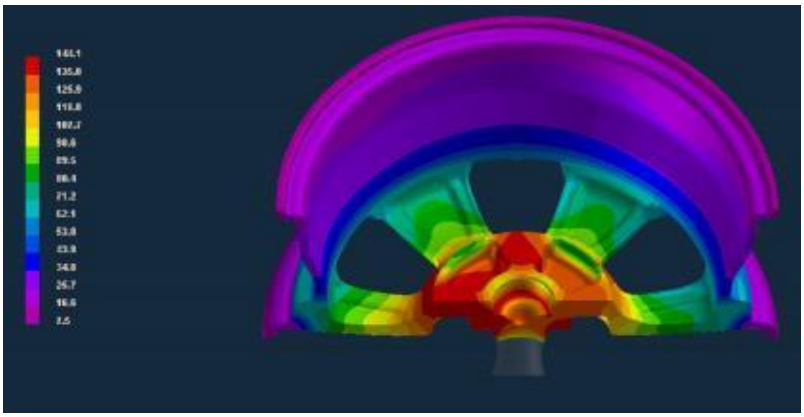
Рисунок 3.41 – Час затвердіння коліс зі сплаву АК12 з різним вмістом заліза , %: а – 0, 18; б – 0,25



а



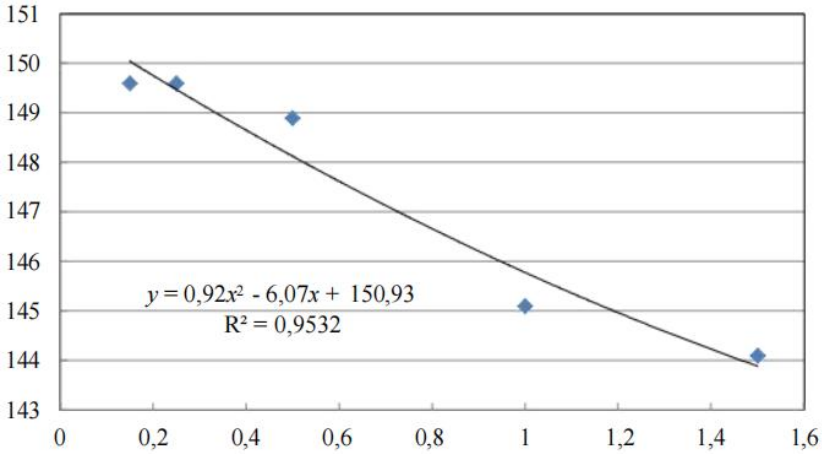
б



в

Рисунок 3.42 – Час затвердіння коліс зі сплаву АК12 з різним вмістом заліза , %: а – 0,5; б – 1,0; в – 1,5

З отриманих результатів можна зробити висновок , що з підвищенням концентрації заліза час затвердіння виливки зменшується (малюнок 3.43).



Вміст заліза, %

Рисунок 3.43 – Вплив вмісту заліза на час затвердіння коліс зі сплаву АК12

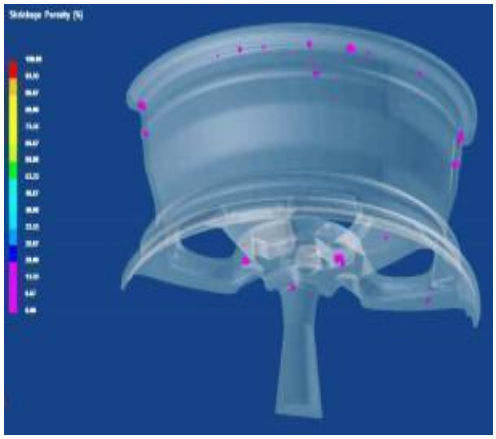
Отже, знаючи розрахунковий час затвердіння виливки, можна максимально економно відрегулювати та налаштувати режими лиття на ливарних машинах, що дозволяє заощадити електроенергію та трудові ресурси .

Вплив вмісту заліза на пористість коліс показано на рисунку 3.44.

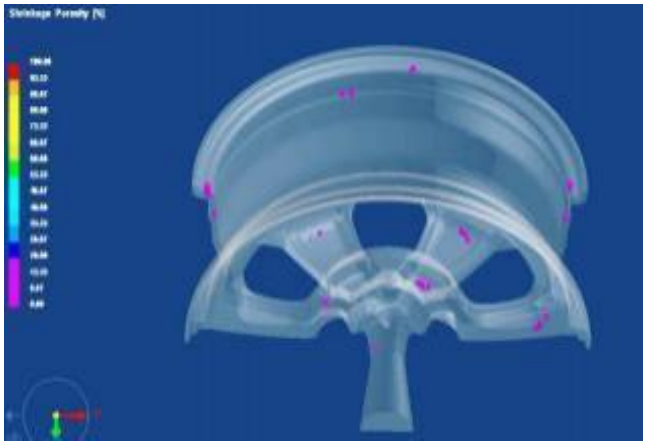
Для коліс із вмістом заліза до 0,25 % характерна зосереджена пористість у зонах внутрішньої закрайби , хампа і спиць. Дана пористість є незначною і некритичною для готового виробу .

Підвищення вмісту заліза до 1,5 % призводить до зростання пористості усадочного характеру. Це пов'язано з утворенням великої голчастої β -фази, яка перешкоджає вільному плину евтектичної рідини в міждріт-ному просторі.

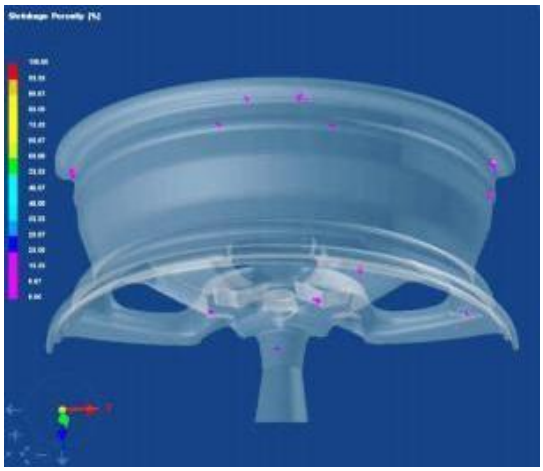
Оцінка отриманого результату моделювання дає можливість визначити максимально допустимий вміст заліза, при якому зберігаються серійні параметри лиття коліс під низьким тиском .



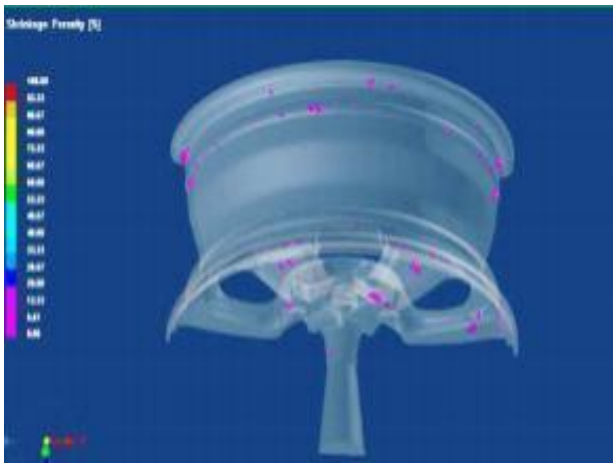
а



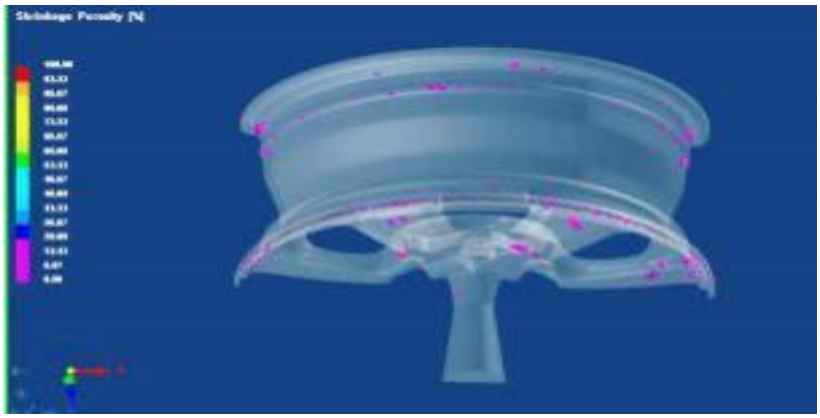
б



в



г



д

Рисунок 3.44 – Зони утворення пористості в автомобільному колесі зі сплаву АК12 з різним вмістом заліза , %: а – 0, 18; б – 0,25; в – 0,5; г – 1,0; д – 1,5

З іншого боку, вимоги до хімічного складу сплаву EN 1706:1998 обмежують вміст марганцю (не більше 0,35 %), максимальний вміст заліза за результатами раніше проведених робіт також не повинен перевищувати 0,35 %.

