

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра «Матеріалознавства та ливарного виробництва»

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри МЛВ

к.т.н., доцент

_____ Олександр КУЗИК

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

**«Розробка технології лиття в кокіль виливка
«Обойма» з дослідженням термодинаміки
процесів дисоціації карбонатів при
виробництві піноалюмінію»**

Виконав здобувач вищої освіти II-го

курсу групи ПМ-24М-1

ОПП «Прикладна механіка»

спеціальності 131 «Прикладна
механіка»

_____ Владислав КОНОВАЛЬЧУК

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____ Сергій КОНОНЧУК

Рецензент:

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет Механіко-технологічний
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 131 Прикладна механіка
Освітньо-професійна програма «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МЛВ

к.т.н., доцент

_____ Олександр КУЗИК

« ____ » _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА
ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

_____ Коновальчук Владислав Олександрович

1. Тема роботи: «Розробка технології лиття в кокіль виливка «Обойма» з дослідженням термодинаміки процесів дисоціації карбонатів при виробництві піноалюмінію»
2. Керівник роботи: Конончук Сергій Васильович, канд. техн. наук, доцент
3. Строк подання роботи до захисту: 15.12.2025 р.
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: розробка технології лиття в кокіль виливка «Обойма» з удосконаленням процесу виробництва піноалюмінію із застосуванням карбонатів. Виконати огляд існуючих типів ливарного обладнання для виготовлення виливків із алюмінієвих сплавів методом лиття в кокіль. Розробити технологію лиття в кокіль виливка «Обойма». Дослідити термодинамічні характеристики основних хімічних реакцій дисоціації карбонатів які протікають при плавці піноалюмінію. На основі отриманих результатів дослідження розробити рекомендації щодо удосконалення процесу виробництва піноалюмінію.
5. Перелік графічного матеріалу: 1) креслення деталі з нанесенням модельно-

ливарних вказівок; 2) права половина кокіля; 3) ліва половина кокіля; 4) креслення ливарної форми в зборі. _____.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Оглядовий	Конончук С.В.		
Технологічний	Конончук С.В.		
Науковий	Конончук С.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури по темі роботи	30.09.2025	
2	Розрахунки по технологічній частині	10.10.2025	
3	Креслення по технологічній частині	20.10.2025	
4	Розрахунки і дослідження по науковій частині	30.10.2025	
5	Плакати по науковій частині	10.11.2025	
6	Оформлення пояснювальної записки	20.11.2025	
7	Перевірка на анти плагіат	30.11.2025	
8	Оформлення рецензії	10.12.2025	
9	Захист дипломного проекту	20.12.2025	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис керівника

_____ Конончук С.В.

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис здобувача

_____ Коновальчук В.О.

Анотація

КОНОВАЛЬЧУК Владислав. Розробка технології лиття в кокіль виливка «Обойма» з дослідженням термодинаміки процесів дисоціації карбонатів при виробництві піноалюмінію. Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти: ЦНТУ, 2025. 72 с.

Обґрунтовано вибір ливарного обладнання та описано роботу ливарного цеху. Розроблено технологію лиття в кокіль виливка «Обойма». Досліджено термодинаміку процесів дисоціації карбонатів при виробництві піноалюмінію.

Актуальність роботи полягає у розробці технології лиття в кокіль виливка «Обойма» з використанням сучасного ливарного обладнання. На основі комп'ютерного аналізу термодинамічних характеристик хімічних реакцій дисоціації карбонатів досліджено умови утворення пор та розроблено рекомендації щодо удосконалення процесу виробництва піноалюмінію із застосуванням карбонатів.

Ключові слова: плавильна піч, кокільний верстат, алюміній, виливок, піноалюміній, дисоціація, карбонат, ентальпія, рівновага, термодинаміка.

Summary

KONOVALCHUK Vladyslav. Development of technology for casting the “Oboima” casting in a mold with research into the thermodynamics of carbonate dissociation processes in the production of foam aluminum. Qualification work for the second (master's) level of higher education: CUNTU, 2025. 72 p.

