

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

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи бакалавра

на тему: «Вдосконалення методів термічної обробки алюмінієвих сплавів у виробництві автомобільних двигунів»

Шифр КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ

Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Напрямок підготовки (спеціальність): 132 «Матеріалознавство»
Рівень вищої освіти: Перший бакалаврський
Освітньо-професійна програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Виконав: студент 4-го курсу, група МТВА-21-17  Костянтин БУНЕЦЬКИЙ

Керівник *к.т.н., доц. каф ТАМ.*

 Володимир ГОНЧАР

До захисту допускаю:

зав. кафедри ТАМ *д.т.н., проф.*

 Олександр ДИХА

16 06 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність

132 «Матеріалознавство.

Спеціалізація

Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ



Диха О.В.

20 березня 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Булецькому Костянтину

Прізвище, ім'я, по батькові

1. **Тема роботи:** *Вдосконалення методів термічної обробки алюмінієвих сплавів у виробництві автомобільних двигунів*

керівник роботи: Гончар Володимир Антонович, к.т.н., доц. каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 202 2025 р. № 14

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 10.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали переддипломної практики.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

- 1) провести літературний огляд із проблеми;
- 2) виконати детальний теоретичний аналіз матеріалів, що застосовуються при виробництві блоків ДВЗ;
- 3) Провести порівняльний аналіз матеріалів;
- 4) Розробити технологічний процес ТО алюмінієвих сплавів.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання березня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Срок виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	<i>Провести літературний огляд із проблеми</i>	3.05.2024	вс
2	<i>Виконати детальний теоретичний аналіз матеріалів</i>	15.05.2025	вс
3	<i>Провести порівняльний аналіз матеріалів Розробити технологічний процес ТО алюмінієвих сплавів</i>	20.05.2025	вс
4	<i>Оформлення роботи</i>	1.06.2025	вс
5	<i>Захист роботи</i>	18.06.2024	вс

Студент


Підпис

К.Р. Бунецький

Ініціал, прізвище

Керівник роботи


Підпис

В.А. Гончар

Ініціал, прізвище

РЕФЕРАТ

Студент гр. АТ-21-1 Бунецький Костянтин Русланович

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему **«Вдосконалення методів термічної обробки алюмінієвих сплавів у виробництві автомобільних двигунів»** складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 27 найменування, розміщених на 4 сторінках, та одного додатку розміщеного на 10 сторінках. Роботу викладено на 80 сторінках, з них 60 сторінок основного тексту, на яких розміщено 16 рисунків і 9 таблиць.

Актуальність роботи зумовлена постійним зростанням вимог до ефективності, надійності, довговічності та екологічної безпеки автомобільних двигунів, що, у свою чергу, стимулює активний пошук нових інженерних рішень у сфері матеріалознавства та сучасних технологій обробки конструкційних матеріалів. В умовах сучасного автомобілебудування алюмінієві сплави набувають особливої значущості завдяки поєднанню унікальних властивостей — низької густини, високої питомої міцності, добрих антикорозійних характеристик, оброблюваності та технологічності. Ці матеріали стають незамінними у виготовленні широкого спектра деталей двигунів внутрішнього згоряння, що дозволяє суттєво знизити загальну масу транспортного засобу, підвищити його паливну економічність та зменшити викиди шкідливих речовин у довкілля.

Метою даної роботи є визначення найбільш раціонального матеріалу та способу термічної обробки блоків циліндрів ДВЗ.





Завдання роботи:

- 1) провести літературний огляд із проблеми;
- 2) виконати детальний теоретичний аналіз матеріалів, що застосовуються при виробництві блоків ДВЗ;
- 3) Провести порівняльний аналіз матеріалів;
- 4) Розробити технологічний процес ТО алюмінієвих сплавів.

Перелік ключових слів: *алюміній, гартування, двигун, відпал.*

Зміст

ВСТУП	6
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	8
1.1 Матеріали для виготовлення деталей двигунів	9
1.2 Алюміній та його сплави	15
1.3 Термічна обробка і структура сплавів системи Al-Si-Mg	31
2.МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ	44
2.1 Матеріал АК7 (АЛ9)	44
2.3. Мікроскопічний аналіз	46
2.4 Методика випробувань на розтяг	50
3 ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМУ ОБРОБКИ СПЛАВУ АК7 (АЛ9), ПРИ ВИГОТОВЛЕННЯ ГОЛОВКИ БЛОКУ ЦИЛІНДРІВ ДВЗ	54
3.1 Розробка режиму обробки головки циліндрів	54
3.2 Обладнання процесів термічної обробки	58
ВИСНОВКИ	64
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	66
Додатки	70

КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат.
Розроб.		Бунецький		
Перевір.		Гончар		
Реценз.				
Н. Контро.		Бабак		
Затверд.		Диха		
<i>Вдосконалення методів термічної обробки алюмінієвих сплавів у виробництві автомобільних двигунів</i>			Літ.	Арк.
			5	80
ХНУ група МТВА- 21-1				

ВСТУП

Актуальність роботи зумовлена постійним зростанням вимог до ефективності, надійності, довговічності та екологічної безпеки автомобільних двигунів, що, у свою чергу, стимулює активний пошук нових інженерних рішень у сфері матеріалознавства та сучасних технологій обробки конструкційних матеріалів. В умовах сучасного автомобілебудування алюмінієві сплави набувають особливої значущості завдяки поєднанню унікальних властивостей — низької густини, високої питомої міцності, добрих антикорозійних характеристик, оброблюваності та технологічності. Ці матеріали стають незамінними у виготовленні широкого спектра деталей двигунів внутрішнього згорання, що дозволяє суттєво знизити загальну масу транспортного засобу, підвищити його паливну економічність та зменшити викиди шкідливих речовин у довкілля.

Проте, для повноцінного розкриття потенціалу алюмінієвих сплавів, необхідне вдосконалення існуючих методів їх термічної обробки. Традиційні технології термообробки не завжди забезпечують досягнення необхідного рівня комплексних механічних та експлуатаційних властивостей, що суттєво обмежує їх застосування у відповідальних та високонавантажених елементах конструкції автомобільних двигунів [1]. Удосконалення процесів гомогенізації, гартування й штучного старіння дає змогу значно підвищити показники міцності, зносостійкості, термостійкості та опору втомі алюмінієвих сплавів, що безпосередньо сприяє підвищенню загальної надійності та ресурсу двигунів.

Метою даної роботи є дослідження, аналіз і розробка удосконалених режимів термічної обробки алюмінієвих сплавів, зокрема сплаву АК7, для їх подальшого застосування у виробництві деталей автомобільних двигунів.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основна увага в роботі приділяється процесам гомогенізації, гартування та старіння, які забезпечують оптимальну зміну мікроструктури сплаву та покращення його механічних властивостей. Запропоновані режими термообробки орієнтовані на підвищення межі міцності литих алюмінієвих сплавів на 10–12% порівняно з традиційними методами, а також на досягнення високого рівня відносного видовження, що повністю відповідає сучасним вимогам до конструкцій головок циліндрів двигунів автомобілів. Результати, отримані в межах цієї роботи, можуть бути ефективно використані для оптимізації виробничих процесів, а також для підвищення якості та конкурентоспроможності продукції на ринку автомобільних компонентів.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Деталі двигунів внутрішнього згоряння функціонують в умовах надзвичайно складного і багатофакторного навантаження, що вимагає від матеріалів, з яких вони виготовлені, високих механічних, термостійких та хімічно стабільних властивостей. Передусім, ці деталі зазнають інтенсивних термічних навантажень, які виникають у результаті дії високих температур, що утворюються під час згоряння паливно-повітряної суміші у камері згоряння. Температурні пікові значення можуть досягати кількох сотень градусів Цельсія, що створює додаткові вимоги до термостабільності та термостійкості матеріалів.

Крім цього, деталі двигуна піддаються постійному впливу складних механічних навантажень, серед яких слід відзначити циклічні навантаження, що виникають внаслідок дії високого тиску газів, інерційних сил рухомих компонентів, а також вібраційних коливань у процесі роботи. Сукупність цих факторів може спричинити втому матеріалу, що проявляється у формі мікротріщин, які з часом можуть перерости в значні пошкодження або призвести до повного виходу елемента з ладу.

Додатково, деталі двигунів внутрішнього згоряння піддаються впливу агресивних робочих середовищ — охолоджуючих рідин, мастильних матеріалів та продуктів згоряння, які можуть спричинити корозійне або хімічне зношування. У зв'язку з цим, висока корозійна стійкість є критично важливою характеристикою, що безпосередньо впливає на довговічність і надійність роботи компонентів [1, 2].

Окрему увагу слід звернути й на те, що деталі двигуна працюють при високих швидкостях обертання та частотах циклів, що формує суттєві динамічні навантаження. Це вимагає від конструкційного матеріалу

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виняткової зносостійкості, яка дозволяє забезпечити тривалий термін експлуатації без потреби у частому технічному обслуговуванні або заміні деталей.

Отже, матеріали, що застосовуються для виготовлення деталей двигунів внутрішнього згорання, повинні володіти комплексом властивостей: високою міцністю, термостійкістю, корозійною стійкістю, а також зносостійкістю. Саме такий набір властивостей дозволяє їм успішно функціонувати в умовах інтенсивної експлуатації і забезпечувати стабільну, надійну та тривалу роботу двигунів. До таких перспективних матеріалів, зокрема, належать алюмінієві сплави, що все ширше застосовуються в сучасному двигунобудуванні.

1.1 Матеріали для виготовлення деталей двигунів

Під час експлуатації автомобілів робочі поверхні більшості їхніх деталей постійно піддаються зношенню під впливом сил тертя, корозійних процесів, а також ряду інших зовнішніх і внутрішніх чинників. Крім того, велика кількість конструктивних елементів автомобіля зазнає значних динамічних навантажень, які виникають унаслідок згорання паливної суміші в камері згорання циліндрів двигуна, дії інерційних сил, порушення співвісності між сполученими агрегатами, механізмами й деталями, а також впливу частотних коливань, вібраційних процесів і деяких інших несприятливих факторів.

Спряжені робочі поверхні автомобільних деталей схильні до дії різних типів механічного та корозійно-механічного зношення. Серед них особливо поширені:

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- абразивне та газоабразивне зношення (клапани, гільзи циліндрів тощо);
- втомне зношення (робочі поверхні зубчастих вінців шестерень, підшипників кочення та інші);
- окислювальне зношення (поршні, головки циліндрів, поршневі кільця тощо);
- фретингкорозія (наприклад, у місцях контакту ресорних листів);
- комбіноване зношення, яке поєднує вплив одразу кількох механізмів руйнування (найчастіше спостерігається у гільзах циліндрів, клапанах, поршневих групах тощо).

Протягом багатьох десятиліть основними матеріалами для виготовлення двигунів залишалися найпоширеніші метали та їх сплави — зокрема, сталь, чавун, мідь, бронза та алюміній. Пластмаси й полімерні матеріали використовувалися обмежено, головним чином для незначних вузлів. Деякі дрібні компоненти, такі як корпуси карбюраторів, іноді виготовляли з магнієвих сплавів. Однак з розвитком сучасних технологій і загальною тенденцією до полегшення конструкцій, підвищення питомої потужності двигунів та покращення екологічних показників, матеріалознавчий склад елементів двигуна за останні десятиліття суттєво змінився [3].

Основне завдання сучасного автомобілебудування полягає в досягненні підвищеної потужності двигуна при одночасному зменшенні його геометричного об'єму та загальної маси. Секрет такого поєднання криється не лише у впровадженні новітніх конструктивних рішень, але й у широкому застосуванні нових, легких, але міцних матеріалів, що забезпечують кращу ефективність. Цього також вдається досягти завдяки глибокому опрацюванню кожного елементу силового агрегату, оптимізації конструкції, а також

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поступовій відмові від надмірних запасів міцності, які раніше закладалися на етапі проєктування.

У серійних автомобільних двигунах найдорожчими та найскладнішими з технологічного погляду матеріалами залишаються кремній-нікелеві покриття, металокерамічні композити (зокрема ті, що відомі під позначенням FRM у компанії Honda), різні полімерно-вуглецеві композиційні матеріали, а також поступово впроваджувані в серійне виробництво титані сплави. Крім того, активно застосовуються сплави з високим вмістом нікелю, серед яких особливо варто відзначити Inconel — високотемпературний матеріал із чудовими антикорозійними та термостійкими властивостями.

Попри наявність таких інновацій, двигунобудування залишається однією з найконсервативніших галузей сучасного машинобудування, де радикальні або ризиковані інженерні експерименти в умовах серійного виробництва зазвичай не схвалюються [4–6].

Основним завданням при вдосконаленні чавунних сплавів для використання в двигунах є збереження високої твердості поверхневих шарів при одночасному покращенні допоміжних механічних та експлуатаційних характеристик. У разі нездатності досягти необхідного рівня зносостійкості іноді доводиться застосовувати вставні чавунні гільзи в блоках циліндрів, виготовлених з більш зносостійкого сплаву. Така технологія зазвичай використовується у виробництві вантажних дизельних двигунів, де її застосування є економічно доцільним і фінансово виправданим.

Алюміній як конструкційний матеріал для виготовлення блоків циліндрів використовується вже досить давно, і напрямок його вдосконалення залишається стабільним. Основні зусилля спрямовані на покращення технологічності обробки, зменшення коефіцієнта теплового розширення при збереженні достатньої пластичності, а також підвищення міцнісних

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристик алюмінієвих сплавів, які відповідають умовам роботи двигунів [4–7].

Окрім того, активно розвиваються сучасні технології використання вторинного алюмінію низького ступеня очищення. Для таких сплавів застосовуються альтернативні технології формоутворення, відмінні від традиційного лиття, що дозволяє зменшити енергозатрати та вартість. Зростає тенденція до використання алюмінієвих блоків циліндрів у більш компактних і легких силових агрегатах. Наприклад, сучасний двигун серії EA211 від компанії Volkswagen має блок циліндрів із алюмінієвого сплаву, який виявився на 40% легшим за аналогічний блок із чавуну, при цьому забезпечуючи належну міцність і тепловідвід.

Магнієві сплави у двигунобудуванні залишаються значно менш популярними порівняно з алюмінієвими. Хоча вони ще легші за алюміній, їхня практична придатність обмежена через суттєво нижчу корозійну стійкість. Вони не витримують тривалого контакту з гарячими охолоджувальними рідинами, а також із сталевими кріпильними елементами, що працюють при підвищених температурах. Наприклад, у конструкції рядних шестициліндрових двигунів BMW серій N52 і N53 магнієвий сплав використовується виключно для зовнішньої частини блоку, зокрема для так званої «сорочки» системи охолодження. Це дозволяє досягти зниження маси приблизно на 10 кг у порівнянні з цільною алюмінієвою конструкцією того ж типорозміру, що є значною перевагою для подовженого блоку шестициліндрового двигуна.

Магнієві сплави також знаходять обмежене застосування в конструкціях блок-картерів двигунів зі знімними циліндрами, особливо в мотоциклетних двигунах, де критичними є компактність і мінімальна вага [6, 7].

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У зв'язку з досить вдалим поєднанням високої технологічності обробки, відносної простоти виготовлення, а також цілого комплексу позитивних експлуатаційних характеристик, варто приділити особливу увагу алюмінієвим сплавам як перспективному матеріалу для виготовлення різноманітних деталей двигунів внутрішнього згоряння. На рис. 1.1 наведено приклад блоку циліндрів, виготовленого з алюмінієвого сплаву, що демонструє практичне застосування цього матеріалу в сучасному двигунобудуванні.



Рис. 1.1 Блок циліндрів виготовлений з алюмінієвого сплаву

У деяких випадках силовий агрегат двигуна може бути повністю виготовлений із силумінів — спеціальних литих алюмінієвих сплавів. Такі двигуни мають високу собівартість, однак вони відзначаються значно меншою масою при збереженні або навіть підвищенні потужності. Подібні силові установки використовуються в гібридних автомобілях, а також у високотехнологічних спортивних розробках, зокрема в болідах Формули-1 (F1), де кожен грам ваги має критичне значення.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У звичайних автомобільних двигунах алюміній може використовуватися в низці конструктивних елементів, таких як: гільзи вставного або залитого типу, шпильки для запобігання зриву різьби, кришки підшипників, поршні, кришки блоків, корпуси та інші елементи двигуна. Таким чином, алюмінієві сплави є універсальним і технічно доцільним вибором для широкого спектра застосувань у сучасному моторобудуванні.