Тому в даній роботі було досліджено вплив вмісту заліза (до 0,35 %) і марганцю (до 0,30 %) на рідкоплинність , механічні властивості та структуру зразків сплаву АК12.

Приготування розплаву проводили в печі на дослідній ділянці лиття ТОВ «КіК» на основі шихтових матеріалів: первинний алюміній А7, залізо - вмісна лігатура власного виробництва, кремній кристалічний .

Температура лиття 670–690°С. В ході експериментів було приготовлено три плавки, хімічний склад яких наведено в таблиці 3 .6.

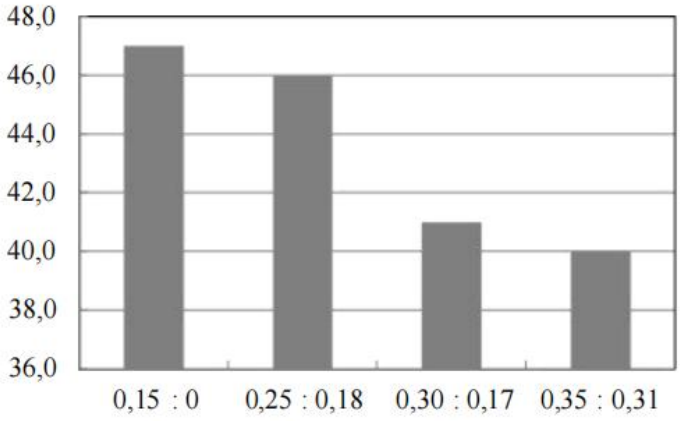
Таблиця 3.6 – Хімічний склад дослідних плавок

Номер сплаву	Вміст елемента, мас. %			
	Si	Fe	Mn	Ti
1	11,20	0,25	0, 18	0,098
2		0,30	0, 17	0,890

3		0,35	0,31	0,082

Результати дослідження рідкоплинності, виміряної за спіральною пробою (ГОСТ 16438-70) сплаву АК12 з різним вмістом заліза наведені на рисунку 3.45.

Зменшення текучості рідини можна пояснити тим , що зі збільшенням вмісту заліза відбувається укрупнення голчастої β -фази, яка перешкоджає вільному плину евтектичної рідини в міждрітковому просторі. Введення марганцю в співвідношенні менше, ніж 1 : 1, не призводить до зміни морфології β -фази у всіх мікрообсягах . Збільшення вмісту заліза за більше 0,25 % спричиняє зміну температури ліквідусу сплаву (таблиця 3.6), що було підтверджено результатами диференційно-термічного аналізу, отриманими на приладі STA 449CUPITER фірми Netzsch (швидкість нагрівання 5/хв, швидкість охолодження 20/хв).



Співвідношення Fe : Mn

Рисунок 3.45 – Рідкоплинність сплаву АК12 з різним вмістом заліза

Таблиця 3.6 – Температура ліквідусу і солідусу сплаву АК12 з різним вмістом заліза

Номер	Співвідноше	Температура,。С

сплаву	ння Fe : Mn	нагрівання			охолодження		
		ліквідусу	солідусу	Δt	ліквідусу	солідуса	Δt
-	0, 15 : 0,00	589,4	575,0	14,4	585,4	578,0	7,4
1	0,25 : 0, 18	581,5	575,5	6,0	576,0	572,8	3,2
2	0,30 : 0, 17	581,3	575,4	5,9	576,5	572,3	4,2
3	0,35 : 0,31	579,8	574,4	5,4	582,0	574, 1	7,9

Отримані результати показали , що для всіх досліджуваних сплавів криві ДТА мають однаковий характер (малюнок 3.46).

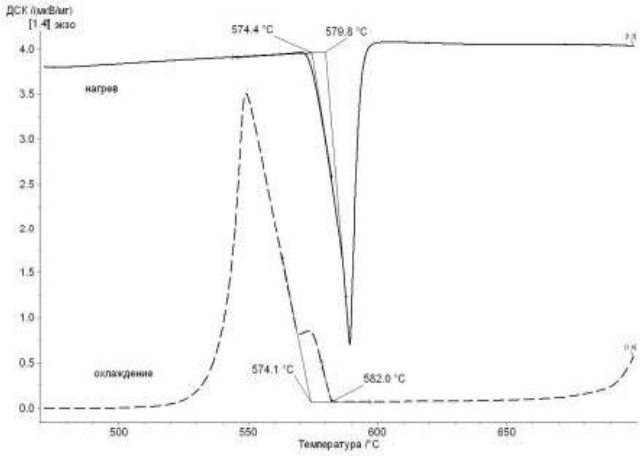
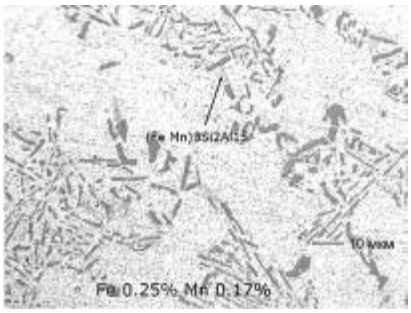


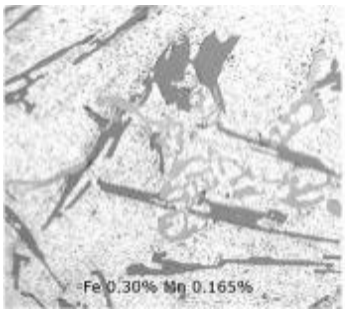
Рисунок 3.46 – Крива ДТА для сплаву АК12, що мі, який містить 0,35 % заліза і 0,31 % марганцю

Зміну температур ліквідусу і солідусу при нагріванні і охолодженні зразків можна пояснити конкуренцією фаз, що випадають, а також зміною кінетичних характеристик процесів .

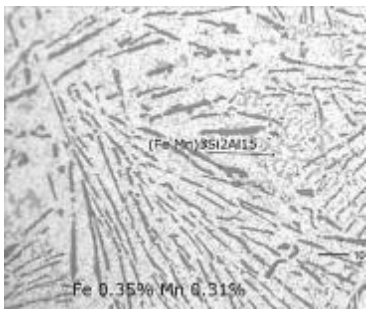
Результати дослідження мікроструктури та механічних властивостей наведені на рисунках 3.47, 3.48.



а



б



в

Рисунок 3.48 – Залежність механічних властивостей алюмінієвого сплаву від співвідношення в його складі Fe : Mn: а – твердість за Брінеллем , б – тимчасовий опір розриву, в – межа текучості умовна , г – відносне подовження

Дослідження показали , що дендритний параметр зразків склав 20 мкм , що передбачає високі швидкості кристалізації сплаву, які є порівнянними зі швидкістю кристалізації окремих зон автомобільного колеса , зокрема , тонких перерізів колеса .

Співвідношення залізо : марганець 1 : 1 забезпечує зміну морфології залізовмісної β-фази з голчастої в скелетоподібну форму, що призводить до збільшення механічних властивостей коліс при литті під низьким тиском . Збільшення або зменшення кількості марганцю в даному співвідношенні (наприклад, сплав № 2) не призводить до утворення скелетоподібної фази в усьому обсязі виливки при її кристалізації .

Зміна міцності та твердості закономірно підвищується при збільшенні вмісту заліза в сплавах № 1 і № 3.