The choice of casting equipment is justified and the work of the foundry is described. The technology of die casting of the “Oboima” foundry is developed. The thermodynamics of carbonate dissociation processes in the production of foam aluminum is studied.

The relevance of the work lies in the development of the technology of die casting of the “Oboima” foundry using modern foundry equipment. Based on a computer analysis of the thermodynamic characteristics of the chemical reactions of carbonate dissociation, the conditions for pore formation are studied and recommendations are developed for improving the process of producing foam aluminum using carbonates.

Keywords: melting furnace, die casting machine, aluminum, casting, aluminum foam, dissociation, carbonate, enthalpy, equilibrium, thermodynamics.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1. ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ТА ОПИС РОБОТИ ЛИВАРНОГО ЦЕХУ	10
1.1. Розташування та режим роботи ливарного цеху	10
1.2. Плавильне відділення	11
1.3. Відділення лиття в кокіль	20
1.4. Відділення відрізки та обрубки ливників	25
1.5. Відділення фінішної очистки виливків	27
1.6. Допоміжні відділення	29
1.7. Висновки по розділу	31
2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ В КОКІЛЬ ВИЛИВКА «ОБОЙМА»	33
2.1. Аналіз конструкції деталі та технічних умов на виливок	33
2.2. Розробка технологічного процесу виготовлення виливка	34
2.3. Розрахунок та конструювання ливниково- живильної системи	38
2.4. Технологічний процес виготовлення виливка	44
2.5. Опис процесу проектування ливарного оснащення	47
2.6. Висновки по розділу	48
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІКИ ПРОЦЕСІВ ДИСОЦІАЦІЇ КАРБОНАТІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ПІНОАЛЮМІНІЮ	49
3.1. Перспективи використання піноалюмінію в промисловості	49
3.2. Основні методи отримання піноалюмінію	54
3.3. Обґрунтування застосування порофорів на основі карбонатів при виробництві піноалюмінію	56

3.4. Порівняльний аналіз пружності дисоціації карбонатів CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3	58
3.5. Висновки по розділу	65
ВИСНОВКИ	67
ЛІТЕРАТУРА	69
ДОДАТКИ	72

ВСТУП

Актуальність роботи. Ливарне виробництво є фундаментальною основою для машинобудівного комплексу, адже литі заготовки знаходять застосування абсолютно в усіх його галузях. Перевагою цього методу є можливість отримання деталей будь-якої складності з мінімальними потребами в подальшій механічній обробці, при цьому готові вироби демонструють високі експлуатаційні характеристики. Для ливарної справи характерне надзвичайне технологічне різноманіття: існує безліч способів лиття, процесів, обладнання та матеріалів. Ця різноманітність відображає як внутрішню складність самого процесу, так і широкий асортимент деталей, необхідних сучасній техніці. Сучасний розвиток галузі спрямований на покращення якісних показників: створення легших, точніших та складніших виливків шляхом використання високоміцних сплавів (в тому числі кольорових) та впровадження високоефективних технологій і оснастки. Ключовим напрямом розвитку ливарного виробництва є впровадження нових та оптимізація існуючих технологічних процесів. Головна мета цих змін – зменшення споживання сировини та енергії, зниження трудомісткості, підвищення продуктивності праці, покращення умов виробництва, мінімізація негативного впливу на довкілля та, як результат, зростання загальної ефективності виробництва.

Піноалюміній, завдяки своїй унікальній пористій структурі, має значні перспективи як легкий, енергопоглинаючий та ефективний ізоляційний матеріал. Його використовують в автомобільній промисловості (наприклад, для елементів безпеки, що поглинають удар), в аерокосмічній галузі для полегшення конструкцій, а також у будівництві як вогнестійкий звуко- та теплоізолятор. Додатковими сферами застосування є електромагнітне екранування, теплообмінники та основи для каталітичних нейтралізаторів, що обумовлено великою внутрішньою площею поверхні матеріалу та високою провідністю алюмінію. Незважаючи на багатообіцяючі властивості, комерціалізація піноалюмінію стикається з певними труднощами. Основною перешкодою є його