Масове застосування алюмінієвих двигунів розпочалося саме в гоночних автомобілях, де вирішальне значення мали зниження маси та підвищення динамічних характеристик. Саме тому й сьогодні основне застосування таких моторів зосереджене переважно у спортивних і високопродуктивних автомобілях. Алюміній — м'який, легкий та відносно добре оброблюваний матеріал, який дозволяє суттєво зменшити не лише масу, а й габарити двигуна без втрати міцності та функціональності.

Двигуни, виготовлені з алюмінієво-кремнієвих сплавів, серійно виробляли такі відомі компанії, як BMW, Audi, Porsche, Mercedes-Benz, а також Chevrolet. Подібні силові агрегати часто покривалися нікелевим антикорозійним покриттям, яке не лише підвищувало зносостійкість, але й дозволяло значно збільшити загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна — у деяких випадках у кілька разів, залежно від умов експлуатації та типу паливної системи [7].

Завдяки таким властивостям алюмінієві двигуни залишаються актуальними в конструкції спортивних авто, де на перший план виходять співвідношення потужності до ваги, ефективність тепловідведення та інженерна гнучкість у проектуванні силових агрегатів.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Алюміній та його сплави

Загальна характеристика

З моменту початку промислового виробництва алюмінію, що відбулося трохи більше століття тому, цей метал поступово став другим за масштабами використання після сталі. Алюмінієві сплави мають цілу низку корисних властивостей, серед яких варто відзначити високу міцність, чудову корозійну стійкість, добру оброблюваність, а також високу теплопровідність і електропровідність. Поєднання цих властивостей із малою густиною і високою питомою міцністю робить алюмінієві сплави надзвичайно привабливими для застосування у широкому спектрі галузей промисловості, включаючи автомобілебудування, авіацію, будівництво та електротехніку [3–6].

Алюміній посідає перше місце серед елементів, що є основою багатьох природних конструкційних мінералів за поширеністю: у глинах, бокситах та польових шпатах його вміст досягає приблизно 8%. На другій позиції за поширенням серед конструкційних металів знаходиться залізо (5,1%), а на третій — магній (2,4%).

Алюміній є легким металом світло-сріблястого кольору, який дуже добре полірується до дзеркального блиску. Полірована поверхня зберігає блиск протягом тривалого часу завдяки утворенню на ній захисного шару. Температура плавлення алюмінію дорівнює 660 °С. Його кристалічна структура представлена гранецентровано-кубічною (ГЦК) ґраткою, і поліморфні модифікації для нього не характерні. Алюміній вирізняється малою густиною (2,7 г/см³), високою корозійною стійкістю, хорошою пластичністю і парамагнітними властивостями. Він також має високі значення електричної та теплової провідності. Наприклад, при чистоті 99,997%

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електропровідність алюмінію становить приблизно 65,5% від провідності міді, що ставить його на четверте місце після срібла, міді та золота. Водночас, присутність навіть незначних домішок, таких як марганець, ванадій, хром або титан, суттєво знижує ці показники.

Алюміній належить до хімічно активних металів, але на відкритому повітрі він дуже швидко покривається тонкою, щільною оксидною плівкою Al_2O_3 . Цей шар є пасивуючим і ефективно захищає метал від подальшого окислення чи взаємодії з навколишнім середовищем. Саме ця оксидна плівка забезпечує алюмінію виняткову стійкість до атмосферного впливу, у тому числі до дії прісної та морської води, а також до багатьох органічних кислот — таких як оцтова, лимонна чи винна. Алюміній майже не реагує з концентрованою азотною кислотою і практично не піддається дії 100% сірчаної кислоти.

На механічні характеристики технічно чистого алюмінію значний вплив має саме ступінь його чистоти (табл. 1.1), яка визначає показники міцності, пластичності, а також експлуатаційної довговічності матеріалу.

Таблиця 1.1 – Вплив ступеню чистоти алюмінію на його механічні властивості [3]

Вміст алюмінію, %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_{10} , %	НВ, МПа
99,99%	49	22	45,5	84...112
99,5	70	28	31,5	126...175

Технічно чистий алюміній може бути ефективно зміцнений за допомогою процесу холодної пластичної деформації, що приводить до значного підвищення таких характеристик, як границя міцності, границя плинності, міцність на зріз, а також опір втомному руйнуванню.

Цей матеріал демонструє чудову здатність до деформації як у гарячому, так і в холодному стані, зберігаючи при цьому хороші механічні властивості. Наприклад, алюміній високої чистоти — 99,995% — здатний витягуватись з початкового діаметра 80 мм до товщини лише 0,1 мм, що свідчить про його виняткову пластичність. Він добре зварюється практично всіма основними методами зварювання, включаючи електродугове, аргонодугове та контактне. Проте через високу в'язкість і липкість алюміній має дещо обмежені можливості для обробки різанням, що вимагає застосування спеціального інструменту.

Особливою властивістю алюмінію є його здатність поглинати нейтрони, що робить його вкрай корисним для застосування в атомній енергетиці, зокрема в конструкціях реакторів.

У складі алюмінію часто присутні домішки, серед яких найпоширенішими є залізо (Fe), кремній (Si), мідь (Cu), марганець (Mn) і цинк (Zn). Наявність структурно вільного кремнію спричиняє утворення евтектики, що складається з твердого розчину на основі алюмінію (α -Al) та кристалів Si. Це призводить до розширення інтервалу кристалізації й водночас сприяє появі гарячеламкості в алюмінії.

Залізо майже не розчиняється в кристалічній решітці алюмінію, утворюючи інтерметалід $FeAl_3$. Ця хімічна сполука входить до складу евтектики, що, як правило, виділяється вздовж меж зерен алюмінієвої матриці. Обидві фази — Si та $FeAl_3$ — мають характерну голкоподібну форму (див. рис. 1.2). Такі включення є крихкими, що суттєво знижує загальну пластичність алюмінію, особливо при механічних навантаженнях.

У технічних сортах алюмінію залізо та кремній майже завжди присутні разом у вигляді домішок, формуючи складні фази, які кристалізуються як по межах зерен, так і всередині них, впливаючи на властивості матеріалу.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

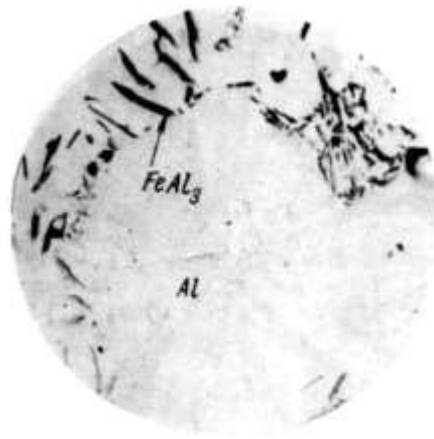


Рис. 1.2 Мікроструктура алюмінію, $\times 150$ [3]

Ливарні алюмінієві сплави. Загальна характеристика, вплив легувальних елементів

На сьогоднішній день існує велика кількість різновидів ливарних сплавів алюмінію, які зазвичай класифікуються за хімічним складом на наступні основні категорії [7]:

- Al технічної чистоти, що використовується як базовий матеріал для ряду сплавів;
- Al-Cu, Al-Cu-Mg — сплави, леговані міддю і магнієм, які забезпечують підвищену міцність;
- Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Si-Mg-Cu — найбільш поширені системи, де поєднання кремнію з магнієм і міддю покращує литі та механічні властивості;
- Al-Si — сплави з високим вмістом кремнію, що характеризуються гарною литністю та зносостійкістю;
- Al-Mg — корозійностійкі сплави з високою пластичністю;
- Al-Zn-Mg — сплави з підвищеною міцністю, особливо після термічної обробки.

У різних країнах світу розроблено власні національні системи класифікації алюмінієвих сплавів, які базуються на однакових принципах, але

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мають різне позначення і цифрово-буквену систему. Проте, вміст основних легувальних елементів у цих системах переважно збігається.

У таблиці 1.1 наведено приклади марок ливарних алюмінієвих сплавів, які мають подібний хімічний склад, але різняться за позначенням у залежності від країни походження [8]. З таблиці видно, що більшість ливарних сплавів, за винятком систем Al-Mg та Al-Mg-Si, містять кремній (Si) у значній кількості — від 7 до 13 мас.%. Саме кремній забезпечує хорошу литість, стійкість до усадкових тріщин і покращення технологічних властивостей сплаву.

Таблиця 1.1 Порівняння основних марок алюмінієвих сплавів [12]

Сплави серії	Країна	Марка	Вміст легуючого елемента, мас. %					Al
			Si	Cu	Mg	Fe	Mn	
Al-Si	Китай	YL101	9,0~10,0	<0,6	0,45-0,65	<1,0	≤0,6	решта
		YL102	10,0~13,0	<0,6	<0,05	<1,2	≤0,6	
	Японія	ADC1	11,0~13,0	<1,0	<0,30	<1,2	0,3	
	США	413	11,0~13,0	<1,0	<0,35	<2,0	0,35	
	Україна	АЛ12	10,0~13,0	<0,6	<0,10	<1,5	-	
	Німеччина	AlSi2	10,5~13,5	<0,12	<0,4	<1,2	≤0,4	
Al-Si-Mg	Китай	YL104	8,0~10,5	<0,30	0,17~0,30	<1,0	0,2~0,5	решта
	Японія	ADC3	9,0~10,0	<0,60	0,40~0,60	<1,3	0,3	
	США	360	9,0~10,0	<0,60	0,40~0,60	<2,0	0,35	
	Україна	АЛ4	8,0~10,5	<0,10	0,17~0,30	<1,0	-	
	Німеччина	AlSi10Mg	9,0~11,0	<0,10	0,20~0,50	<1,0	≤0,4	
Al-SiCu	Китай	YL112	7,5~9,5	3,0~4,0	<0,30	<1,2	≤0,5	решта
		YL113	9,6~12,0	1,5~3,5	<0,30	<1,2	≤0,5	
	Японія	ADC10	7,5~9,5	2,0~4,0	<0,30	<1,3	0,5	
		ADC12	9,6~12,0	1,5~3,5	<0,30	<1,3	0,5	
	США	380	7,5~9,5	3,0~4,0	<0,10	<1,3	0,5	
		383	9,5~11,5	2,0~3,0	<0,10	<1,3	0,5	
	Німеччина	AlSi9Cu3	8,0~11,0	2,0~3,5	0,1~0,5	<1,3	0,1~0,5	

Al-Mg-Si	Японія	ADC5	<0,30	<0,20	4,0~8,5	<1,8	0,3	решта
	США	518	<0,35	<0,25	7,5~8,5	<1,8	0,35	
	Німеччина	AlMg9	<2,5	<0,05	7,0~10,0	<1,0	0,2~0,5	
Al-Mg	ЄС	LM5	0,3	0,1	3,0~6,0	0,8	0,55	решта
	Японія	ADC6	<1,0	<0,1	2,6~4,0	<0,6	0,4~0,60	
	США	516	0,3~1,5	0,3	2,5~4,5	0,35~1,0	0,35	
	Китай	YL302	0,80~1,30	<0,10	4,5~5,5	<1,2	0,1~0,4	

Блоки циліндрів, головки блока та інші відповідальні деталі двигунів внутрішнього згоряння доцільно анодувати з метою підвищення їхньої корозійної стійкості в складних експлуатаційних умовах. Для лиття головок блоків зазвичай використовують високоміцні сплави типу АЛ5, АЛ4, АК4М2Ц6 і АК6М2, які забезпечують хорошу оброблюваність та термостійкість. Поршні інжекторних бензинових двигунів, як правило, відливають зі сплавів типу АЛ30, АЛ25 і АКЮМ2Н, тоді як поршні дизельних двигунів виготовляють із заевтектичних легованих силумінів, таких як АК21М2, 5Н2,5 і АК18, що мають підвищену міцність і зносостійкість.

З алюмінієвих сплавів також виготовляють численні інші конструктивні елементи двигунів: впускні труби, картери рульового управління, картери зчеплення та інші елементи, які зазвичай відливають у кокіль зі сплавів типу АЛ4 або АК9. Термостати, водяні насоси та подібні деталі виготовляють литтям під тиском зі сплаву АЛ4, що забезпечує точність форми та герметичність. Методом лиття під тиском також виготовляють корпуси карбюратора, дросельної заслінки, розподільника запалювання, паливного та масляного насосів тощо.

Діапазон застосовуваних алюмінієвих сплавів є досить широким і охоплює типи АК12М2, АК9С і АК9М2а. Значну кількість елементів електроапаратури виготовляють литтям під тиском зі сплавів типу АЛ2 та

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

AK12M2P, які характеризуються високими литтєвими властивостями та стабільною структурою.

Чотирициліндровий блок двигуна англійської фірми «Hill-man» отримують методом лиття під низьким тиском зі сплаву типу АЛ4, що забезпечує високу щільність і механічну міцність. Кришки корінних підшипників відливають під тиском із легкого сплаву, що містить 9% кремнію та 3% міді, що забезпечує високу твердість. Головку блока циліндрів виготовляють у кокіль зі сплаву типу АЛ16, а такі деталі як передня кришка з водяним насосом, кришка клапанної коробки, секція штовхачів і випускна труба — методом лиття під тиском.

Восьмициліндровий V-подібний двигун англійського автомобіля Rover повністю виготовлений із алюмінієвих сплавів: блок циліндрів відливають зі сплаву М25 в піщану форму, а головку блока – литтям під тиском для досягнення високої точності та механічної якості.

Неавтоматичні коробки передач зазвичай відливають у кокіль або методом лиття під тиском зі сплаву типу АЛ4, що забезпечує достатню міцність та точність готового виробу. Картери автоматичних коробок передач конструктивно краще пристосовані для технології лиття під тиском, що обумовлює їх ширше використання з алюмінієвих сплавів для таких цілей. Застосування цієї технології дозволяє досягти значно вищої точності виливків, а також суттєво зменшити обсяг подальшої механічної обробки, що підвищує економічну доцільність виробництва.

Для зменшення теплового розширення алюмінієвого картера часто використовують спеціальні сталеві вставки, які стабілізують геометрію деталі при зміні температур. Картер зчеплення в легкових автомобілях зазвичай відливають методом лиття під тиском і виконують його як єдину деталь із картером коробки передач із використанням сплаву типу АЛ4.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У вантажних автомобілях картери зчеплення частіше за все виготовляють у комбінованих ливарних формах або в кокілі, використовуючи сплави типу АЛ4 та АЛ9, які мають покращені механічні характеристики та термостійкість.

Завдяки високій теплопровідності та значній питомій теплоємності алюмінієвих сплавів, їх широко використовують для виготовлення гальмівних барабанів, що сприяє ефективному відведенню тепла під час гальмування та значно збільшує строк служби гальмівних накладок. Гальмівні барабани зазвичай відливають у кокіль зі сплавів типу АЛ9 і АЛ1, а в окремих випадках — також методом лиття під тиском.

Для підвищення зносостійкості на робочі поверхні таких барабанів встановлюють чавунні вставки, що дозволяє поєднати теплоємність алюмінію та міцність чавуну. Наприклад, на автомобілях марки ВАЗ застосовується лиття під тиском зі сплаву АК12М2, що демонструє хороші характеристики в умовах інтенсивної експлуатації.

Легування алюмінієвих сплавів кремнієм має на меті значне покращення текучості розплаву, що дозволяє металу легко заповнювати найтонші ділянки ливарної форми, а також сприяє зростанню твердості, міцності на розрив і зносостійкості.

Наявність у структурі ливарних силумінів кристалів первинного кремнію, коли вміст Si перевищує евтектичний рівень (приблизно 12,7 мас.%), забезпечує не лише високу зносостійкість, а й низький коефіцієнт лінійного теплового розширення, що особливо важливо для виготовлення відповідальних деталей, зокрема поршнів двигунів внутрішнього згорання.