Таким, оцінка отриманих результатів моделювання дає можливість визначити максимально допустимий вміст заліза (0,5 %), при якому зберігаються серійні параметри лиття коліс під низьким тиском. Дослідження параметрів структури та рівня механічних властивостей зразків зі сплаву АК12 показали , що максимальний вміст заліза в сплаві не повинен

перевищувати 0,25 % , при цьому пріоритетним залишається співвідношення залізо : марганець, рівне 1 :1.

Механічні властивості коліс можуть бути додатково підвищені за рахунок додаткової термічної підготовки при фарбуванні. Раніше проведені дослідження на АК7 показали , що після фарбування тимчасове о о опір на на розрив і пластичність [88]. Аналогічні результати були отримані при фарбуванні коліс зі сплаву АК12 (малюнок 3.49).

4. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ МОДИФІКАЦІЇ СПЛАВУ АК12 НА ОСНОВІ ПЕРВИННОГО АЛЮМІНІЮ А7 ДЛЯ ЛИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ КОЛЕС

В останнім часом у ливарному виробництві особлива увага приділяється позапічним методам обробки розплавів для підвищення їх якості. Особливе значення позапічна обробка має для алюмінієвих сплавів, оскільки завдяки проведенню операцій рафінування т а модифікування можна досягти необхідного рівня показників якості та гарантувати експлуатаційну надійність виробів. В даний час немає такого універсального способу позапічної обробки , який дозволяв би здійснити дегазацію розплаву, очистити його від великих і дисперсних неметалевих включень , рівномірно розподілити модифікатор по об'єму розплаву [89].

Вирішення поставленого завдання може бути досягнуто за рахунок застосування позапічної технології рафінування та модифікування, що дозволяє якісно очистити розплав і знизити ефект вигоряння модифікатора зі збереженням його життєздатності в умовах лиття під низьким тиском протягом 2–3 годин .

Найбільш ефективними модифікаторами в сучасній виробничій практиці виготовлення виливків із силумінів є стронцій і титан . Однак при їх використанні виникає ряд проблем:

– висока вартість, оскільки найефективніші модифікатори поставляються зарубіжними фірмами;

– велика витрата модифікаторів , що передбачає наявність складів і чітко налагодженої логістики поставок;

– нетехнологічність при обробці великих мас розплавів , наприклад, у ковші;

– необхідність чіткого контролю за параметрами їх введення (температура введення і час витримки в розплаві) через низьку життєздатність модифікаторів .

Тому з'явилася необхідність розробці модифікаторів вітчизняного виробництва та впровадження їх у технологічний процес виробництва литих виробів .

Найбільш перспективним напрямком є застосування ультрадисперсних модифікаторів, які можуть підвищити якість сплаву при мінімальних витратах. Введення ультрадисперсних модифікаторів у розплави присвяченно ряд робіт [57–61]. Однак , ефективного і технологічного способу, який не призводить до збільшення витрат на виробництво продукції, не досягнуто .

Тому мета даного розділу полягала в дослідженні впливу таблетованого модифікатора на основі ультрадрібнодисперсного карбіду кремнію на структуру і властивості сплаву АК12.

Результати досліджень опубліковані в роботах [89–93].

4.1. Дослідження в у впливу способу введення таблетованого модифікатора фікатора на властивості алюмінієвого сплаву АК12

Мета даного розділу роботи: оцінити вплив способу введення таблетованого модифікатора на основі карбіду кремнію на структуру і механічні властивості сплаву АК12.

Таблетований модифікатор був поставлений фірмою «Красноярський інструментальний центр» (м. Красноярськ). Для введення в розплав з карбіду кремнію фракції до 0, 1 мм і алюмінієвої стружки готували таблетки діаметром 30 мм (малюнок 4. 1).

Рисунок 4. 1 – Зовнішній вигляд таблетованого модифікатора

Таблетований модифікатор вводили наступним чином:

1. «Під струмінь металу» без додаткового перемішування з розрахунку 0,4– 0,6 % модифікатора на 1 т розплаву. Розлив сплаву проводився в чавунні виливниці з температурою 780 °С і з подальшим зниженням до 720 °С . Для досліджень було відібрано по 3 чушки з температурами лиття 780, 750 і 720 °С .

2. На роторній установці протягом 6 хв з розрахунку 0,2–0,3 % модифікатора на 1 т розплаву. Розлив сплаву проводився в чавунні виливниці з температурою 730 °С і з подальшим зниженням до 690 °С .Для досліджень було відібрано по 3 чушки з температурами лиття і маркуванням 730, 710 і 690 °С .

Дослідження можливості введення модифікатора і його засвоєння при приготуванні розплаву в печі ІАТ-2,5 вивчалося в інтервалі від 720 до 780 °С .

Інтервал температур від 690 до 730 °С відповідає температурам лиття під низьким тиском коліс у виробничих умовах .

Експериментальний сплав готували на плавильному дільниці ТОВ «КіК» в печі ІАТ-2,5 з вторинних відходів власного виробництва (стружки , взятої після механічної обробки виливків коліс).

Результати оцінювали дослідженням макро - і мікроструктури,

випробуванням механічних властивостей чушки. Забрудненість розплаву неметалевими включеннями і воднем оцінювали за індексом щільності .

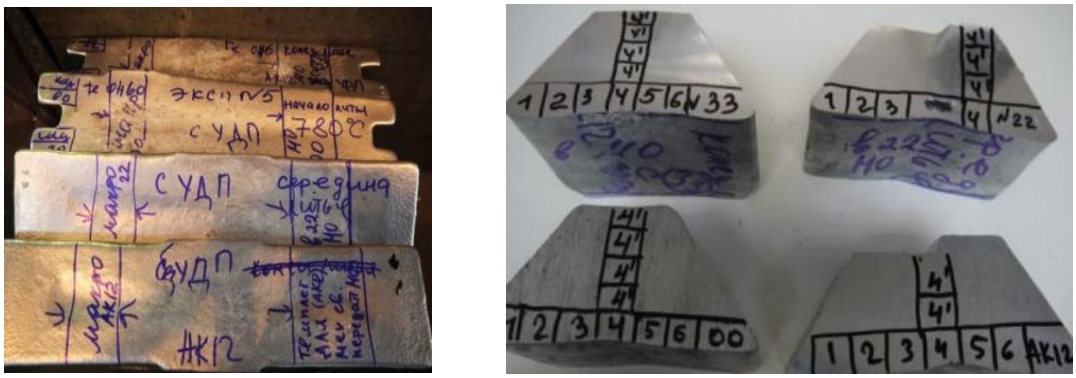
Хімічний склад експериментального сплаву наведено у таблиці 4. 1. Схема розмітки контрольних зразків на макро - і мікроструктуру та для випробувань механічних властивостей показана на рисунку 4.2.

Макроструктура контрольних зразків представлена на рисунку 4.3, мікроструктура – на рисунках 4.4, 4.5, результати випробувань механічних властивостей – на рисунку 4.6.

Металографічними дослідженнями визначено зменшення розміру макрозерна в дослідних чушках в 4 рази, в порівнянні з контрольним сплавом, відсутність пористості , збільшення щільності виливки з 2,59 до 2,66 г/см3.

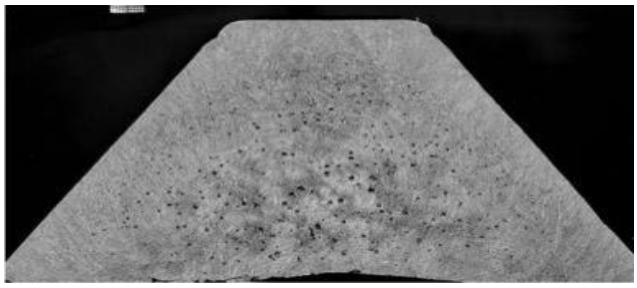
Таблиця 4. 1 – Хімічний склад експериментального сплаву, мас. %

Елемент	Вміст елемента	Елемент	Вміст елемента
Si	11,34	Zn	0,01
Fe	0,56	Ti	0, 13
Cu	0,01	Домішкові елементи	У межах ГОСТ 1583- 93,

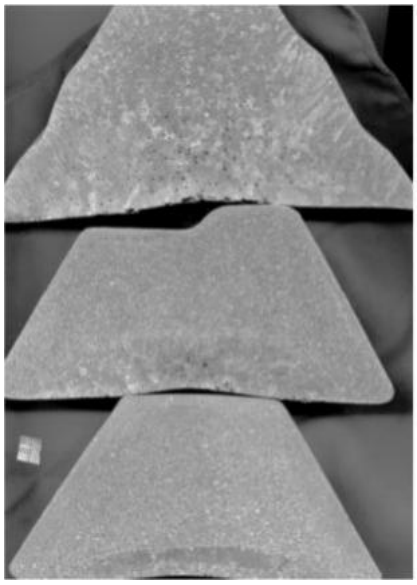


а б

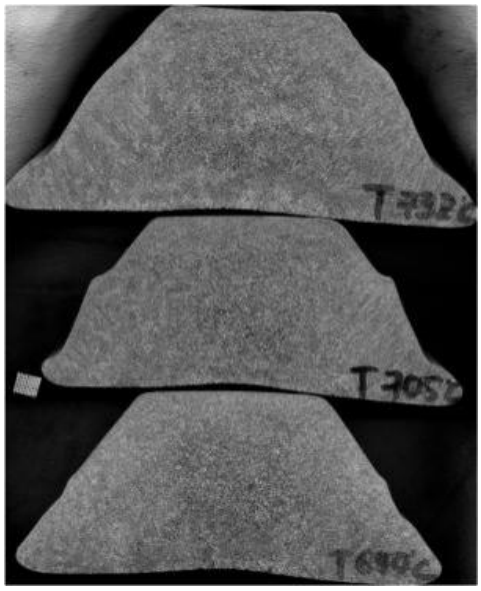
Рисунок 4.2 – Схема розмітки контрольних зразків на макро - і мікроструктуру (а) і механічні властивості (б)



а

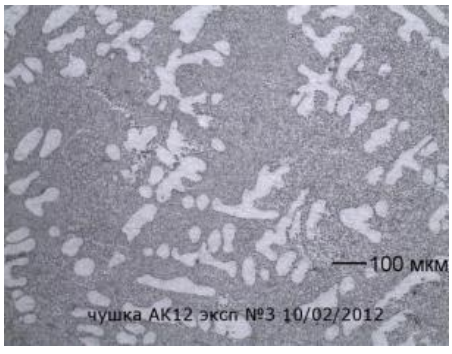


б

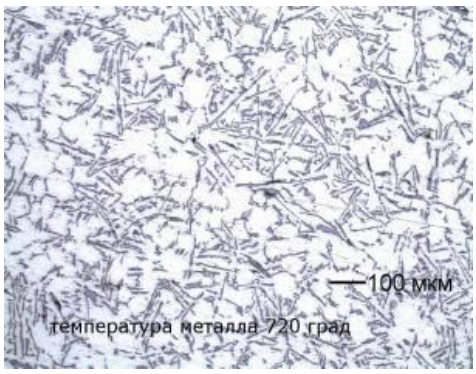


в

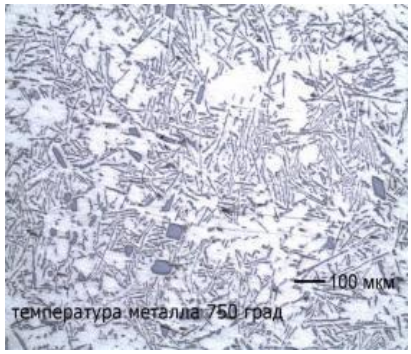
Рисунок 4.3 – Макроструктура злитка зі сплаву АК12: а – немодифікованого; б , в – модифікованого (спосіб введення модифікатора (температура лиття , °С): б – під струмінь металу (знизу вгору: 720, 750, 780); в – роторна установка з подальшим перемішуванням (знизу вгору: 690, 710, 730))

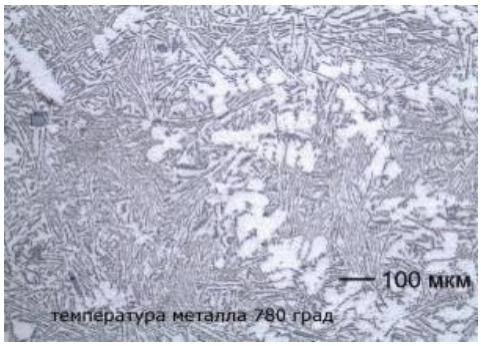


а



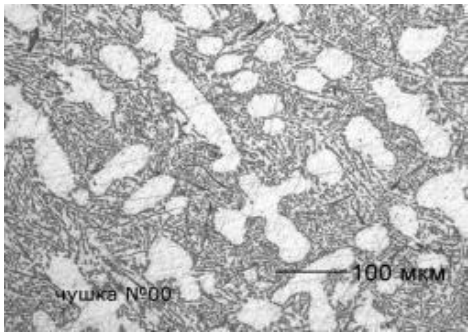
б





в г

Рисунок 4.4 – Мікроструктура зразків силуміну евтектичного складу, від - від УДП і без нього при різних температурах: а – без УДП при температурі лиття 750 °С; б–г – з УДП при температурі лиття 720 (б), 750 (в) і 78 750 °С; 6–г – з УДП при температурі лиття 720 (6), 750 (в) і 780 (г) ºС



а б

Рисунок 4.5 – Мікроструктура чушки: а – без модифікування; 6 – модифі - катор вводили на роторній установці при температурі лиття 710 °С

З представлених графіків видно, що при введенні модифікатора в розплав на роторній установці відзначається незначний розкид значень рівня механічних властивостей сплаву АК12. При введенні модифікатора «під струмінь металу» для сплаву характерна нестабільність показників механічних властивостей (тимчасовий опір розриву, умовна межа плинності і, особливо, відносне подовження).

У роботі [58] цей ефект пояснюють наступним чином. При примусовому

способі руху розплаву, а саме, перемішуванні, на межі алюмінієвого розплаву і твердих частинок карбіду кремнію внаслідок відмінності у швидкостях коливань твердої і рідкої фаз виникають сили в'язкого тертя , які зменшують поверхневий натяг на межі між твердою і рідкою фазами. Виходячи з того, що в полі пружних коливань інтенсифікуються флуктуаційні процеси, що визначають ймовірність переходу металу з рідкої фази в твердий стан, передбачається, що пружні коливання змінюють енергію активації зародкоутворюючих частинок SiC.

В результаті зміни поверхневого натягу і енергії активації зменшується робота утворення зародка і збільшується ймовірність зародження твердої фази , що в свою чергу збільшує швидкість кристалізації. Перемішування рідких модифікованих алюмінієвих сплавів має сильну каталітичну дію на систему «розплав – модифікатор SiC», позитивно впливає на капілярний мікрорельєф поверхні дисперсних частинок карбіду кремнію , перетворюючи їх в активні центри кристалізації .

Представлені дані мікроструктури підтверджуються результатами випробувань механічних властивостей: з збільшенням температури модифікатора спостерігається огрубіння включень евтектичного кремнію, що призводить до зниження рівня механічних властивостей. При високих температурах спостерігається збільшення об'ємної частки евтектики, що свідчить про зниження засвоєння модифікатора розплавом.

З літератури [86] відомо , що модифікатори зміщують евтектичну точку по діаграмі стану Al–Si. Модифікуючий ефект при цьому призводить до збільшення частки α-твердого розчину .

Отримані результати узгоджуються з літературними даними. Так, автори роботи [58] в ході досліджень також не виявили подрібнення евтектики і залізовмісних фаз .