Коли вміст кремнію наближається до евтектичного значення (12,7 мас.%), сплав набуває практично нульового інтервалу кристалізації, кращої

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

текучості, мінімальної усадкової пористості та найменшої схильності до утворення гарячих тріщин.

Однак із подальшим підвищенням вмісту кремнію понад рекомендовану межу (14–15 мас.%) можливе виникнення таких проблем, як ерозія плавильного тигля або поява твердих включень, які погіршують технологічні властивості сплаву. У виробництві деталей з підвищеними вимогами, як-от поршневі циліндри або елементи силової групи, зазвичай використовуються спеціалізовані високоміцні сплави [10, 11], в яких вміст кремнію може бути дещо підвищеним, але контрольованим.

Оскільки основними ливарними алюмінієвими сплавами, які активно застосовують у конструкції сучасних автомобільних двигунів, є переважно сплави серії 300 (на основі систем Al-Si-Cu або Al-Si-Mg), доцільним є більш детальний розгляд властивостей і особливостей саме цих систем. Серед найбільш поширених сплавів цієї групи можна виділити сплав 319 (AK5M2), який використовується для виготовлення впускного колектора, головки циліндра і корпусу трансмісії; сплав 383 (AK12MMgH), який застосовується у виробництві блоків циліндрів; а також сплав 356 (AK7), що переважно використовується для лиття головок циліндрів.

Сплави Al-Si широко застосовуються переважно для фасонного лиття складних за формою деталей, хоча в окремих випадках для зварювання або паяння використовують також листовий прокат і дріт із подібним хімічним складом. Сплави, які не містять міді, зазвичай застосовують для виробництва відливок з низькими або середніми міцнісними характеристиками, при цьому вони мають хорошу корозійну стійкість, що особливо важливо для експлуатації в агресивних середовищах.

Навпаки, сплави з вмістом міді призначені для отримання середньо- та високоміцних литих деталей, в яких пріоритетними є механічні властивості, а

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

не стійкість до корозії. Завдяки чудовим ливарним характеристикам ці сплави дозволяють виготовляти міцні та надійні відливки складної конфігурації, причому навіть у важкодоступних або слабо живлених зонах механічні властивості таких виробів будуть вищими, ніж у сплавів з гіршими ливарними властивостями, але потенційно вищою міцністю.

Хімічний склад сплавів цієї групи охоплює наступні межі, мас. %: 5–25 Si; 0–5 Cu; до 3 Fe; 0–2 Mg; 0–3 Zn; до 3 — Mn, Cr, Co, Mo, Ni, Be, Zr; <0,02 Na, Sr; <0,01 P. У деяких джерелах повідомляється також про ефективність легування такими компонентами, як карбід кремнію та сурма, які можуть позитивно впливати на експлуатаційні властивості сплавів [12].

Кремній є основним легувальним елементом в таких сплавах і відіграє ключову роль, надаючи їм високу текучість, що забезпечує гарну здатність заповнювати складні форми ливарних форм. Також кремній суттєво зменшує лінійну усадку при затвердінні, що покращує точність відливок і сприяє підвищенню їх технологічності та зварюваності.

У випадку поршневих сплавів до особливо важливих властивостей належать низький температурний коефіцієнт лінійного розширення та висока зносостійкість, яка досягається завдяки присутності у структурі твердих частинок кремнію. Максимальний вміст кремнію в більшості ливарних сплавів, як правило, становить 22–24%, однак для спеціалізованих поршневих сплавів цей показник може досягати 40–50% Si, що суттєво підвищує їх довговічність і стійкість до експлуатаційних навантажень.

Натрій і стронцій виконують модифікуючу роль у складі алюмінієвих сплавів, оскільки ефективно стримують ріст зерен під час кристалізації, що сприяє формуванню більш однорідної мікроструктури. Фосфор, у свою чергу, відіграє важливу роль у подрібненні первинних кристалів, покращуючи таким чином механічні властивості відливок. Залізо є основною супутньою

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

домішкою, і в більшості ливарних алюмінієвих сплавів його вміст прагнуть підтримувати на мінімально можливому рівні через його негативний вплив на пластичність металу та зниження корозійної стійкості.

У відливках, отриманих методом лиття в піщані форми або в кокіль, допустимий максимальний вміст заліза зазвичай становить 0,6–0,7%. Проте в окремі поршневі сплави залізо іноді спеціально додають у контрольованій кількості, з урахуванням його структуроутворюючого ефекту. У відливках, виготовлених методом лиття під тиском, допустимий вміст заліза може сягати до 3%, що пов'язано з технологічними особливостями процесу.

Кобальт, хром, марганець, молібден і нікель іноді цілеспрямовано вводять до складу сплаву з метою нейтралізації шкідливого впливу заліза. Ці легуючі елементи також сприяють підвищенню жаростійкості сплаву, що є критичним для роботи деталей у високотемпературних умовах. Мідь часто додається для зміцнення матеріалу та поліпшення його опору втомі без істотного погіршення ливарних властивостей, хоча її присутність може негативно впливати на корозійну стійкість.

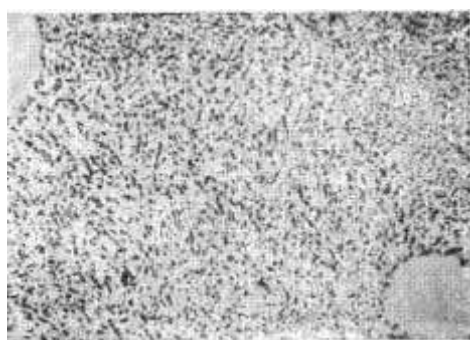
Магній істотно підвищує міцність сплаву, хоча водночас знижує його пластичність, особливо після проведення термічної обробки. Цинк дозволений у складі багатьох сплавів у межах 1,5–12,0%, оскільки при кімнатних температурах він незначно впливає на основні експлуатаційні характеристики. Титан і бор іноді вводять у сплав для подрібнення зерен, хоча розмір зерна в ливарних сплавах зазвичай не є критичним параметром, оскільки основний вплив на властивості мають кількість і морфологія кремнію, а також модифікуючі ефекти натрію або фосфору.

У деяких випадках у структурі розрізняють евтектичний і так званий «графітоутворюючий» кремній шляхом металографічного травлення [13]. Тривале або багаторазове нагрівання спричиняє сфероїдизацію частинок

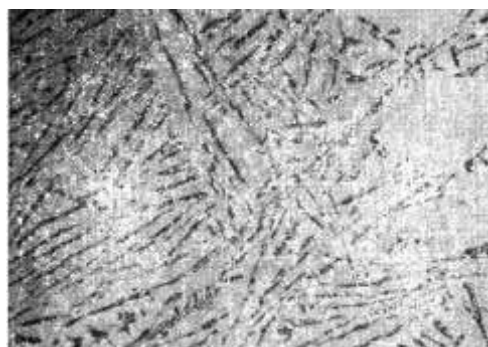
					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кремнію. Цей процес проходить значно швидше у модифікованих сплавах і призводить до збільшення розмірів частинок кремнію до величин, близьких до тих, що спостерігаються у немодифікованих матеріалах.

За відсутності міді залізо, як правило, входить до складу евтектичної фази Al – FeSiAl₅ – Si у вигляді тонких пластин, які розподіляються серед кремнієвих голок і стержнів (рис. 1.3, а). Якщо ж концентрація заліза перевищує 0,8%, у структурі починають з'являтися первинні кристали сполуки FeSiAl₅ [13] (рис. 1.3, б), що може мати негативний вплив на механічні властивості відливок.



а)

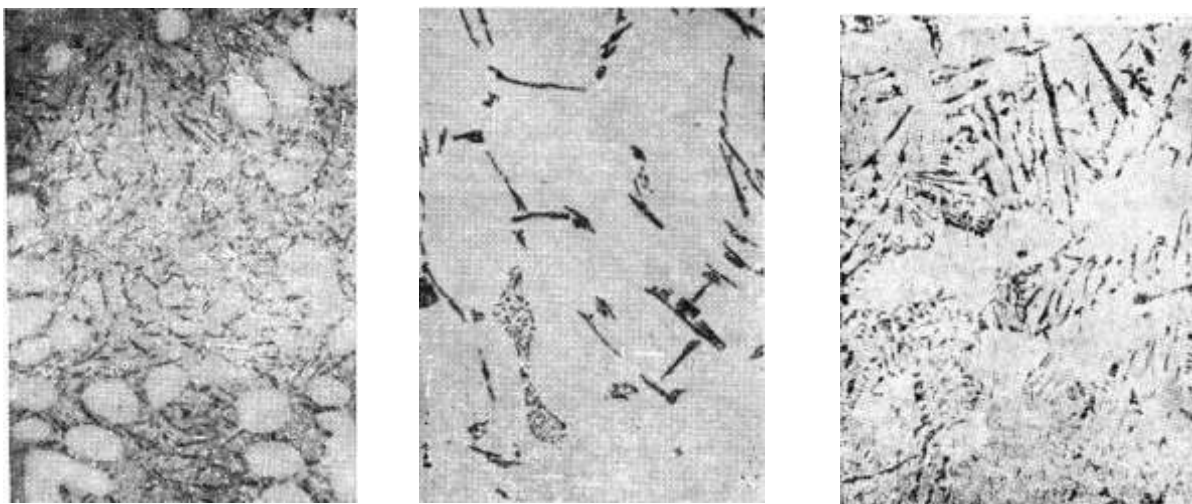


б)

Рис. 1.3 Структура сплавів без травлення, $\times 250$. а – 12% Si; 0,3% Fe; б – 10% Si, 0,09% Fe

Швидке охолодження розплаву спричиняє зміщення евтектичної області в бік вищих концентрацій заліза, що водночас сприяє значному подрібненню кристалів фази FeSiAl₅ (рис. 1.4, а). Цей ефект особливо виражений під час лиття в умови з високою швидкістю тепловідведення, наприклад, при литті в металеві форми або в умовах примусового охолодження. Подрібнення кристалів позитивно впливає на механічні властивості сплаву, зменшуючи ймовірність виникнення тріщин при охолодженні.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)

б)

в)

Рис. 1.4 Структури сплавів алюмінію

а – 10% Si; 1,5% Fe., $\times 500$; б – 5% Si; 0,2% Fe і з добавками фосфору, $\times 250$; в – 10% Si; 0,9% Si; 0,6% Fe, $\times 250$

Іноді, особливо в сплавах з відносно низьким вмістом кремнію або в тих, що додатково містять такі легувальні елементи, як магній, мідь або цинк, утворюється інша залізовмісна фаза — Fe_2SiAl_5 . Вона має характерну морфологію у вигляді фігур, схожих на китайські ієрогліфи, що добре видно під мікроскопом (рис. 1.4, б, в). Така морфологія фазових включень може суттєво впливати на механічні характеристики відливок, зокрема на ударну в'язкість і втомну міцність.

За наявності міді в складі сплаву залізо вступає з нею у взаємодію, утворюючи, ймовірно, інтерметалідну сполуку Cu_2FeAl_7 [13]. Ця сполука формується переважно під час повільного охолодження і проявляється у вигляді компактних включень у мікроструктурі сплаву. Її наявність може позначатися на термічній стабільності та міцності при високих температурах, а також дещо впливати на технологічні властивості сплаву.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У присутності магнію в мікроструктурі алюмінієвих сплавів виникає характерна сполука $\text{FeMg}_3\text{Si}_6\text{Al}_8$ (рис. 1.5, а), яка проявляється як у формі китайських ієрогліфів, коли вона входить до складу евтектики, так і у вигляді глобулярних, первинно утворених кристалів світло-блакитного відтінку. Ці глобули чітко помітні під мікроскопом та можуть суттєво впливати на механічні властивості сплаву.

Крім того, залізо здатне зв'язуватись із марганцем з утворенням інтерметалідної фази $(\text{FeMn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$, яка часто має морфологію у вигляді витягнутих фігур, схожих на китайські письмена (рис. 1.5, б). Утворення такої фази знижує крихкість, викликану фазою FeSiAl_5 , тим самим покращуючи пластичні властивості матеріалу [14]. Проте, якщо сумарний вміст марганцю і заліза перевищує 0,8% за масою, можуть формуватись первинні кристали тієї ж фази $(\text{FeMn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$, що мають гексагональну форму глобул, хоча за структурною природою належать до кубічного типу. Такі включення не спричиняють крихкості, проте значно ускладнюють обробку сплаву різанням. Тому вміст марганцю необхідно ретельно регулювати, аби досягти балансу — зменшити негативний вплив заліза та водночас запобігти утворенню первинних включень, які знижують технологічність обробки [15].

Хром і нікель також застосовують як засоби нейтралізації шкідливого впливу надлишкового заліза, однак утворювані ними сполуки, такі як $(\text{CrFe})_4\text{Si}_4\text{Al}_{13}$ або $(\text{CrFe})_5\text{Si}_8\text{Al}_2$, а також FeNiAl_9 , мають витягнуту або подовжену форму (рис. 1.5, в), яка знову ж таки може сприяти крихкоутворенню в структурі сплаву [15].

Найефективнішим у зменшенні негативного впливу заліза вважається кобальт. Він не вступає у взаємодію з кремнієм, тим самим знижуючи ймовірність утворення небажаних інтерметалідних сполук, що покращує експлуатаційні характеристики сплаву [13–15].

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Щодо структурних утворень із залученням нікелю, кобальту та заліза, їх точний склад ще повністю не встановлено. Вважається, що можливою є наявність четверної сполуки $AlCuFeNi$, а також часткове розчинення нікелю в Cu_2FeAl_7 і $(CuFe)Al_6$. Існують дані й про розчинення заліза і міді в Ni_2Al_3 . Таким чином, нікель у таких сплавах може бути присутнім у вигляді однієї або декількох таких фаз: $NiAl_3$, $(CuNi)_2FeAl_7$, $(CuFeNi)Al_6$, $(CuFeNi)_2Al_3$, Cu_4NiAl_7 , $(FeNi)Al_9$ [16], що також впливають на властивості відливок як у литому, так і термічно обробленому стані.

У присутності марганцю в структурі алюмінієвих сплавів може утворюватися сполука $FeMnNi$, яка ускладнює точну ідентифікацію інших інтерметалідних фаз через накладання їхніх морфологічних характеристик. Вплив молібдену на формування мікроструктури аналогічний до дії кобальту, що дозволяє частково нейтралізувати негативні ефекти заліза та покращити стабільність структури сплаву [13].

У випадку, коли мідь не розчиняється в твердій алюмінієвій матриці, вона присутня у вигляді окремої фази $CuAl_2$ (рис. 1.5, г). Це спостерігається у сплавах, які не містять магнію або мають його недостатню кількість для зв'язування міді у складнішу сполуку $Cu_2Mg_8Si_6Al_5$. Розчинність міді в алюмінії помітно знижується при введенні таких легувальних елементів, як нікель або марганець, які виводять її зі структури у формі комплексних інтерметалідних сполук $Cu-Ni$ та $Cu-Mn$ [17].

Магній, за відсутності його входження у твердий розчин, утворює характерну сполуку Mg_2Si (рис. 1.5, д). У разі присутності міді може також формуватись фаза $Cu_2Mg_8Si_6Al_5$ (рис. 1.5, е). У нерівноважних умовах кристалізації фаза Mg_2Si здатна співіснувати з $CuAl_2$ та кристалами вільного кремнію Si (рис. 1.5, є). Якщо в сплаві відсутні такі елементи, як мідь, кобальт, хром, марганець, молібден або нікель, але спостерігається підвищений вміст

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

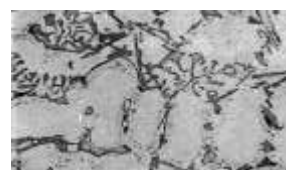
заліза й магнію, формується інтерметалідна сполука $FeMg_3Si_6Al_8$, що суттєво впливає на властивості матеріалу.

Цинк у кількості до 1% легко входить до твердого розчину в алюмінії та, як правило, не утворює помітних окремих структурних фаз (рис. 1.5, ж). Проте при збільшенні його концентрації, особливо разом з підвищеним вмістом магнію, може з'являтися характерна зміцнююча фаза $MgZn_2$, яка покращує механічні властивості, зокрема межу міцності.