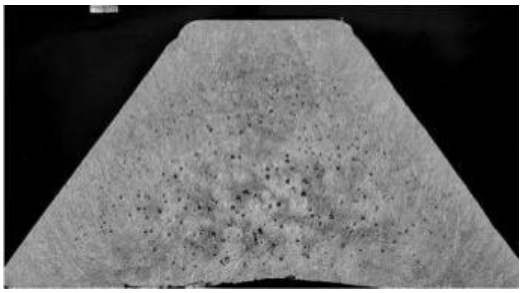
За методикою, описаною в роботі [60], було розраховано кількість додаткових центрів кристалізації , штучно введених в тигель (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Розрахунок кількості додаткових центрів кристалізації

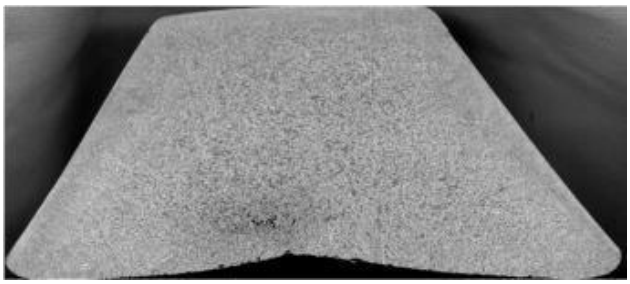
Параметр	Значення
Параметри частинки карбіду кремнію: розмір частинок , мкм щільність , г/см3 маса однієї частинки , г	 0, 1 3,21 1,68·10-15
Вміст карбіду кремнію в таблетках , г	38,4
Кількість частинок карбіду кремнію , шт .: у тиглі в 1 кг виливку	 2·1014 2·1011

Проведений розрахунок вказує, що введення ультрадрібнодисперсного модифікатора на основі карбіду кремнію підвищує кількість центрів кристалізації в 1 кг виливки до 2·1011 шт .

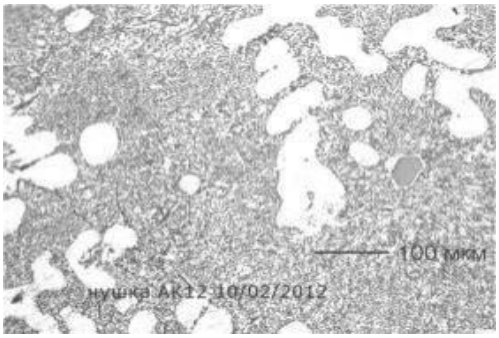
З метою вивчення впливу підвищеного вмісту заліза (до 0,5 %) у сплаві АК12 було досліджено модифікуючий ефект таблетованого модифікатора на основі карбіду кремнію. Розлив сплаву в чушку проводили з температури 780 °С , закінчення розливу – при 690 °С (малюнок 4.7).



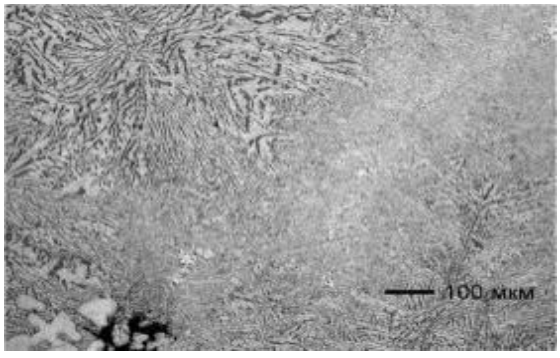
а



б



в



г

Рисунок 4.7 – Макро- (а, б) і мікроструктура (в, г) злитка сплаву АК12 до (а, в)

і після (б, г) модифікування

Мікроструктурними дослідженнями виявлено нерівномірність модифікації структури , пов'язану з розподілом модифікатора в розплаві. Для більш якісного впливу модифікатора на всі мікрообсяги необхідно забезпечити додатковий механічний вплив при його введенні в розплав .

У процесі досліджень за допомогою оптичної мікроскопії встановлено , що при підвищеному вмісті заліза (0,5 %) відбувається зміна морфології залізовмісної β-фази. Це можна пояснити наступним чином. З літератури [99–101] відомо , що карбід кремнію погано змочується алюмінієм. Для того , щоб частинки карбіду кремнію стали центрами кристалізації, необхідно формування на їх поверхні монокристалічного шару з проміжної фази з параметрами решітки , близькими до алюмінію , і забезпечуючої змочуваність частинок розплавом (малюнок 4.8).

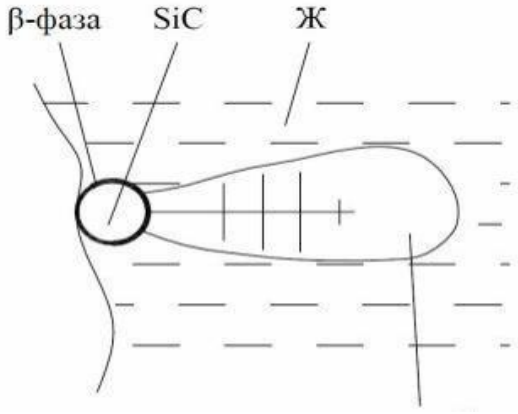


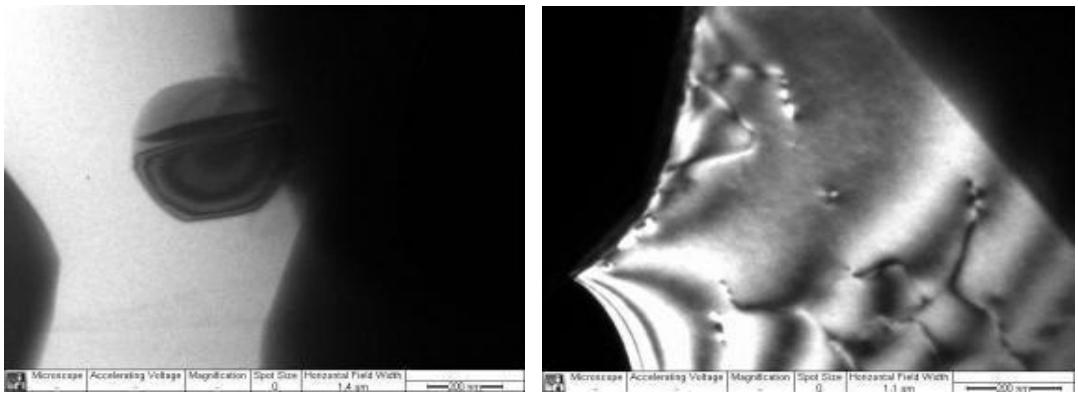
Рисунок 4.8 – Схема роботи SiC як модифікатора

Згідно з роботою [102] при введенні SiC в розплав алюмінію ймовірне проходження реакції з утворенням карбіду алюмінію (Al_4C_3).

Термодинамічні розрахунки в програмі Chemistry показал, що протікання даної реакції в інтервалі температур від 0 до 1000 °C малоймовірне

(малюнок 4.9).

Отже , найбільш можливою перехідною фазою буде залізовмісна фаза , яка, як було показано в роботі [89], є фазою кристалізаційного походження. Для підтвердження механізму модифікації алюмінієвих сплавів ультрадрібнодисперсним карбідом кремнію вивчено зразки фольги методом просвічувальної електронної мікроскопії (ПЕМ).



а б

Рисунок 4.10 – Частинка карбіду кремнію з поверхневим шаром перехідної фази (а) і картина дислокацій у перехідному шарі (б)

Результати, отримані за допомогою ПЕМ, показали, що на поверхні двійників частинок карбіду кремнію формується монокристалічний поверхневий шар, що характеризується наявністю муарової картини (малюнок 4. 10, а).

При більшому збільшенні (малюнок 4. 10, б) на частці модифікатора карбіду кремнію відзначається ефект електронного муару і добре видно недосконалості у вигляді сітки дислокацій .

Аналіз рівня механічних властивостей показав, що введення модифікатора збільшує відносне подовження на 50 %, тимчасовий опір розриву на 20 % чушки в порівнянні з контрольною чушкою (малюнок 4. 11).

Помітне зростання механічних властивостей спостерігається для

сплаву з підвищеним вмістом Fe ≤ 0,5 %. Дослідження мікроструктури зразків показали , що введення карбіду кремнію в сплав призводить до зміни морфології грубих включень β-фази , що і призвело до збільшення відносного подовження і міцності в порівнянні з контрольною чушкою (малю нки 4. 12, 4. 13).

З метою оцінки можливості технології лиття коліс зі сплаву АК12, модифікованого таблетованим модифікатором на основі карбіду кремнію , була відлита дослідна партія коліс в умовах ТОВ «КіК». Хімічний склад коліс наведено в таблиці 4.3.

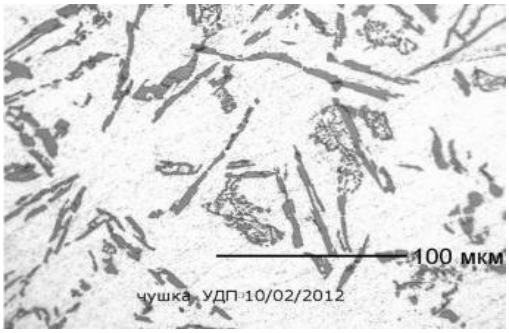


Рисунок 4. 12 – Мікроструктура модифікованого сплаву АК12 із вмістом заліза 0,5 %

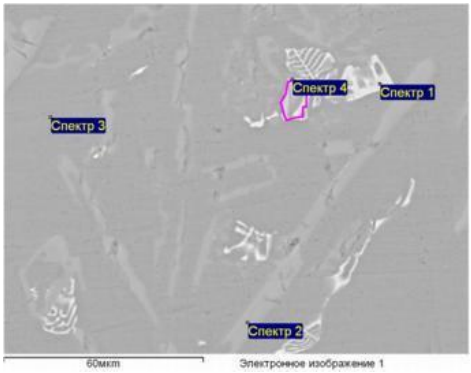


Рисунок 4.13 – Структура включень фаз Al–Fe–Si в сплаві , обробленому модифікатором на основі карбіду кремнію (СЕМ)

Таблиця 4.3 – Хімічний склад дослідного сплаву , мас. %

Елемент	Вміст елемента	Елемент	Вміст елемента
Si	11,4	Sr	0,025
Fe	0, 12	Ti	0, 1
Mg	0,07	Домішкові елементи	У межах ГОСТ 1583-93

Рівень механічних властивостей коліс, відлитих зі сплаву АК12, модифікованого за різними технологіями , наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Рівень механічних властивостей коліс , відлитих зі сплаву АК12, модифікованого за серійною технологією та модифікатором на основі карбіду кремнію

Зона колеса	Властивість		
	Тимчасовий опір розриву, МПа	Умовна межа плинності , МПа	Відносне подовження, %
АК12, модифікований за серійною технологією (модифікатор – стронцій)			
Спиця	181 184 187	90 98 97	8,4 9,5 11,4
Обод	188 188 191	110 108 99	10,0 10,2 10,3
Маточина	183 181 183	94 100 106	7,6 7,2 7,6

Продовження таблиці 4.4

Зона колеса	Властивість		
	Тимчасовий опір розриву, МПа	Умовна межа плинності , МПа	Відносне подовження, %
АК12, модифікований таблетованим модифікатором			
Спиця	176 185 185	141 104 105	6,8 9,5 9,4
Обод	189 194 185	107 150 146	12,0 16,5 10, 1
Маточина	187 184 184	105 104 145	9,6 8,9 8,0

Механічні властивості коліс, відлитих зі сплаву АК12, модифікованого різними способами, мають однаковий рівень . Однак, видно, що для коліс, відлитих зі сплаву з таблетованим модифікатором, характерний розкид значень механічних властивостей зразків , взятих з однієї зони . Це доводить нерівномірність розподілу модифікатора в обсязі розплаву. Варто відзначити поліпшення зовнішнього вигляду виливків після введення модифікатора: поверхня стає гладкою і блискучою .

4.2. Дослідження впливу комплексної обробки розплаву на якість автомобільних коліс

Роботи з введення в експлуатацію установки FDU Mark 10 MTS 1500 були проведені на ТОВ «КіК» з 26.02.2014 по 28.02.2014 р. за підтримки фахівців компанії FOSECO.

Для оцінки ефективності модифікуючої здатності гранульованого флюсу на основі солей калію (KBF4, K2 TiF6 і K2 TiO3) були проведені дослідження на зразках проб , для аналізу яких використовували прилад Thermal- Analyse System TA 110. Для порівняння наведено результати

досліджень модифікуючої здатності пруткової лігатури AlTi5B1. Результати досліджень наведено на рисунку 4. 14 і в таблиці 4 .5.

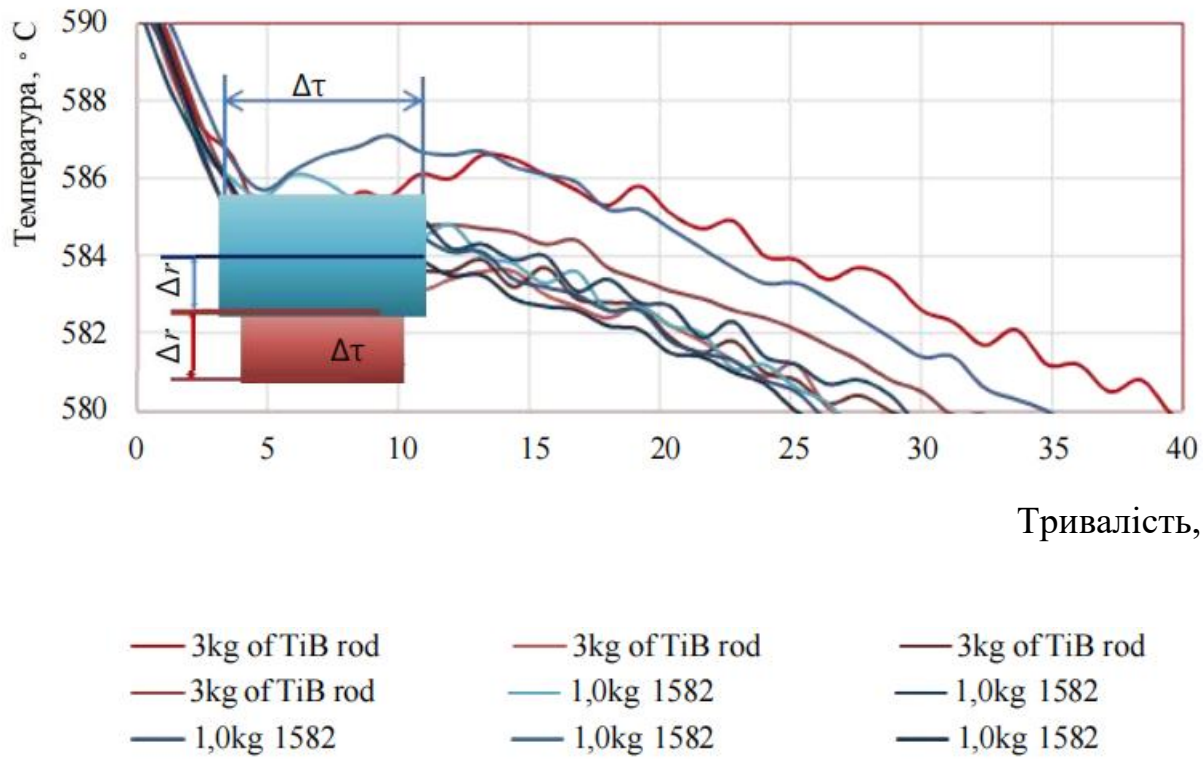


Рисунок 4. 14 – Вплив модифікатора на зміну параметрів ліквідусу АК12

Таблиця 4.5 – Вплив виду модифікатора на зміну параметрів ліквідусу сплаву АК12

Вид модифікатора	Площа ліквідусу (див. рисунок 4. 14)			
	Середнє мінімальне значення температури ,° С	Середнє максимальне значення температури ,° С	Δr, С.	Δτ, с
Пруток AlTi5B1	582,9	584,7	1,8	5,7
Гранульований флюс 1582	584,5	585,2	0,7	2,6

Обробка розплаву гранульованим флюсом дозволяє більш ефективно зменшити розмір зерна в порівнянні з прутковою лігатурою AlTi5B1. Це підтверджується меншою зміною ліквідусу (0,7 в порівнянні з 1,8 °С) і

меншим часом реакції (2,6 в порівнянні з 5,7 с). Нижній прогин графіка і менший час реакції означає, що для початку кристалізації проб, оброблених гранульованим флюсом, а також для отримання в них дрібнозернистої структури необхідно витратити менше енергії .

Мінімальне введення гранульованого флюсу дозволяє не тільки ефективно подрібнювати зерно в пробах, але і рафінувати розплав без додаткової обробки іншими флюсовими препаратами (малюнок 4. 15).