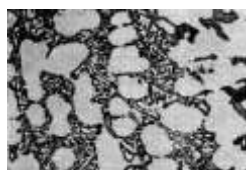
Титан і бор додають у таких кількостях, що не перевищують межу їхньої розчинності у твердому стані, тому ці елементи зазвичай не утворюють окремих фаз. Однак залізо зменшує розчинність титану та бору, і таким чином для ефективного модифікування структури необхідна менша кількість цих елементів. За даними роботи [12], для подрібнення інтерметалідних сполук типу $FeMn$ доцільно застосовувати присадки ванадію в кількості 0,1–0,2%, що сприяє покращенню оброблюваності та міцності литих виробів.



а)



б)



в)



г)



д)



е)



є)



ж)

Рис. 1.5 Мікроструктури алюмінієвих сплавів.

а – 7% Si; 0,5% Fe; 0,6% Mg, $\times 250$; б – 5% Si; 0,7% Fe; 0,35% Mn; 1,5% Si; 1% Mg, $\times 250$; в – 9% Si; 0,5% Fe; 1% Ni, $\times 500$; г – 5,5% Si; 4,5% Cu; 0,6% Fe, $\times 250$; д – 7% Si; 0,5% Mg; 0,2% Fe, $\times 250$; е з 5% Si; 0,5% Mg; 1,5% Cu; 0,2% Fe, $\times 250$; є – 5% Si; 0,5% Mg; 1,5% Cu; 0,2% Fe, $\times 250$; ж – 5% Si; 3% Cu; 4% Zn; 0,6% Fe; 0,25% Mg, $\times 250$

Олово та свинець у присутності магнію зазвичай прагнуть розчинитися у фазі Mg_2Si , утворюючи при цьому стабільні інтерметалідні сполуки [14–17]. Усі фази, що формуються в результаті взаємодії основних і легуючих елементів, зазвичай концентруються по межах зерен, утворюючи складні багатофазні евтектики, які можуть істотно впливати на мікроструктуру та механічні властивості сплаву.

Таким чином, можна зробити висновок, що найкращий рівень експлуатаційних характеристик, необхідних для литих конструктивних деталей двигунів внутрішнього згорання автомобілів, зокрема таких, як головка циліндра, забезпечують алюмінієві сплави системи Al–Si–Mg, відомі також як силуміни. Вони поєднують у собі хорошу ливарність, достатню міцність, зносостійкість і задовільну корозійну стійкість, що робить їх надзвичайно перспективними матеріалами для серійного виробництва.

1.3 Термічна обробка і структура сплавів системи Al-Si-Mg

Діаграму стану потрібної системи Al–Si–Mg було розроблено дослідниками Хансеном і Гейлером [18]. Квазібінарний розріз Al– Mg_2Si

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поділяє алюмінієвий кут цієї діаграми на дві вторинні системи: Al–Si–Mg₂Si та Al–Mg₂Si–Al₃Mg₂, які належать до евтектичного типу з обмеженою та змінною розчинністю компонентів у твердому стані. У системі Al–Si–Mg₂Si, що охоплює такі сплави, як АЛ9, АЛ34 (ВАЛ5), АЛ4, формується потрібна евтектика $\alpha + \text{Mg}_2\text{Si} + \text{Si}$ з температурою плавлення на рівні 550 °С, що відповідно обмежує допустиму температуру нагріву під час гартування. Такі сплави значно зміцнюються в процесі термічної обробки завдяки утворенню пересичених твердих розчинів магнію й кремнію в алюмінієвій матриці при нагріванні для гартування, а також наступному розпаду цих розчинів під час охолодження та старіння з виділенням дрібнодисперсних частинок фази Mg₂Si.

Сплав АЛ9 здебільшого призначений для лиття тонкостінних і складних за геометрією деталей, що несуть помірні або середні механічні навантаження (наприклад, деталі карбюраторів, корпуси насосів та інші елементи апаратури).

До основних переваг сплаву АЛ9 можна віднести:

а) чудові ливарні властивості, зокрема високу рідкотекучість і незначну лінійну усадку, які є близькими до характеристик сплаву АЛ2, що дозволяє виготовляти тонкостінні виливки складної конфігурації;

б) низьку схильність до виникнення гарячих тріщин під час кристалізації;

в) порівняно високу міцність у поєднанні із задовільною пластичністю;

г) у порівнянні зі сплавом АЛ4 менш складну технологію лиття: немає потреби у застосуванні автоклава для кристалізації під тиском; процес модифікування зазвичай здійснюється стандартним потрібним модифікатором, що робить його більш економічним.

До недоліків сплаву АЛ9 слід зарахувати:

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- а) відносно низьку оброблюваність різанням у вихідному стані;
- б) при підвищенні вмісту магнію зростає міцність і покращується оброблюваність, але при цьому помітно знижується пластичність;
- в) зменшена корозійна стійкість, зокрема до дії азотної кислоти;
- г) недостатня жароміцність, яку можна поліпшити шляхом збільшення вмісту кремнію й магнію, а також легування сплаву міддю.

Таким чином, для виготовлення головки циліндрів двигуна внутрішнього згорання доцільно застосовувати сплав АК7 (відповідник АЛ9).

Основною зміцнювальною фазою у складі потрійних сплавів є фаза Mg_2Si . Ця фаза має елементарну кубічну кристалічну ґратку та, як правило, не утворює твердих розчинів з іншими компонентами, що властиво для іонних сполук і відрізняє її від фаз типу Al_3Mg .

Розчинність Mg_2Si та Si у твердому розчині алюмінію майже однакова, однак процес утворення й подальшого виділення ультрадисперсних частинок фази Mg_2Si відбувається досить повільно і проходить у кілька послідовних стадій [19]. Кожна зі стадій розпаду пересиченого твердого розчину супроводжується характерними фізико-механічними властивостями, тому для сплаву АЛ9 рекомендовано кілька режимів зміцнювальної та стабілізуючої термічної обробки з урахуванням структури та призначення деталі.

Нагрівання сплаву АЛ9 перед гартуванням рекомендується здійснювати при температурі 535 ± 5 °С упродовж 2–6 годин залежно від геометричних розмірів деталі, поперечного перерізу виливка, а також розміру зерен у структурі матеріалу. Через те, що швидкість розчинення зміцнювальної фази Mg_2Si при такій температурі є досить високою, подовження витримки понад зазначений інтервал часу є недоцільним. Надмірна тривалість нагрівання може призвести до небажаної коагуляції та

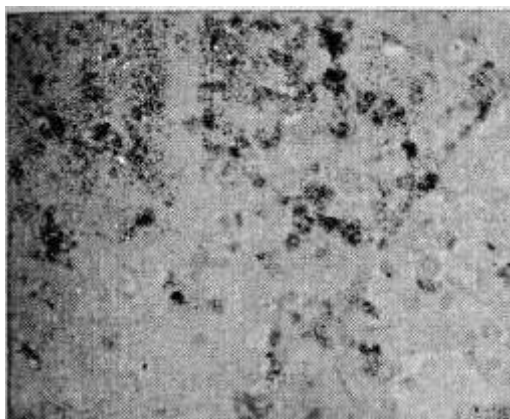
					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

укрупнення частинок кремнію, що негативно впливає на подальші механічні властивості матеріалу.

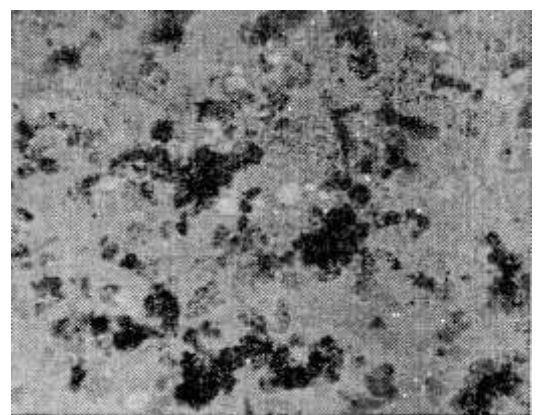
Охолодження після гартування здійснюється у водному середовищі при температурі близько 20 °С, що забезпечує достатню швидкість охолодження для фіксації пересиченого твердого розчину. У загартованому стані (режим термообробки Т4) сплав АЛ9 характеризується підвищеним рівнем пластичності, що становить $\delta = 4\text{--}6\%$, при збереженні міцності в межах 180–200 МПа.

Наступне старіння при температурі 150 ± 5 °С упродовж 1–3 годин (режим Т5) дозволяє суттєво підвищити механічні характеристики сплаву, зокрема границю міцності до значень у межах 200–260 МПа, а також збільшує твердість і опір пластичній деформації. Водночас спостерігається зменшення відносного видовження до 2–3 %, що свідчить про зниження пластичності внаслідок утворення зміцнювальних фаз.

Електронно-мікроскопічний аналіз структури після старіння підтверджує розпад пересиченого твердого розчину, активне виділення надлишкового кремнію, формування зон Гін'є–Престона (ЗГП), а також появу метастабільної зміцнювальної фази β' , яка має найвищу густину та відповідає за підвищені характеристики міцності сплаву (рис. 1.6,а) [20].

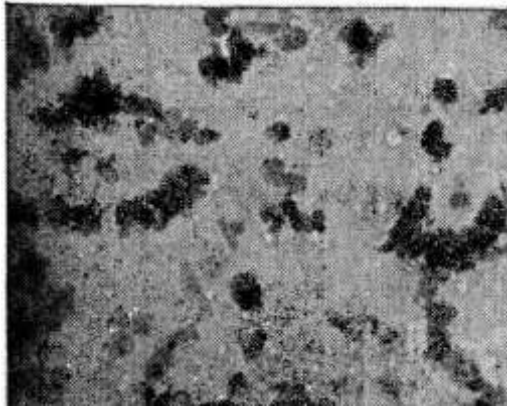


а)

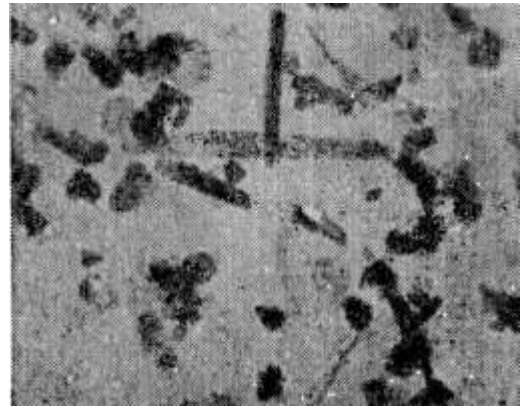


б)

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



в)



г)

Рис. 1.6 Структура сплаву АЛ9, $\times 35000$

а – гартування і старіння впродовж 3 год.; б, в, г – гартування і старіння впродовж 5 год

Після проведення старіння сплаву АЛ9 при температурі $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 5 годин (термічний режим Т6) спостерігається інтенсивний розпад пересиченого твердого розчину всередині зерен, що супроводжується значним підвищенням густини скупчень зон Гін'є–Престона (ЗГП). Окрім цього, утворюються орієнтовані дрібнодисперсні включення метастабільної фази β' , а також частинки кремнію сірого кольору, різноманітні за своєю формою (рис. 1.6, б). Така комплексна мікроструктурна еволюція є головним чинником, що забезпечує суттєве підвищення рівня механічних властивостей сплаву.

Виявлені зміни в механічних характеристиках свідчать про те, що зі зростанням температури старіння у межах рекомендованого діапазону (як наведено в табл. 1.2), необхідний час витримки для досягнення оптимального ефекту зміцнення зменшується. Таким чином, зростання температури старіння дозволяє скоротити тривалість обробки без погіршення кінцевих властивостей матеріалу.

Старіння проводилося після гартування, яке здійснювали з температури $535\text{ }^{\circ}\text{C}$ із витримкою 6 годин. Охолодження після гартування

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виконували у водному середовищі при температурі 20 °С, що забезпечувало фіксацію пересиченого твердого розчину для подальшого ефективного старіння.

Таблиця 1.2 Зміна властивостей сплаву АЛ9 залежно від режиму старіння

№ режиму	Режим старіння		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
	t, °С	τ , год			
1	150	3	217	169	4,3
2	150	5	223	189	4,1
3	175	3	225	196	2,7
4	175	5	227	197	2,9
5	200	0,5	230	191	4,5
6	200	1	230	188	4,5
7	200	5	236	194	4,5
8	150	1	239	190	4,1
9	200	1	237	192	4,5

Застосування двоступеневого режиму термічного старіння (режими 8 і 9) дозволяє досягти кращого поєднання таких механічних характеристик, як межа міцності на розрив (σ_B), межа плинності ($\sigma_{0,2}$) та відносне видовження (δ), причому за істотно коротший загальний час обробки, порівняно з традиційними одноетапними режимами старіння [20].

Стабілізуюча термічна обробка сплаву АЛ9 (АК7 або 356)

Термічна обробка литих виробів супроводжується неоднорідним нагріванням і нерівномірним охолодженням по всьому перерізу виливки. Чим інтенсивніше проводиться нагрівання або охолодження, тим більшою є різниця температур між тонкими й товстими зонами деталі, між її поверхневими та внутрішніми шарами. При цьому, чим складнішою є геометрична конфігурація виливки, тим менш рівномірно й одночасно

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відбуваються об'ємні зміни в матеріалі, що часто призводить до виникнення суттєвих залишкових напружень.

Залишкові напруження можуть виникати з кількох основних причин:

Теплові напруження, які є наслідком температурного градієнта в матеріалі, що виникає через нерівномірне охолодження по перерізу виливки. Їх величина залежить від швидкості нагріву та охолодження, розмірів деталей і властивостей самого сплаву (зокрема, коефіцієнта лінійного розширення, теплопровідності та інших фізико-механічних характеристик).

Фазові напруження, обумовлені змінами параметрів кристалічної решітки під час фазових перетворень, а також різницею у коефіцієнтах термічного розширення між основною металевою матрицею сплаву та вторинними фазами.

Найбільші залишкові напруження виникають після гартування. За своєю величиною вони можуть у 5–10 разів перевищувати напруження, що залишаються після лиття у силумінових виливках, і у 20–25 разів перевищувати напруження, що виникають внаслідок механічного наклепу [21].

Рівень гартівних напружень зменшується зі зниженням швидкості охолодження, особливо у критичному температурному інтервалі фазових перетворень. За ефективністю зменшення внутрішніх напружень в охолоджуваній деталі охолоджувальні середовища розташовуються у такій послідовності: вода з температурою 20–60 °С, потім вода за температури близько 100 °С, мінеральне масло, повітря, підігріте масло, розплавлені солі. Для гартування тонких листових заготовок з алюмінієвих сплавів застосовується також рідкий азот, який забезпечує надзвичайно швидке охолодження [22].

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У роботах [22] звертається увага на відмінності механізму охолодження у рідкому азоті та воді. При гартуванні у воді спостерігаються три стадії охолодження. На першій – відбувається утворення тонкої парової сорочки навколо поверхні деталі, через яку теплова передача відбувається повільно. На другій стадії – так зване бульбашкове охолодження – починається інтенсивне змочування поверхні, при якому пар у вигляді бульбашок переноситься конвекційними потоками, конденсується у холоднішій рідині навколо деталі, забезпечуючи значно швидше відведення тепла.

На третій стадії охолодження, відомій як рідинне охолодження, рідина повністю контактує з деталлю, яка піддається гартуванню, і перенесення тепла відбувається переважно завдяки відносно повільному процесу природної конвекції. Під час гартування у воді тепловіддача може відрізнитися в різних зонах деталі, що пов'язано з різною геометрією та ступенем доступу до охолоджувального середовища.

На відміну від води, рідкий азот має значно нижче значення питомої теплоти випаровування — лише 47,0 кал/г проти 539 кал/г у воді. Завдяки цьому в умовах гартування у рідкому азоті стабільно підтримується парова фаза, що сприяє рівномірному та однорідному охолодженню деталі. Такий режим знижує величину залишкових напружень, спричинених термічними градієнтами.