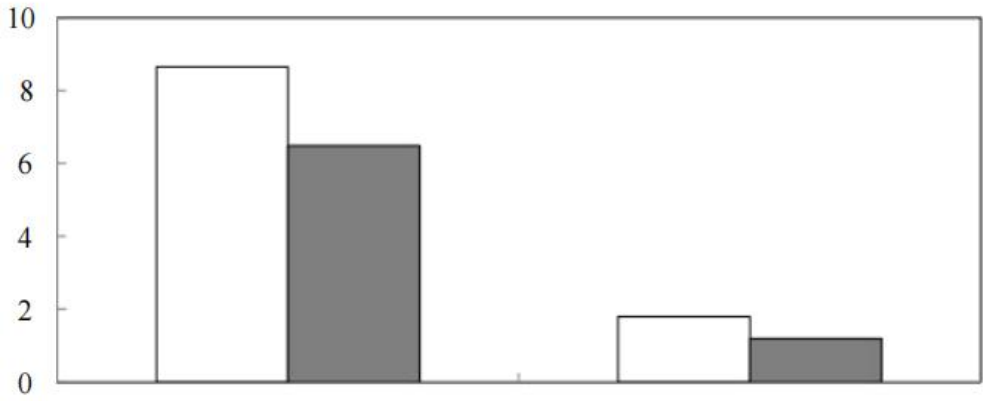
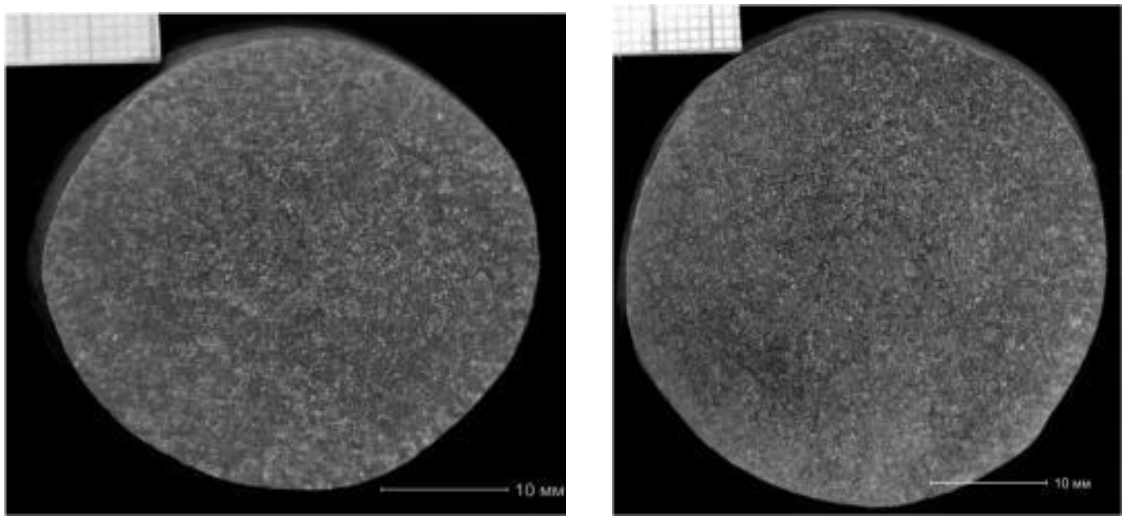


Рисунок 4. 15 – Індекс щільності сплаву АК12, рафінованого за серійною технологією (о) і гранульованим флюсом (а)

Отримані результати підтверджені металографічними дослідженнями . Для цього були відібрані проби на ALCAN-TEST (малюнки 4. 16, 4. 17, табл. 4.6). Середній розмір зерна визначали після травлення зразків у спеціальному реактиві за допомогою програми SIAMS© .Середню кількість зерен на 1 мм(2) оцінювали за ГОСТ 21073. 1-75.



а б

Рисунок 4. 16 – Макроструктура проб ALCAN-TEST в поперечному напрямку після модифікування AlTi5B1 (а) і гранульованим флюсом (б)

а б

Рисунок 4. 17 – Макроструктура проб ALCAN-TEST у частковому напрямку після модифікації AlTi5B1 (а) і гранульованим флюсом (б)

Таблиця 4.6 – Параметри макроструктури зразків сплаву АК12 у поперечному напрямку, модифікованих AlTi5B1 і гранульованим флюсом

Параметри макроструктури	Вид модифікатора	
	Пруток AlTi5B1	Гранульований флюс
У поперечному напрямку		
Довжина зерна , мм: мінімальна максимальна середня	 0,72 1,56 1,08	 0,32 0,97 0,62
Кількість зерен, шт. на 1 мм 2	1	2
У частковому напрямку		
Довжина зерна , мм: мінімальна максимальна середня	 1,02 1,85 1,30	 0,33 0,88 0,71
Кількість зерен, шт. на 1 мм2	1	2

З представлених даних видно , що після обробки розплаву АК12 гра - нульованим флюсом кількість зерен на 1 мм2 становить 2 шт ., що в 2 рази менше , ніж після обробки прутком AlTi5B1. Крім того, при дослідженні проб у частковому напрямку встановлено, що використання гранульованого флюсу знижує розмір усадочної раковини .

Таким у чином, за результатами роботи з'ясовано позитивний вплив гранульованого флюсу для модифікації структури сплаву АК12 і рафінування розплаву від неметалевих включень .

З огляду на отримані рекомендації, було проведено дослідно-промислове освоєння технології модифікації та рафінування розплаву з використанням гранульованого флюсу на основі солей калію .

Для цього була відібрана представницька партія коліс двох моделей 17"Ліберті і 16"Бореллі, модифікованих за серійною технологією прутковою лігатурою AlTi5B1 і гранульованим флюсом.

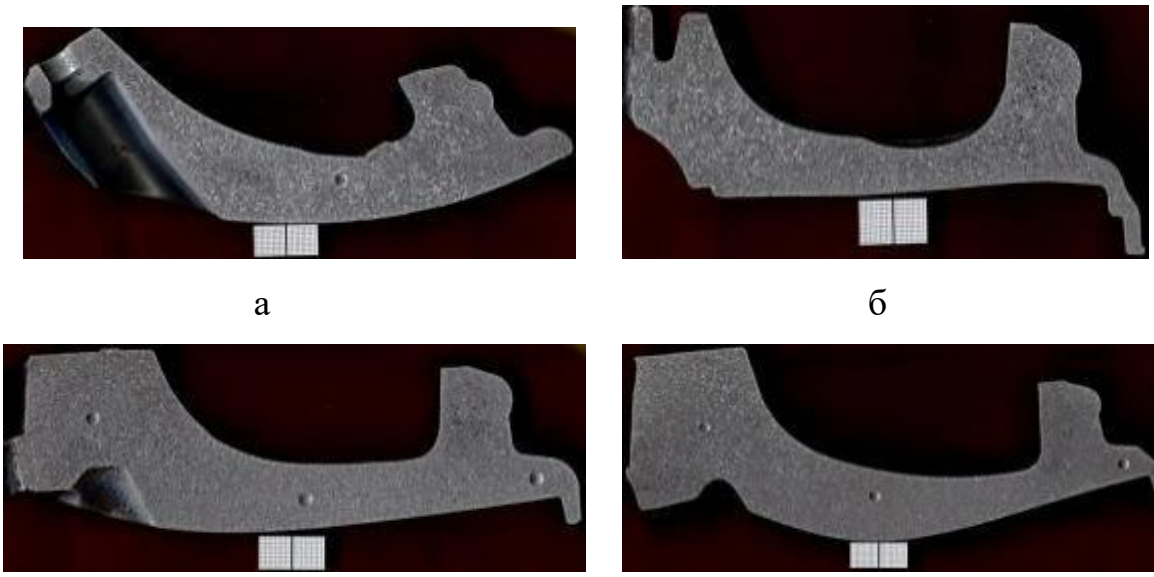
Середній розмір зерна в дослідних колесах оцінювали після травлення зразків в спеціальному реактиві, розрахунок проводили при

допомозі програми SIAMS©. Середню кількість зерен на 1 мм2оцінювали за ГОСТ 21073. 1- 75.

Результати досліджень наведено на рисунках 4. 18–4.20.

а б

Рисунок 4. 18 – Зовнішній вигляд автомобільних коліс 17”Ліберті (а) і 16”Бореллі(б)



а б

в г

Рисунок 4. 19 – Макроструктура коліс, відлитих зі сплаву АК12, модифікованого лігатурою AlTi5B1 за серійною технологією (а, б) і гранульованим флю (в, г) автомобільних коліс 17”Ліберті (а, в) і 16”Бореллі (б, г). Розмір зер на (d), мм: а – 1, 1; б – 1, 14; в – 0,34; г – 0,64

Після обробки розплаву АК12 гранульованим флюсом кількість зерен на 1 мм2 становить 2 шт ., а після обробки розплаву AlTi5B1 – 1.

Зміна рівня механічних властивостей при використанні різних технологій модифікування знаходиться в межах методичної похибки вимірювань , що підтверджується літературними даними [89].

З метою зменшення лінійної усадки в ефективному інтервалі температури тур кристалізації, усунення гарячих тріщин і підвищення виходу придатного при литті запропоновано застосувати технологію обробки розплаву сумішшю аргону з воднем після його обробки гранульованим флюсом на установці роторної дегазації FDU Mark 10 MTS 1500 виробництва FOSECO.

Аналіз статистичних характеристик – Срк (показника відтворюваності процесу, який повинен прагнути до 1,33) і середніх значень у вибірці показав , що відбулося збільшення Срк в середньому в 2 рази, що свідчить про підвищення стабільності процесу приготування розплаву. Це видно з представленого графіка рис. 4 і гістограм нормального розподілу .

Підвищення стабільності приготування сплаву в період промислового освоєння установки рафінування призвело до зниження браку, в середньому, на 2% і його стабілізації . Перевірка лінійного зв'язку між індексом щільності і браком показала високий ступінь зв'язку цих величин з коефіцієнтом кореляції – 0,98. Статистичний аналіз результатів проведено протягом трьох місяців у період освоєння установки , обсяг вибірки за браком склав 90 показників , для індексу щільності – 2000 проб. Аналіз показав , що індекс щільності є значущою характеристикою , що впливає на рівень браку за рентгеном .

У процесі освоєння установки роторної дегазації FDU Mark 10 MTS 1500 виробництва FOSECO встановлено , що використання гранульованого флюсу на основі солей калію дозволяє подрібнювати зерно виливків у 2–4 рази ефективніше порівняно з прутковою лігатурою AlTi5B1, підвищувати

стабільність якості металу за індексом щільності в 2 рази: зміни рівня механічних властивостей коліс при цьому не зафіксовано. Недоліком застосування гранульованого флюсу на основі солей калію є утворення жирного шлаку, що вимагає додаткової його переробки .

ВИСНОВКИ

За результатами виконаної роботи можна зробити наступні висновки:

1. Запропоновано експрес-метод індексу щільності для визначення водню в ливарних алюмінієвих сплавах. Визначено контрольні межі значень індексу щільності, що забезпечують отримання якісних виливків автомобільних коліс методом лиття під низьким тиском з алюмінієвих сплавів. При індексі щільності 8 % ураженість оксидними плівками на макрошліфі становить від 0 ,5 до 1 ,5 % , вміст водню в сплаві – 0 ,2–0,25. Обґрунтовано застосовність методу технологічної проби для контролю оксидних включень у ливарних алюмінієвих сплавах .

3. Визначено , що при литті автомобільних коліс під низьким тиском вміст марганцю в силуміні не повинен перевищувати 0,20–0,25 % при вмісті заліза 0,20–0,25 %. Рівень механічних властивостей автомобільних коліс ,виготовлених методом лиття під низьким тиском з дослідного сплаву, на 25 % за межею плинності умовною , на 15 % за тимчасовим опором на розрив і на 40 % за відносним подовженням вище рівня властивостей коліс ,отриманих за серійною технологією .За результатами досліджень подано заявку на винахід «Ливарний сплав на основі алюмінію» № 2014123014 від 05.06.2014.

4. Встановлено , що технологія модифікування силюміна основі алюмінію А7 таблетованим модифікатором на основі ультрадрібнодисперсного карбіду кремнію призводить до зміни морфології β-фази, що дозволяє підвищити відносне подовження сплаву на 50 %, тимчасовий опір розриву – на 20 % .

5. Розроблено технологію модифікування силуміну на основі алюмінію А7, А7е комплексним гранульованим флюсом на основі солей калію, що поєднує операції рафінування (індекс щільності знижується в 1 ,3–1,5 рази) і

модифікування (розмір макрозерна зменшується до 0 ,7 мм) діями , що дозволяє скорочувати час позапічної обробки розплаву .

6. Розроблений сплав пройшов промислове освоєння при литті коліс під низьким тиском на ТОВ «КіК», що дозволило знизити витрати на їх виробництво за рахунок використання первинного алюмінію марки А7. Економічний ефект при цьому склав 85,54 дол ./1 т придатного лиття .

7. Отримані результати досліджень впроваджені в навчальний процес студентів багаторівневої підготовки за напряму 150400 Металургія, профіль 150400.62.04 Ливарне виробництво чорних і кольорових металів та аспірантів за спеціальністю 05. 16.04 «Ливарне виробництво» .

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Силуміни. [Електронний ресурс] // Вікіпедія. — Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BB%D1%83%D0%BC%D1%96%D0%BD. uk.wikipedia.org

2. Щерецький О. А., Каніболоцький Д. С., Верховлюк А. М., Потрух О. Г. Структура та механічні властивості силуміну АК15, армованого мікророзмірними частинками : наукова стаття. — Київ : Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, 2020. mfint.imp.kiev.ua

3. МАТЕРІАЛИ ДО УРОКУ «Алюмінієві сплави. Силуміни» : [Електронний ресурс] / vseosvita.ua. — Режим доступу: https://vseosvita.ua/library/embed/0100eowy-09f5.docx.html. Всеосвіта

4. СИЛУМІНИ — ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ЗВАРЮВАНОСТІ : [Електронний ресурс]. — Харків : Наукові матеріали, 2021. — Режим доступу: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/... . khadi.kharkov.ua

5. Що таке силумін, які плюси та мінуси? : [Електронний ресурс] / Yorsh.ua. — Режим доступу: https://yorsh.ua/blog/chto-takoe-silumin-kakie-plyusy-i-minusy . YORSH

6. Що таке силумін? : [Електронний ресурс] / Market-Dveri.ua. — Режим доступу: https://market-dveri.ua/uk/chto-takoe-silumin-29. Маркет Двери

7. Силумін – що це таке? : [Електронний ресурс] / Sanitarium.in.ua. — Режим доступу: https://sanitarium.in.ua/ua/a482539-silumin-chto-eto.html. sanitarium.in.ua

8. Алюмінієві сплави : [Електронний ресурс] / Wikipedia. — Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8E%D0%BC%D1%96%D0%BD%D1%96%D1%94%D0%B2%D1%96_%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%B8 . uk.wikipedia.org

9. Alupro.ua – Сплави алюмінію та їх застосування : [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://alupro.ua/faq-ua/splavy-alyuminiyu-ta-yikh-zastosuvannya . alupro.ua

10. Aluminium Casting Alloys : [Електронний ресурс] // Scribd. — Режим доступу: https://www.scribd.com/doc/147376113/Aluminium-Casting-Alloys-EnglishVersion . Scribd

11. Aluminium–silicon alloys : [Електронний ресурс] // Wikipedia. — Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium%E2%80%93silicon_alloys . Вікіпедія

12. Silumin alloy composition and properties : [Електронний ресурс] // Tostpost.com. — Режим доступу: https://tostpost.com/education/1987-silumin-alloy-composition-properties.html. TostPOST

13. What is Silumin? (general alloy overview) : [Електронний ресурс] // Answers.com. — Режим доступу: https://www.answers.com/chemistry/What_is_the_use_of_Silumin Answers

14. Recherche scientifique — hypereutectic silumin properties : [Електронний ресурс] // Scientific.net (abstract). — Режим доступу: https://www.scientific.net/KEM.743.146.

ДОДАТОК