Окрім гартівних напружень, викликаних температурним перепадом у процесі охолодження, додатково виникають структурні напруження, пов'язані зі змінами, що відбуваються при розпаді пересиченого твердого розчину. Ці перетворення супроводжуються об'ємними змінами, які також можуть викликати деформації та зниження точності геометричних розмірів.

Отже, при виборі режиму термічної обробки (температура та тривалість нагріву, спосіб охолодження при гартуванні, температура та

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тривалість старіння) необхідно забезпечити не лише бажані механічні характеристики, а й враховувати вимоги до стабільності геометричних параметрів і точності обробки деталей.

У тих випадках, коли до деталі не висуваються високі вимоги до міцності, може бути достатнім застосування високотемпературного відпалу (режим Т2). Для цього проводиться нагрів до температури 300 ± 10 °С протягом 2–4 годин з подальшим охолодженням або на повітрі, або разом із піччю. При цьому отримують механічні властивості на рівні: $\sigma_b = 160\text{--}170$ МПа, $\delta = 2\%$, твердість НВ ≈ 60 .

Якщо необхідно поєднати високу міцність із задовільною стабільністю розмірів, рекомендується проводити гартування у киплячій воді, після чого застосовується старіння за температури 225 °С (режим Т7) або 250 °С (режим Т8). Такий режим обробки сприяє більш інтенсивному розпаду твердого розчину, зменшенню залишкової деформації та питомого електричного опору, а також зниженню межі міцності із паралельним зростанням пластичності [23].

Ці зміни повністю відповідають еволюції структурних перетворень під час розпаду пересиченого α -твердого розчину — від зонної стадії (150–200 °С) через утворення метастабільної β' -фази (225 °С) до завершальної стабільної β -фази (Mg_2Si), яка формується при температурі близько 250 °С.

Електронно-мікроскопічне дослідження [20] продемонструвало, що процес старіння сплаву за температури 225 °С протягом 5 годин спричиняє укрупнення частинок кремнію, а також значне збільшення кількості утворених частинок метастабільної β' -фази. Ці частинки виявляються у структурі матеріалу у вигляді потовщених голчастих утворень, пластинчастих структур або окремих крапкоподібних включень, які спостерігаються у випадках, коли частинки виділення розташовані перпендикулярно до площини металографічного шліфа (див. рис. 1.6, в).

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.3 Схеми типових технологічних процесів

Послідовність операцій	Схема процесу для деталей категорії		
	1	2	3
1	Отримання відливки		
2	Термічна обробка за режимом 1		
3	Механічне оброблення із залишенням припуску до 0,5 мм на бік для найбільш точних розмірів	Попередня механічна обробка із збереженням припуску до 2,0 мм	
4	Оздоблювальна операція (гальванічне або лакофарбове покриття)	Термічна обробка за режимом 2	
5	Завершальна механічна обробка	Механічна обробка із залишенням припуску до 0,5 мм на бік для найбільш точних розмірів	
6	—	Оздоблювальна операція (гальванічне або лакофарбове покриття)	Термічна обробка за режимом 3
7	—	Завершальна механічна обробка	Оздоблювальна операція (гальванічне або лакофарбове покриття)
8	—	—	Завершальна механічна обробка
9	—	—	Термічна обробка за режимом 4

У разі старіння за температури 250 °С протягом 5 годин (див. рис. 1.6, г), у тонкій мікроструктурі сплаву АЛ9 чітко простежуються пруткоподібні виділення стабільної β-фази (Mg₂Si), які формуються в результаті подальшого розпаду твердого розчину. Окрім цього, спостерігається явище коагуляції кремнію, що є типовим для остаточного етапу термічних перетворень під час старіння.

Для виготовлення деталей, які використовуються в умовах тривалої експлуатації та належать до високоточних приладів зі сплаву АЛ9, застосовується аналогічна до сплаву АЛ2 технологічна схема обробки. Вона передбачає поетапне чергування операцій механічної обробки з етапами термічної обробки, що дозволяє забезпечити не лише необхідну точність, а й стабільність геометричних розмірів протягом усього терміну служби виробу (див. табл. 1.3).

Конкретні режими термічної обробки, які входять до вищезгаданої технологічної схеми виготовлення, детально наведені у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 Режими термічної обробки сплаву АЛ 9,

Номер режиму	Назва режиму	Температура нагрівання, °С	Тривалість витримки, год	Середовище охолодження
1	Гартування Старіння	530—540 220—235	4—6 3-4	Вода (при 70 - 90°С) Повітря
2	Стабілізувальне старіння	200—220	3—6	
3	ТЦО	40—190 80—150	0,5—1,0 1—2	Повітря або рідина Повітря або рідина, при третьому циклі повітря
4	Стабілізувальне старіння	115—125	3—5	Повітря

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мікроструктура сплаву в литому стані характеризується наявністю α -твердого розчину на основі алюмінію, включень кремнію у вигляді частинок, а також інтерметалідних фаз, таких як Al_3Fe , $AlSiFe$ та $AlSiFeMn$. Формування та присутність цих фаз зумовлюється кількісним і якісним складом домішок, які потрапляють до сплаву під час плавлення або у процесі вторинного перероблення. Субмікроскопічні частинки фази Mg_2Si , попри їх наявність у структурі, не можуть бути виявлені за допомогою традиційного оптичного мікроскопа через їх надзвичайно малі розміри, що вимагає застосування методів електронної мікроскопії для детального аналізу.

Під час дослідження мікроструктури литого алюмінієвого сплаву необхідно звертати особливу увагу на розмір, морфологію та форму частинок кремнію, які входять до складу евтектики. Саме ці характеристики є основними індикаторами ступеня модифікування сплаву (рис. 1.7, а, б) і можуть слугувати показником правильності дотримання технологічного режиму плавки. Зокрема, значне перевищення рекомендованої температури розплаву негативно впливає на мікроструктуру, оскільки призводить до укрупнення кремнієвих частинок. Це, у свою чергу, спричиняє зниження міцнісних характеристик і пластичності литих виробів, що може негативно позначитися на їх експлуатаційних властивостях.

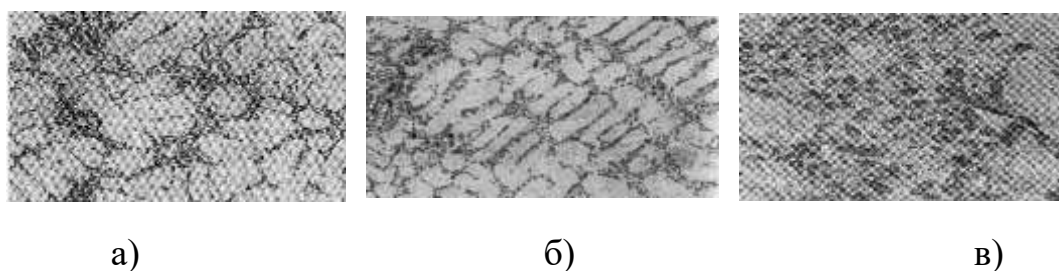


Рис. 1.7 Структура сплаву АЛ9

а – литий немодифікований, $\times 100$; б – литий модифікований, $\times 100$;
в – термічно оброблений за режимом Т5, фаза $AlFeSi$, $\times 500$

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після проведення термічної обробки, зокрема гартування з температури 535 °С, у мікроструктурі сплаву спостерігається процес сфероїзації частинок кремнію, що входять до складу евтектики. Крім того, фаза Mg_2Si переходить у твердий розчин на основі алюмінію, що свідчить про ефективне формування пересиченого твердого розчину. У структурі термічно обробленого сплаву також фіксується наявність фаз, які містять залізо, ідентифікованих як характерні включення різної форми та розміру (рис. 1.7, в).

Підвищення температури нагрівання під час гартування супроводжується помітною зміною морфології кремнію в евтектичній структурі. При перевищенні допустимого температурного діапазону спостерігається явище перепалу сплаву, яке супроводжується значним укрупненням частинок кремнію, втратою їх сфероїдної форми, а також процесами виплавлення та подальшої перекристалізації евтектики (рис. 1.8, а–в). Такі структурні зміни можуть суттєво знижувати механічні властивості сплаву, зокрема міцність і пластичність, що особливо небажано для відповідальних литих деталей.

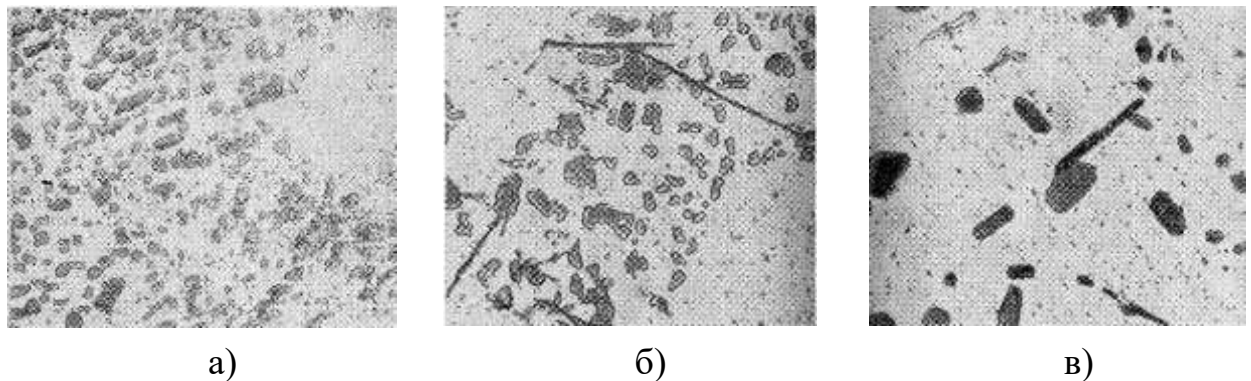


Рис. 1.8 Зміна структури сплаву АЛ9 а – 545°С, б – 550°С, в – 570°С

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріал АК7 (АЛ9)

Для виготовлення головки циліндра автомобільного двигуна було обґрунтовано обрано сплав АК7 (альтернативне позначення — АЛ9), який характеризується збалансованим поєднанням ливарних, механічних та термічних властивостей. Цей сплав належить до групи алюмінієво-кремнієво-магнієвих композицій (Al-Si-Mg) і широко застосовується в автомобільній промисловості завдяки своїй високій технологічності, зносостійкості та здатності до термічного зміцнення.

Його типовий хімічний склад та механічні характеристики в стані постачання (тобто у вигляді відливок) регламентуються стандартом ДСТУ 2839-94 (аналогічний ГОСТ 1583-93) та наведені у таблицях 2.1 та 2.2 відповідно. Ці дані є базовими для подальшого аналізу відповідності матеріалу вимогам до надійності та довговічності експлуатації деталей двигуна.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сплаву

Вміст елемента, мас. %								
Fe	Si	Mn	Ni	Al	Cu	Mg	Zn	домішки
до 1,3	6 - 8	0,2 – 0,6	до 0,3	87,6 – 93,6	до 1,5	0,2 – 0,5	до 0,5	всього 3,3

Таблиця 2.2 – Механічні властивості сплаву

σ_B , МПа	δ , %	НВ, МПа
127-196	0,5-1,0	50-75

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Макроскопічний аналіз

Макроскопічний аналіз включає комплекс досліджень структури металів, що проводиться шляхом візуального огляду їхніх зламів або спеціально підготовлених поверхонь (макрошліфів). Огляд виконується неозброєним оком або з використанням оптичних приладів з невеликим збільшенням, яке зазвичай не перевищує 30-кратного [53]. Цей метод дає змогу загалом оцінити якість матеріалу, своєчасно виявити макродефекти, визначити тип і характер попередньої технологічної обробки, що може включати лиття, обробку тиском, механічне різання, зварювання, наплавлення, термічну та хіміко-термічну обробку, а також інші технологічні процеси. Крім того, метод дозволяє виявити структурну та хімічну неоднорідність, волокнистість, а також проаналізувати причини та механізм руйнування матеріалу. Спостережувана за цих умов макроструктура фіксується за допомогою фотознімків або креслень для подальшого документування [53].

Макроаналіз забезпечує можливість оперативної оцінки стану великих ділянок поверхні матеріалу або окремої деталі, що дозволяє обрати типові зони для подальшого мікроструктурного аналізу. Процес дослідження охоплює огляд зламів, макрошліфів, а також зовнішніх поверхонь заготовок і готових деталей [25].

До поверхневих макродефектів, які можуть виникати на поверхні виробів, особливо відлитої за допомогою ливарних технологій, належать такі типові дефекти:

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Пригар, що утворюється як тверда, міцно зчеплена кірка на поверхні вилівка, внаслідок фізико-хімічної взаємодії металу з формувальною сумішшю та залишками шлаку;
- Усадочні пустоти (раковини та пори), які з'являються через зменшення об'єму металу під час його охолодження і тверднення;
- Газові раковини (бульбашки), що формуються при кристалізації металу через підвищену газонасиченість або проникнення газів із форми у металевий розплав;
- Ужимини – порожнини, які можуть бути частково або повністю заповнені формувальним матеріалом;
- Тріщини, які виникають у результаті дії значних внутрішніх напружень у вилівках, що виникають через опір форми усадці та різну швидкість охолодження окремих частин заготовки;
- Неметалеві включення, що утворюються внаслідок взаємодії компонентів сплаву (наприклад, заліза) з розчиненими в ньому газами, такими як кисень, сірка, азот, або через потрапляння шлаку й частинок формувальної суміші при руйнуванні форми [25].

2.3. Мікроскопічний аналіз

Мікроскопічний аналіз, або мікроаналіз, є важливим процесом дослідження мікроструктури металів та сплавів із використанням різноманітних мікроскопічних методик. Оптичні мікроскопи забезпечують збільшення в межах від 50 до 1500 разів, тоді як електронні мікроскопи дозволяють досягати надзвичайно високого збільшення — до 100000 разів і більше [25], що дає змогу вивчати найдрібніші елементи структури матеріалу.

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Існує тісний, прямий зв'язок між мікроструктурою металів і сплавів та їхніми фізико-механічними властивостями. Завдяки мікроаналізу можливо встановити форму, розміри, просторове розміщення та відносний об'ємний вміст окремих зерен, фаз і структурних складових. Крім того, цей метод дозволяє виявити мікродфекти, включення сторонніх частинок та оцінити властивості досліджуваних матеріалів. Мікроаналіз також дає змогу визначити характер попередньої технологічної обробки, такої як лиття, механічне деформування або термічна обробка.

Для проведення мікроскопічного аналізу використовують спеціально підготовлені зразки, що називаються мікрошліфами. Їх виготовляють шляхом вирізання зразка з контрольованої ділянки деталі, подальшої обробки на металорізальному верстаті, а потім послідовного шліфування й полірування до дзеркального блиску, необхідного для якісного відбиття світла.

Структуру металу досліджують за допомогою мікроскопа у відбитому світлі, що дозволяє побачити розподіл фаз, зерен і включень. Мікроструктура зразка вивчається і фіксується за допомогою спеціального стаціонарного металографічного мікроскопа, що забезпечує високу точність і достовірність результатів спостереження.

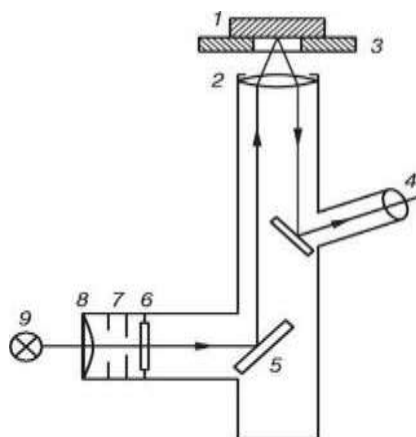


Рис. 2.1 – Структурна схема металографічного мікроскопа [24]

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Світло від джерела освітлення (рис. 2.1), зазвичай лампи розжарювання або галогенної лампи, проходить через збиральну лінзу-колектор 8, апертурну та польову діафрагми 7, а також через світлофільтр 6. Після цього, відбившись від нахиленого дзеркала 5, воно прямує крізь об'єктив 2 до об'єкта 1 [24]. У процесі спостереження об'єкт розміщується безпосередньо над об'єктивом на спеціальному предметному столику 3 та відбиває світло у напрямку до фронтальної лінзи об'єктива.

Коли світловий пучок падає на поверхню об'єкта, змінне електромагнітне поле, властиве світловій хвилі, зумовлює коливання електронів у речовині, з якої складається об'єкт. Ці електрони, в свою чергу, випромінюють вторинні електромагнітні хвилі. Явище відбиття й заломлення світла виникає внаслідок інтерференції між цими вторинними хвилями та первинною хвилею, що падає. Інтерференція когерентних хвиль призводить до підсилення інтенсивності при збігу фаз (конструктивна інтерференція) і до ослаблення при протифазі (деструктивна інтерференція), що створює просторову картину максимумів і мінімумів інтенсивності. У металах, завдяки наявності електронного газу, характерного для металевого типу зв'язку, вторинні хвилі, породжені коливаннями вільних електронів, забезпечують інтенсивне відбите випромінювання, інтенсивність якого може досягати до 95% від початкового потоку.

Контрастність зображення визначається різницею яскравості між об'єктом і фоном. Якщо ця різниця становить менше 3–4%, зображення буде непомітним як для людського ока, так і для фотоплівки або сенсора, навіть за наявності мікроскопа з достатнім роздільним потенціалом. На контраст значною мірою впливають не лише оптичні характеристики об'єкта, що змінюють відбитий або пропущений світловий потік, а й здатність оптичної системи точно передавати ці відмінності в яскравості.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Спостережна система мікроскопа забезпечує масштабування об'єкта, яке може бути корисним, неінформативним або загальним. Вона складається з об'єктивів, системи призми і окуляра в монокулярній або бінокулярній конфігурації. У разі використання бінокулярної насадки до оптичної системи додатково входять призменний блок і допоміжні елементи.

Об'єктив формує зворотне, тобто перевернуте, дійсне зображення досліджуваного об'єкта. Це зображення є корисним, оскільки забезпечує високий рівень деталізації, недоступний при спостереженні неозброєним оком. Призма, як правило, відхиляє світлові промені під кутом 45° , що робить користування мікроскопом зручнішим і ергономічним [25]. Для подальшого розгляду сформованого об'єктивом зображення використовується окуляр, який створює пряме уявне збільшення — подібно до лупи. Однак це збільшення часто вважається марним або «сліпим», оскільки воно не відкриває нових деталей зображення, не підвищуючи роздільної здатності.

Загальне оптичне збільшення мікроскопа визначається як добуток кратності збільшення об'єктива на збільшення, яке забезпечує окуляр.



Рис. 2.2 Мікроскоп [25]

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окрім традиційної оптичної мікроскопії, для виявлення значно дрібніших структурних особливостей матеріалів широко використовується електронна мікроскопія. Зокрема, скануючий електронний мікроскоп (СЕМ) TESCAN, обладнаний приставкою для енергетично-дисперсійного рентгенівського аналізу INCA Energy EDX (Oxford Instruments, Велика Британія), застосовується для проведення детального морфологічного аналізу поверхонь досліджуваних зразків. Такий підхід дозволяє з високою точністю досліджувати топографію поверхні, а також виявляти характерні особливості мікрорельєфу.

Крім того, електронна мікроскопія дає змогу не лише візуалізувати найдрібніші елементи структури, але й досліджувати просторове розміщення та хімічний склад мікродисперсних частинок у матеріалі. Це особливо важливо для аналізу структури складних технічних сплавів, у яких критичну роль відіграють фазові включення, локальні неоднорідності та мікродфекти, що не завжди можуть бути виявлені за допомогою оптичних методів.

2.4 Методика випробувань на розтяг

Методика проведення випробувань на розтяг призначена для визначення ключових механічних характеристик металевих матеріалів, зокрема таких як границя пропорційності, границя пружності, границя текучості, границя міцності, відносне видовження та відносне звуження після розриву зразка за умов кімнатної температури. Проведення подібних досліджень регламентується чинним стандартом ДСТУ EN ISO 6892-1:2022, який встановлює вимоги до випробувань металів і їхніх сплавів на розтяг.

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Процедура підготовки зразків передбачає вирізання заготовок із матеріалу за допомогою різних технологічних процесів, зокрема використання металорізальних верстатів, а також методів кисневого або анодно-механічного різання. При цьому обов'язковим є дотримання встановлених вимог щодо розмірів зразків та їх орієнтації відносно основної заготовки, як це визначено у відповідній нормативно-технічній документації. З метою запобігання зміні структури та механічних властивостей металу внаслідок локального нагріву чи наклепу, виготовлення зразків слід виконувати переважно на металорізальних верстатах із забезпеченням оптимальних умов різання — зокрема застосуванням охолоджувальної рідини та вибором відповідних режимів обробки.

Безпосередньо самі випробування на розтяг проводяться із застосуванням пропорційних циліндричних зразків (див. рис. 2.3), які мають діаметр робочої частини 3,0 мм та початкову розрахункову довжину, яка визначається за формулою $l_0 = 5,65\sqrt{S_0}$ і становить у цьому випадку 5,65 мм. Для забезпечення високої точності вимірювань зразки повинні бути правильно виготовлені, відшліфовані та чітко розмічені по довжині.

Перед проведенням випробування необхідно визначити початкову площу поперечного перерізу F_0 , яка обчислюється шляхом вимірювання діаметра зразка в щонайменше трьох різних точках. Отриману розрахункову довжину l_0 округлюють у більший бік для уніфікації результатів. Крім того, важливо відмітити точне місце розриву зразка після випробування та визначити відносне рівномірне видовження δ_p , для чого рекомендується наносити контрольні мітки через кожні 5 мм вздовж осі зразка.

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

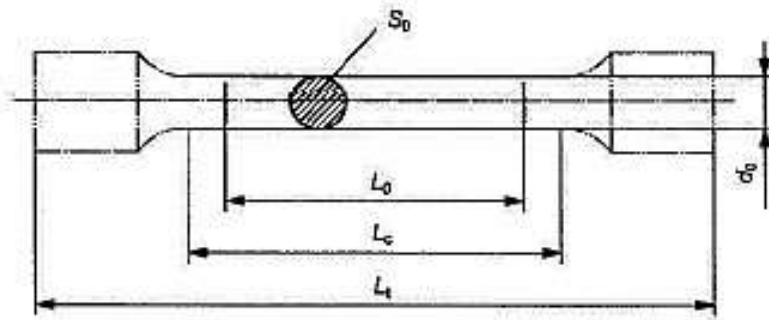


Рис. 2.3 Зразок циліндричний для випробування на розтяг [25]

Завершальним, фінальним етапом випробування є побудова діаграми розтягу (див. рис. 2.4), яка дає змогу наочно оцінити усі вищезазначені механічні характеристики матеріалу. Така діаграма відображає зміну деформаційного стану зразка під дією навантаження і дозволяє точно визначити ключові параметри, зокрема границю текучості, границю міцності, а також величину відносного видовження та звуження після розриву.

У процесі побудови діаграми розрізняють два типи нормальних напружень: умовні (інженерні) нормальні напруження σ та істинні нормальні напруження S . Вони визначаються відповідно до різних підходів і формул — залежно від поточного прикладеного навантаження та площі поперечного перерізу зразка. Умовні напруження обчислюють, виходячи з початкової площі перерізу, тоді як істинні враховують фактичне зменшення цієї площі в процесі деформації. Це дозволяє точніше описати поведінку матеріалу на етапах значних пластичних деформацій і безпосередньо перед розривом.

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_0}$$

де P_i – навантаження, (Н); F_0 – початкова площа, m^2 (mm^2).

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМУ ОБРОБКИ СПЛАВУ АК7 (АЛ9), ПРИ ВИГОТОВЛЕННЯ ГОЛОВКИ БЛОКУ ЦИЛІНДРІВ ДВЗ

3.1 Розробка режиму обробки головки циліндрів

Метою даної роботи є оптимізація режиму термічної обробки литого алюмінієвого сплаву марки АК7, що дозволяє забезпечити підвищення показників міцності готових виробів, виготовлених з цього сплаву, на рівні 10–12% порівняно з вихідними значеннями.

Маршрутну технологію виготовлення головки циліндрів двигуна внутрішнього згоряння зі сплаву АК7 наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технологія виробництва головки

Послідовність операцій	Схема процесу для деталей
1	Отримання відливки
2	Термічна обробка за рекомендованим режимом
3	Механічне обробка із залишенням припуску до 0,5 мм
4	Завершальна механічна обробка

Для досліджуваного силуміну окремий режим гомогенізаційного відпалу з метою усунення наслідків нерівноважної кристалізації не призначався. Процес гомогенізації було поєднано з операцією гартування при температурі 540 °С з витримкою протягом 6–7 годин, що дозволило досягти повного розчинення фази Mg_2Si , часткового розчинення кремнію (Si), а також забезпечило гомогенізацію твердого розчину. Крім того, це сприяло подрібненню і частковій сфероїдизації частинок евтектичного кремнію, що підтверджується результатами мікроструктурного аналізу (рис. 3.1).

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 3.1 Сплав АК7 після гартування з 540°C

Операцію старіння здійснювали при температурах 150 °С, 175 °С і 200 °С із витримкою в межах від 1 до 7 годин з інтервалом 1 година, після чого було проведено відповідні механічні випробування для оцінки впливу режимів старіння на властивості сплаву (рис. 3.2, табл. 3.2).

Таблиця 3.2 Відносне видовження АК7 від температури та тривалості

Тривалість старіння, год	Відносне видовження, %		
	Температура старіння, °С		
	150	175	200
1	9,6	6,7	4,7
2	11,1	6,5	5,5
3	7,6	10,4	7,2
4	12,6	4,7	8,2
5	7,2	4,0	4,8
6	5,2	4,6	7,3
7	5,6	4,8	4,5

Аналіз отриманих результатів проведених експериментальних досліджень свідчить про те, що режим старіння при температурі 175 °С із

тривалістю витримки 6–7 годин забезпечує оптимальне поєднання високих показників міцності (HRB 86–89 та $\sigma_s = 233\text{--}246$ МПа) і достатньої пластичності ($\delta = 4,6\text{--}4,8\%$) для загартованого алюмінієвого сплаву АК7. Такий режим термічної обробки виявився найбільш ефективним серед досліджених.

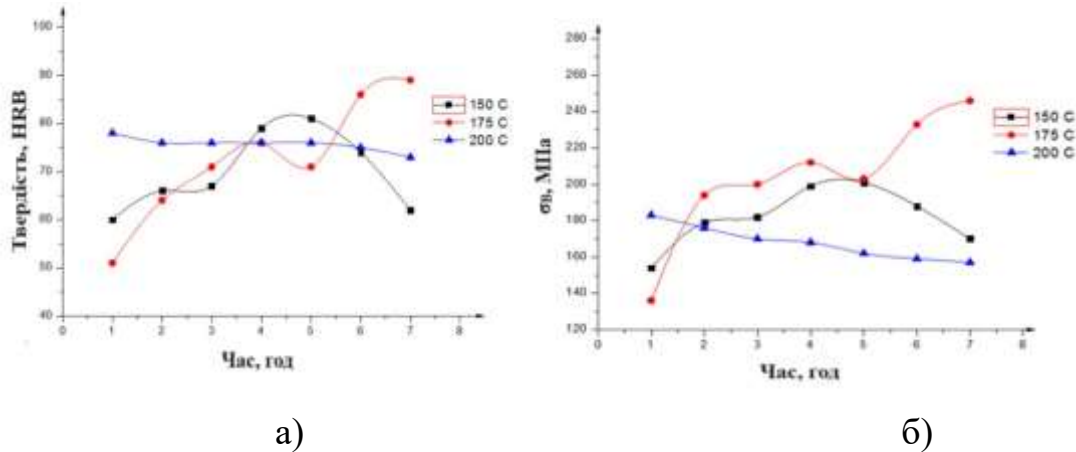


Рис. 3.2 Зміна механічних властивостей сплаву АК7 залежно від часу та тривалості старіння

У мікроструктурі сплаву АК7 після застосування зазначеного режиму спостерігається руйнування суцільної сітки евтектики, помітне подрібнення кремнієвої фази, а також значно рівномірніший розподіл цієї фази по всій площині поперечного перерізу зразка (рис. 3.3), що позитивно впливає на експлуатаційні характеристики матеріалу.

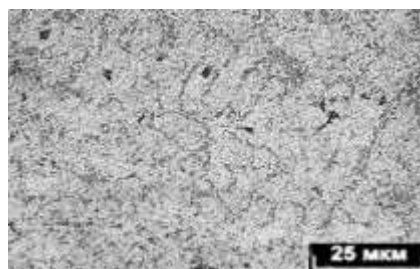


Рис. 3.3 Структура сплаву після гартування 540°C та старіння 175°C

Важливою експлуатаційною властивістю алюмінієвих сплавів, зокрема й АК7, є їхня стійкість до міжкристалітної (МКК) та розшарувальної корозії (РСК), які можуть істотно впливати на довговічність виробів.

Стійкість сплаву АК7, який був підданий термічній обробці для досягнення максимальної міцності, досліджували згідно зі стандартними методиками. Для оцінки схильності до МКК використовували металографічний аналіз при збільшенні в 200 разів. Результати дослідження показали, що розповсюдження МКК по всьому поперечному перерізу зразків не спостерігається. Було виявлено лише окремі локальні ділянки з проявами МКК.

Характер МКК у сплаві АК7 є інтеркристалітним, тобто тріщини проходять уздовж меж зерен, спричиняючи утворення в цих зонах пухких, маломіцних продуктів корозії й поодиноких пігментів. Глибина проникнення МКК є відносно незначною і становить приблизно 24 мкм.

Порівняльну оцінку механічних властивостей сплаву АК7 після застосування запропонованого режиму термічної обробки та штатного режиму наведено в таблиці 3.2, а відповідні графіки подано на рис. 3.4.

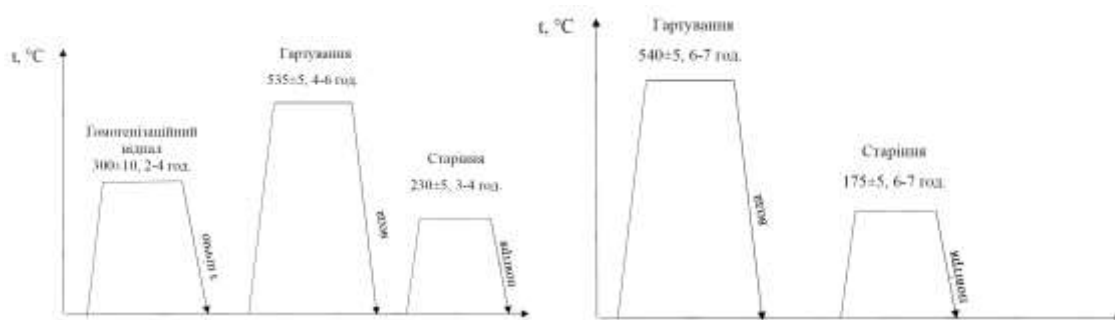


Рис. 3.4 Графіки режимів обробки

Випробування на РСК проводили шляхом візуального огляду торцевих поверхонь зразків після експозиції в корозивному середовищі. Уже через 8–11 діб спостерігалось утворення поодиноких поверхневих заглиблень (виразок) діаметром менше 1 мм. Після завершення 12-добового випробування, крім

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виразок, зафіксовано появу незначної тріщини завдовжки близько 1,5 мм. Такий рівень пошкоджень відповідає мінімальному 3–4 балу за шкалою оцінки РСК.

Аналіз результатів, наведених у таблиці 3.3, свідчить про те, що застосування запропонованого режиму термічної обробки сприяє підвищенню міцності литого алюмінієвого сплаву АК7 на 10–12% у порівнянні зі стандартним (штатним) режимом термообробки. Окрім зростання межі міцності, запропонований режим забезпечує збереження відносного видовження на досить високому рівні, що є критично важливим показником для експлуатаційної надійності.

Таке поєднання підвищеної міцності та достатньої пластичності повністю відповідає вимогам до механічних властивостей, які висуваються до відповідальних деталей, зокрема головок циліндрів двигунів внутрішнього згоряння сучасних автомобілів.

Таблиця 3.3 Порівняльна оцінка механічних характеристик після запропонованого і штатного режиму обробки

Механічні характеристики	Режим термічної обробки	
	штатний	запропонований
σ_B , МПа	216-220	233-246
δ , %	4,8-7,0	4,6-4,8

3.2 Обладнання процесів термічної обробки

Для здійснення термічної обробки головок циліндрів у масштабах масового виробництва на більшості автомобільних підприємств

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосовуються спеціалізовані автоматизовані термічні лінії або агрегати, які забезпечують повний цикл обробки. Однак такі лінії мають високу вартість і не завжди придатні для обробки широкої номенклатури деталей різної форми та призначення. Тому для гартування зазначених деталей економічно доцільним є застосування електротермічного агрегату СНОА 15.15.10/6 (рис. 3.5), який забезпечує високу якість обробки при відносно помірних витратах.

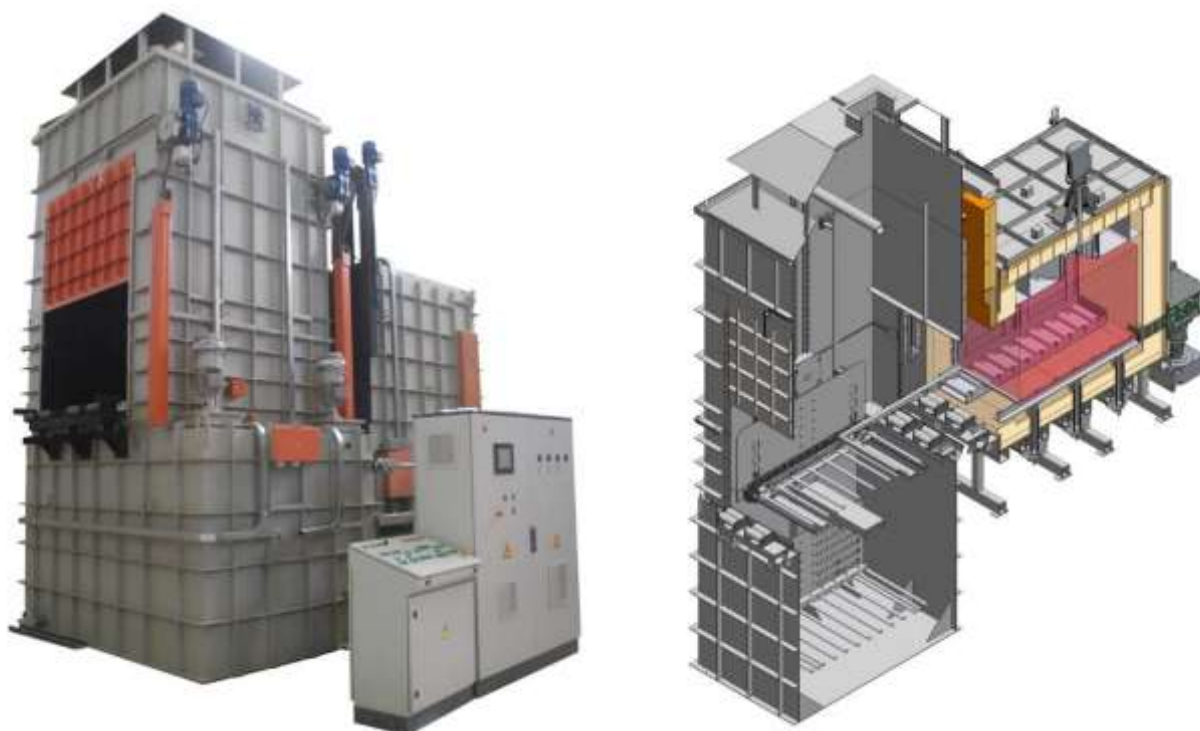


Рис. 3.5 Електротермічний агрегат СНОА 15.15.10/6

До складу цього агрегату входять: камерна електропіч опору для нагрівання за температурного режиму гартування; водяний гартівний бак; транспортно-завантажувальний механізм для переміщення деталей; система замкнутого повітряного охолодження води в гартівному баку; піддон для встановлення виробів; а також система управління з можливістю реєстрації параметрів процесу.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розміри робочого простору печі та гартівного баку становлять: довжина — 1500 мм, ширина — 1500 мм, висота — 1000 мм; при цьому максимальна температура нагрівання досягає 600 °С.

Електропіч оснащена системою примусової циркуляції пічної атмосфери, що забезпечує активний рух нагрітого повітря через завантаження у камері. Це дозволяє досягати рівномірного розподілу температури по всьому об'єму робочої зони з відхиленням не більше ± 5 °С. Процес нагріву печі й садки відбувається переважно за рахунок теплового випромінювання та конвекції, що виникають від електронагрівальних елементів, розташованих уздовж бокових стінок і на поду печі.

Гартівна ванна являє собою герметично зварену ємність, виготовлену з листової та профільної сталі, всередині якої розміщені вузли підігріву, охолодження та інтенсивного перемішування гартівної рідини. Вузол підігріву обладнаний електричними ТЕНами, які забезпечують нагрів води або іншої рідини до заданої температури, необхідної для ефективного гартування. Водночас вузол охолодження містить високоефективний пластинчастий теплообмінник і насос, що забезпечує циркуляцію та відведення надлишкового тепла. Енергійне перемішування рідини у ванні здійснюється спеціальними мішалками, що створюють турбулентний потік, завдяки якому досягається рівномірне охолодження загартованих деталей.

Завдяки мінімізації часу між завершенням нагріву й початком гартування, тобто швидкому перенесенню деталей з печі до гартівного баку, на їх поверхні утворюється менше оксидів, а рівень залишкових напружень помітно знижується, що сприяє підвищенню якості обробки.

Транспортно-завантажувальний механізм агрегату складається з комплексу електроприводів і тяг, які забезпечують послідовне завантаження садки з деталями на піддоні з тамбура до камери печі, а після завершення

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нагріву — вивантаження садки на позицію над гартівним баком для подальшого загартування. Керування всіма операціями завантаження та розвантаження здійснюється за допомогою кнопок, розміщених на панелі керування в шафі.

Система регулювання температурного режиму має двоканальне управління: з панельного комп'ютера та з традиційного блоку кнопок. Панельний комп'ютер використовується для візуального контролю параметрів процесу, керування режимами, моніторингу роботи контролера, а також для збереження (архівації) отриманих даних із датчиків. Керування здійснюється шляхом натискання інтерактивних піктограм на сенсорному дисплеї панелі з подальшим підтвердженням увімкнення або вимкнення конкретного пристрою чи запуску заданої макрокоманди.

Для реалізації операції штучного старіння виробів було обрано конвеєр НК 17.17.18/2 ИЗ П (рис. 3.6), який відповідає вимогам до рівномірного прогріву та контролю температурного режиму. Розміри його робочого простору становлять: довжина — 1700 мм, ширина — 1700 мм, висота — 1800 мм; максимальна температура нагріву, яку забезпечує обладнання, дорівнює 200 °С.



Рис. 3.6 Електропід-конвеєр НК 17.17.18/2 ИЗ П

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відмінною конструктивною особливістю печей цього типу є забезпечення високої рівномірності розподілу температури по всьому об'єму робочої камери, що є надзвичайно важливим для якісної термічної обробки. Конструкція печі виконана у вигляді жорсткого звареного каркасу, виготовленого з металевих профілів, який зсередини зафутерований сучасною волокнистою теплоізоляцією з підвищеними теплоутримувальними властивостями.

У ролі нагрівальних елементів застосовуються високоефективні трубчасті електронагрівачі (ТЕНи), що забезпечують інтенсивний теплообмін, переважно за рахунок конвекційного перенесення тепла з поверхні нагрівального елемента до повітряного середовища робочої камери. Камеру, де безпосередньо здійснюється нагрівання садки з деталями, формують металеві екрани, за якими розташовані нагрівальні елементи, що дозволяє рівномірно розподіляти тепло.

У верхній частині робочого об'єму, під склепінням камери, встановлено потужні відцентрові вентилятори, які створюють направлену циркуляцію гарячого повітря в межах усїєї камери. Це дозволяє досягти високого ступеня однорідності температурного поля по всьому об'єму робочого простору, що є критично важливим при термічній обробці великогабаритних або складних за формою деталей.

Печі обладнані двонаправленим ланцюговим транспортером, конструктивно виконаним з привідної та натяжної станцій, ланцюга, а також платформи для встановлення садки. Ця платформа монтується безпосередньо на ланцюг транспортера, який забезпечує переміщення вантажу в межах печі. Для зручності технологічного процесу передбачено реверсивне переміщення транспортера — зміна напрямку руху для полегшення завантаження і вивантаження.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Електропечі подібної моделі можуть мати як прохідну конструкцію (з механізованими дверима з обох боків), так і тупикову (з дверима лише з одного боку). Відкривання і закривання дверей виконується за допомогою ланцюгової передачі, що гарантує надійність і плавність руху.

Робочий простір печі зазвичай розділений уздовж по довжині на кілька типових зон. У кожній із цих зон здійснюється контроль і підтримка температури, що забезпечується за допомогою термопар, встановлених на бічних стінках. Це дозволяє точно регулювати параметри нагрівання в кожному сегменті печі, підтримуючи необхідний тепловий режим.

З метою підвищення безпеки в конструкції печі передбачена система аварійного автоматичного вимкнення, яка спрацьовує у випадку перевищення встановленої максимально допустимої температури в будь-якій частині робочої камери.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Під час експлуатації автомобілів більшість їхніх деталей зазнають інтенсивного зношування внаслідок дії сил тертя, агресивних корозійних середовищ та низки інших впливів. Крім того, багато конструктивних елементів піддаються значним змінним динамічним навантаженням, які виникають як наслідок згоряння паливної суміші у камерах згоряння двигунів внутрішнього згоряння, дії інерційних сил, порушення співвісності сполучених вузлів і механізмів, а також внаслідок резонансних коливань, вібрацій і ряду додаткових причин.

У сучасному автомобілебудуванні однією з важливих вимог є зниження маси транспортного засобу для підвищення його ефективності, економічності та динамічних характеристик. Завдяки меншій густині алюмінієві сплави дедалі частіше використовуються як альтернатива чавуну, який раніше був основним матеріалом для виготовлення деталей двигунів. Через складну просторову форму більшості моторних деталей для їх виробництва зазвичай застосовують саме ливарні алюмінієві сплави.

У даній роботі було розглянуто питання оптимізації технології термічної обробки головки циліндрів двигуна внутрішнього згоряння, виготовленої зі сплаву АК7 (інше позначення — АЛ9 або 356). Було запропоновано вдосконалений режим термічної обробки, що включає гомогенізацію, поєднану з гартуванням при температурі 540 °С з витримкою протягом 6–7 годин. Такий режим забезпечує повне розчинення зміцнювальної фази Mg_2Si , часткове розчинення кремнію, рівномірний розподіл легуючих елементів у твердому розчині, а також сприяє подрібненню та сфероїдизації частинок евтектичного кремнію.

Після гартування здійснювали старіння при температурі 175 °С упродовж 6–7 годин. Результати досліджень показали, що застосування такого

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

режиму термообробки дозволяє підвищити міцність литого сплаву АК7 на 10–12 % у порівнянні зі стандартною технологією термічної обробки. Крім того, забезпечується збереження відносного видовження на досить високому рівні, що відповідає вимогам, які висуваються до механічних властивостей деталей головок циліндрів сучасних автомобільних двигунів.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Марченко А.П., Рязанцев М.К., Шеховцов А.Ф. двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах. Т.1. розробка конструкції форсованих двигунів наземних транспортних машин // За ред. Проф. А.П. Марченка та засл. Діяча науки України проф. А.Ф. Щеховцова. – Харків, Прапор, 2004. – 384 с.
2. Тимченко І.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Муждобаєв М.Р. Автомобільні двигуни // За ред. І.І. Тимченка. – Харків. Основа, 1995. – 464 с.
3. Aluminium Alloys - New Trends in Fabrication and Applications. ред. Z. Ahmad // InTech. – 2012. <https://doi.org/10.5772/3354> .
4. Top 10 Uses of Aluminium in the Industry Today - Materials and Engineering Resources – Matmatch. Materials and Engineering Resources - Matmatch - Get the latest in materials science and engineering news, educational content and material use cases. <https://matmatch.com/blog/top-10-uses-of-aluminium-in-the-industry-today/>.
5. O. Securities. "High-end aluminum materials: taking the east wind of new energy, the demand has entered an explosive period," https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202108041508026499_1.pdf?1628096117000.pdf.
6. Varshney D, Kumar K. Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization // Ain Shams Engineering Journal. – 2021, 12(1). – 1143-1152.
7. Zhang J, Song B, Wei Q, et al. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends // Journal of Materials Science & Technology. – 2019, 35(2). – 270-284.

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Hu Zuqi. Research on fatigue behavior and corrosion properties of highstrength and toughness die-casting Al-Mg-Si-Mn alloy // Huazhong University of Science and Technology. – 2014.
9. Nash P, Singleton M F, Murray J L. ASM Handbook-Volume 03-Alloy Phase Diagrams. – 1992.
10. Yamagata H, Kasprzak W, Aniolek M, et al. The effect of average cooling rates on the microstructure of the Al–20% Si high pressure die casting alloy used for monolithic cylinder blocks // Journal of materials processing technology. – 2008, 203(1-3). – 333-341.
11. Kasprzak W, Sokolowski J H, Yamagata H, et al. Energy efficient heat treatment for linerless hypereutectic Al-Si engine blocks made using vacuum HPDC process // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2011, 20(1). – 120132.
12. ASTM B85-03, Standard Specification for Aluminum-Alloy Die Castings, ASTM International // West Conshohocken, PA. – 2003, www.astm.org.
13. Mondolfo L.F. Aluminum Alloys: Structure and Properties // Elsevier. – 2013. – 982 p.
14. Hsu C H. Process Performance Analysis and Improvement for the Manufacture of 6063 Aluminum Alloy // Metals. – 2020, 10(5). – 605.
15. Embury J.D., Lloyd D.J., and Ramachandran T.R. Strengthening mechanisms in aluminum alloys // Treatise on Materials Science & Technology. – 1989, Vol. 31. Elsevier. – 579-601.
16. Kostryzhev AG. Strengthening Mechanisms in Metallic Materials // Metals. – 2021; 11(7). – 1134. <https://doi.org/10.3390/met11071134>
17. Ning Kangqi, Peng Beishan, Sheng Zhijing, et al. Strengthening mechanism of high-strength aluminum alloys // Journal of Shaoyang University: Natural Science Edition. – 2012, 9(4). – Pp. 46-50.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						67
ЗМН.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Mahmoud M. Tash, Samuel F. H., Alkahtani Saleh. Machinability of HeatTreated 356 and 319 Aluminum Alloys: Methodology for Data Processing and Calculation of Drilling Force and Moment // Advanced Materials Research 396. – 2012. – Pp. 1008-1022. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.396398.1008>
19. Gebril M. A., Omar M. Z., Mohamed I. F., Othman N. K., Irfan O. M. Combining heat treatment and high-pressure torsion to enhance the hardness and corrosion resistance of A356 alloy // Metals. – 2022. 12(5). – Pp. 853. <https://doi.org/10.3390/met12050853>
20. Evangelia Georgantzia, Gkantou Michaela, Kamaris George S. Aluminium alloys as structural material: A review of research // Engineering Structures 227, 2021. 111372. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372>
21. Miller W.S., et al. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry // Materials Science and Engineering: A 280.1. 2000. Pp. 37-49. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00653-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00653-X)
22. Hirsch Jürgen. Aluminium Alloys for Automotive Application // Materials Science Forum. 1997, Vol. 242. – Pp. 33-50. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.242.33>
23. Hirsch Jürgen, Skrotzki Birgit, Gottstein Günter. Aluminum Alloys: The Physical and Mechanical Properties // Proceedings of the 11th International Conference on Aluminum Alloys, 22-26 Sep. 2008. – Aachen, Germany. – 2425 p.
24. Конспект лекцій з дисципліни «Методи структурного аналізу матеріалів» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» денної і заочної форм навчання / Укл. О.А. Глотка, Л.П. Степанова. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 90 с.
25. Ruska E. The Early Development of Electron Lenses and Electron Microscopy. – Hirzel, Stuttgart, 1980. – 23p.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

26. ДСТУ EN ISO 6892-1:2022. Металеві матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN ISO 6892-1:2019, IDT; ISO 6892-1:2019, IDT) [Текст]. Прийнято та надано чинності 2022-12-28. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 75 с.

27. Hirsch J., Skrotzki B., Gottstein G. (Eds.). Aluminium alloys: the physical and mechanical properties (Vol. 1) // John Wiley & Sons. – 2008. – 2383р.

					<i>КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ</i>	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					КРБМТВАТАМ 25. 21231.000. ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства**

Тема:

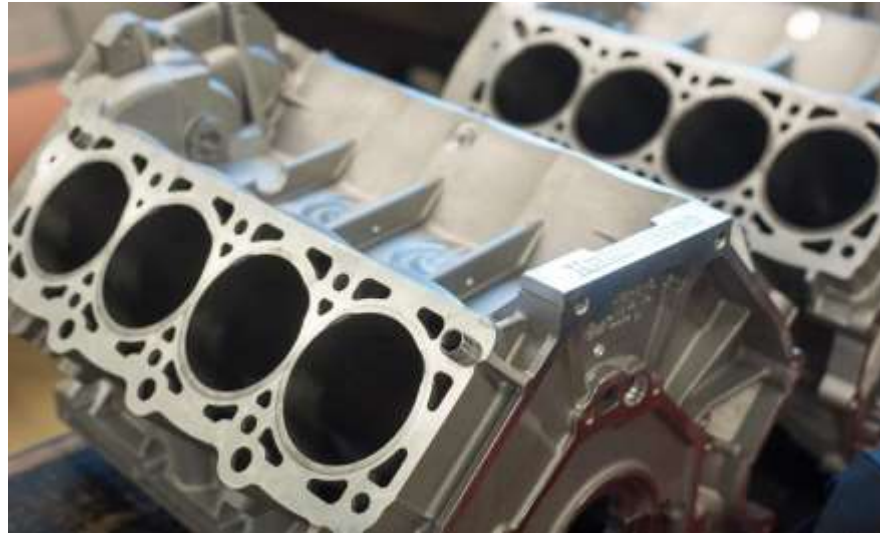
**Вдосконалення методів термічної обробки алюмінієвих
сплавів у виробництві автомобільних двигунів**

Спеціальність 132 – «Матеріалознавство»

Студент групи МТВА -21-1 Бунецький Костянтин

Керівник доц. Володимир Гончар

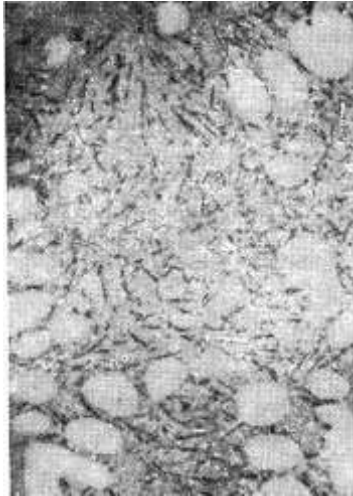
Блок циліндрів виготовлений з алюмінієвого сплаву



Порівняння основних марок алюмінієвих сплавів

Сплави серії	Країна	Марка	Вміст легуючого елемента, мас. %					Al
			Si	Cu	Mg	Fe	Mn	
Al-Si	Китай	YL101	9,0~10,0	<0,6	0,45-0,65	<1,0	≤0,6	решта
		YL102	10,0~13,0	<0,6	<0,05	<1,2	≤0,6	
	Японія	ADC1	11,0~13,0	<1,0	<0,30	<1,2	0,3	
	США	413	11,0~13,0	<1,0	<0,35	<2,0	0,35	
	Україна	АЛ12	10,0~13,0	<0,6	<0,10	<1,5	-	
	Німеччина	AlSi2	10,5~13,5	<0,12	<0,4	<1,2	≤0,4	
Al-Si-Mg	Китай	YL104	8,0~10,5	<0,30	0,17~0,30	<1,0	0,2~0,5	решта
	Японія	ADC3	9,0~10,0	<0,60	0,40~0,60	<1,3	0,3	
	США	360	9,0~10,0	<0,60	0,40~0,60	<2,0	0,35	
	Україна	АЛ4	8,0~10,5	<0,10	0,17~0,30	<1,0	-	
	Німеччина	AlSi10Mg	9,0~11,0	<0,10	0,20~0,50	<1,0	≤0,4	
Al-Si-Cu	Китай	YL112	7,5~9,5	3,0~4,0	<0,30	<1,2	≤0,5	решта
		YL113	9,6~12,0	1,5~3,5	<0,30	<1,2	≤0,5	
	Японія	ADC10	7,5~9,5	2,0~4,0	<0,30	<1,3	0,5	
		ADC12	9,6~12,0	1,5~3,5	<0,30	<1,3	0,5	
	США	380	7,5~9,5	3,0~4,0	<0,10	<1,3	0,5	
		383	9,5~11,5	2,0~3,0	<0,10	<1,3	0,5	
	Німеччина	AlSi9Cu3	8,0~11,0	2,0~3,5	0,1~0,5	<1,3	0,1~0,5	

Структури алюмінієвих сплавів



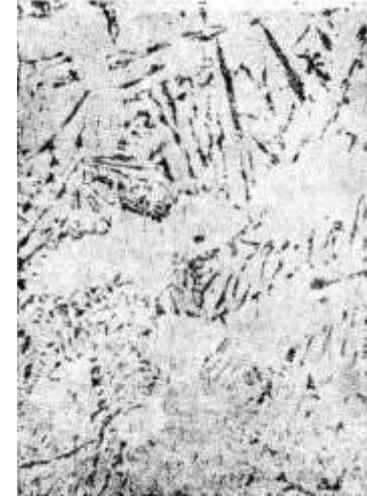
а)

а – Сплав із 10% Si; 1,5% Fe. Лиття під тиском. Травник H_2SO_4 , $\times 500$;



б)

б – Сплав з 5% Si; 0,2% Fe і з добавками фосфору. Без травлення, $\times 250$;



в)

в – Сплав із 10% Si; 0,9% Si; 0,6% Fe. Лиття в металеву форму. Травник H_2SO_4 , $\times 250$

Хімічний склад сплаву АК7 (АЛ9)

Вміст елементу, мас. %								
Fe	Si	Mn	Ni	Al	Cu	Mg	Zn	домішки
до 1,3	6 - 8	0,2 – 0,6	до 0.3	87,6 – 93,6	до 1,5	0,2 – 0,5	до 0,5	всього 3,3

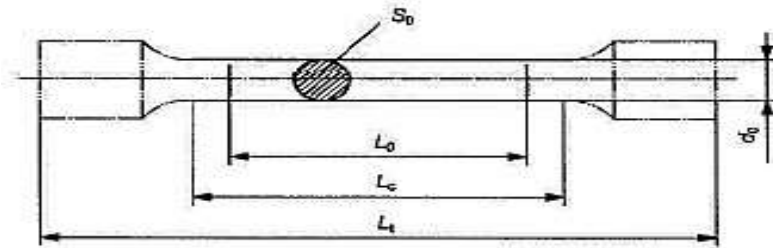
Механічні властивості сплаву АК7 (АЛ9)

σ_b , МПа	δ , %	НВ, МПа
127-196	0,5-1,0	50-75

Зміна механічних властивостей сплаву АЛ9 (АК7) залежно від режиму старіння

№ режиму	Режим старіння		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
	t, °C	τ , год			
1	150	3	217	169	4,3
2	150	5	223	189	4,1
3	175	3	225	196	2,7
4	175	5	227	197	2,9
5	200	0,5	230	191	4,5
6	200	1	230	188	4,5
7	200	5	236	194	4,5
8	150	1 + 1 год 200°C	239	190	4,1
9	200	1 + 1 год 150°C	237	192	4,5

Циліндричний зразок для проведення випробування на розтяг



d_0 – початковий діаметр робочої частини циліндричного зразка;

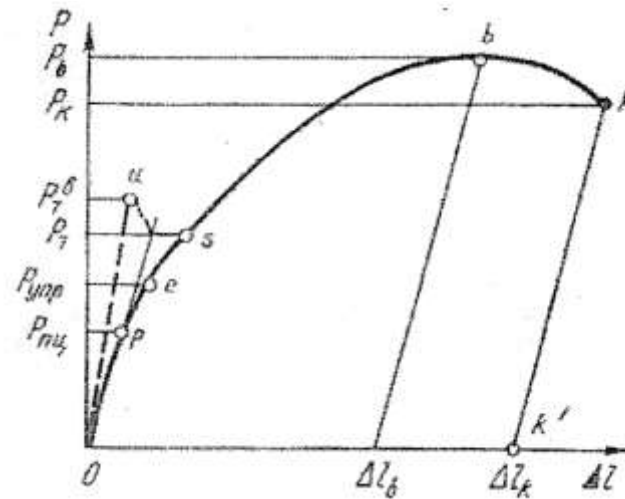
L_c – довжина робочої частини;

L_0 – початкова розрахункова довжина;

L_t – загальна довжина зразка;

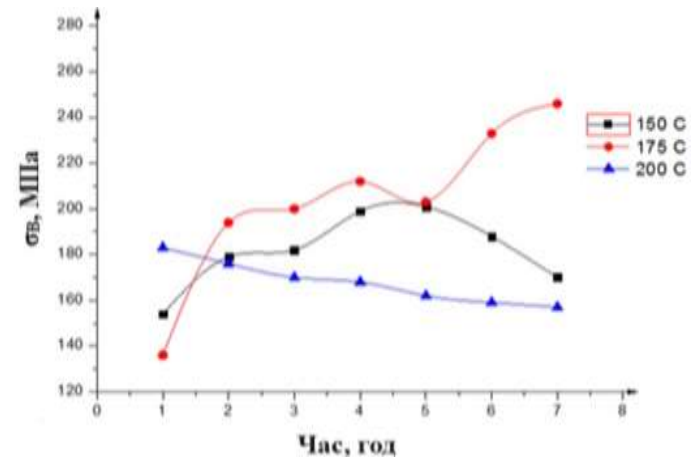
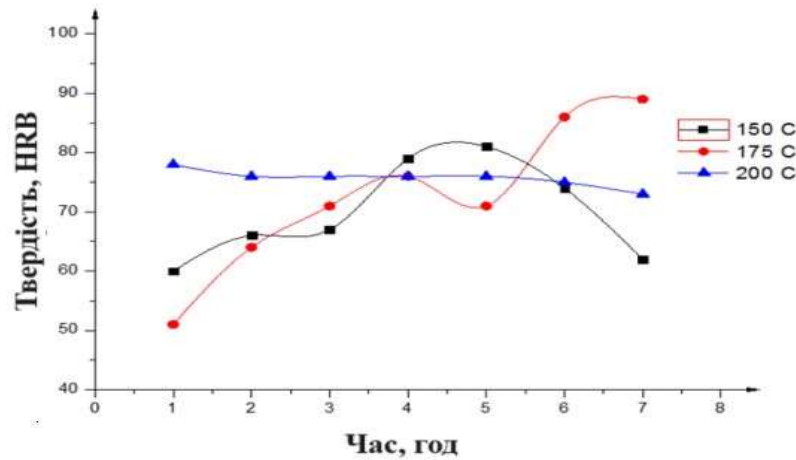
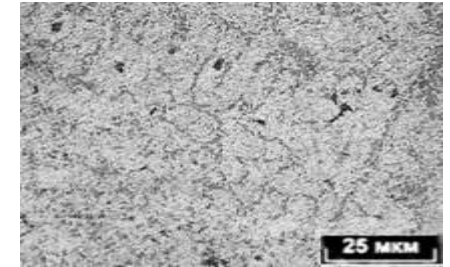
S_0 – початкова площа поперечного перерізу робочої частини зразка

Характерні точки на діаграмі розтягу, за допомогою яких розраховують характеристики міцності

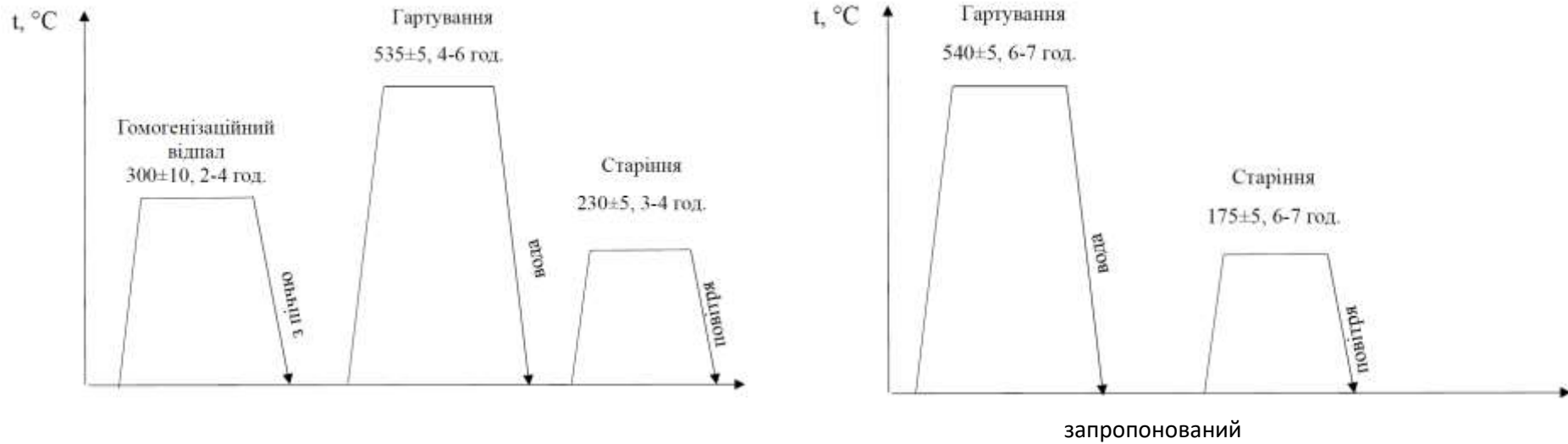


Зміна механічних властивостей сплаву АК7 залежно від часу та тривалості старіння, мікроструктура

Тривалість старіння, год	Відносне видовження, %		
	Температура старіння, °C		
	150	175	200
1	9,6	6,7	4,7
2	11,1	6,5	5,5
3	7,6	10,4	7,2
4	12,6	4,7	8,2
5	7,2	4,0	4,8
6	5,2	4,6	7,3
7	5,6	4,8	4,5



Порівняльна оцінка механічних характеристик сплаву АК7 після запропонованого і типового режиму термічної обробки



Механічна характеристика	Режим термічної обробки	
	штатний	запропонований
σ_b , МПа	216-220	233-246
δ , %	4,8-7,0	4,6-4,8

ВИСНОВКИ

У даній роботі було розглянуто питання оптимізації технології термічної обробки головки циліндрів двигуна внутрішнього згорання, виготовленої зі сплаву АК7 (інше позначення — АЛ9 або 356). Було запропоновано вдосконалений режим термічної обробки, що включає гомогенізацію, поєднану з гартуванням при температурі 540 °С з витримкою протягом 6–7 годин. Такий режим забезпечує повне розчинення зміцнювальної фази Mg_2Si , часткове розчинення кремнію, рівномірний розподіл легуючих елементів у твердому розчині, а також сприяє подрібненню та сфероїдизації частинок евтектичного кремнію.

Після гартування здійснювали старіння при температурі 175 °С упродовж 6–7 годин. Результати досліджень показали, що застосування такого режиму термообробки дозволяє підвищити міцність литого сплаву АК7 на 10–12 % у порівнянні зі стандартною технологією термічної обробки. Крім того, забезпечується збереження відносного видовження на досить високому рівні.

Дякую за увагу