відносно висока собівартість порівняно з альтернативними матеріалами, такими як полімерні чи керамічні піни, що обмежує масове застосування. Існують також технологічні виклики, пов'язані з досягненням однорідної структури пор, що впливає на стабільність міцнісних характеристик. Ці виробничі обмеження та потреба у висококваліфікованому персоналі стримують ширше впровадження матеріалу. Таким чином, дослідження, спрямовані на удосконалення та здешевлення процесів виробництва піноалюмінію, залишаються вкрай актуальними.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є розробка технології лиття в кокіль виливка «Обойма» з дослідженням термодинаміки процесів дисоціації карбонатів при виробництві піноалюмінію.

Поставлена мета досягнута шляхом вирішення таких задач:

- вибір обладнання для виготовлення виливків та опис роботи цеху;
- розробка технології лиття в кокіль виливка «Обойма»;
- дослідження термодинамічних характеристик хімічних реакцій дисоціації карбонатів, що протікають при плавці піноалюмінію;
- розробка рекомендацій щодо удосконалення процесу виробництва піноалюмінію із застосуванням карбонатів.

Об'єкт дослідження – технологічний процес лиття в кокіль алюмінієвих сплавів.

Предмет дослідження – регулювання інтенсивності утворення пор варіюванням температури та тиску при плавці піноалюмінію.

Практичне значення – розроблені рекомендації дозволяють регулювати процес утворення пор в рідкому алюмінії за рахунок інтенсифікації хімічних реакцій дисоціації карбонатів.

Особистий внесок – розроблено технологію лиття в кокіль виливка «Обойма», виконано дослідження термодинамічних характеристик хімічних реакцій дисоціації карбонатів, що протікають при плавці піноалюмінію.

1. ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ТА ОПИС РОБОТИ ЛИВАРНОГО ЦЕХУ

1.1. Розташування та режим роботи ливарного цеху.

Розташування ливарного цеху значно впливає на вартість продукції. При виборі місця враховують обсяг, вагу та тип виливка, екологічність матеріалів, технологічне оснащення, можливості доставки матеріалів та відвантаження готової продукції, наявність енергетичних, матеріальних і трудових ресурсів. З урахуванням цих факторів доцільно розташувати ливарний завод на околиці міста, у промисловій зоні, відокремленій від житлових районів лісосмугами.

Усі виробничі відходи повинні бути зібрані, перероблені або утилізовані. Промзона має забезпечувати доступ до електроенергії, газу, централізованого водопостачання та водовідведення; технічну воду можна використовувати зі свердловин або очищати з місцевих річок. Близькість до житлових районів та сіл забезпечує наявність трудових ресурсів, а дорожні вузли та Одеська залізниця сприяють транспортуванню матеріалів, обладнання та готової продукції. Опалення цеху здійснюється власною котельнею з водяним опаленням.

Ливарний цех призначений для виробництва алюмінієвих виливків для сільськогосподарського та автомобільного машинобудування методом лиття у металеві форми. Виробництво зазвичай оснащується механізованими, автоматизованими або роботизованими одно- та багатопозиційними охолоджувальними машинами. Кокілі можуть мати дві й більше знімних частин з механізмами фіксації форми та видалення стержнів. Виливки включають заготовки для деталей гідромашин і агрегатів: кришки, корпуси, втулки, обойми, розпірки для шестеренчастих насосів та гідромоторів.

Режим роботи цеху залежить від обсягу виробництва, серійності, середньої маси виливка, типу металу, продуктивності плавильної печі та особливостей технологічного процесу. Для заданої номенклатури та рівня автоматизації доцільним є двозмінний режим роботи, а технічне обслуговування або ремонт обладнання за потреби може проводитися у третю зміну.

1.2.Плавильне відділення

1.2.1. Характеристика сплаву

Відповідно до завдання на випускну кваліфікаційну роботу, для виготовлення виливків використовується алюмінієвий сплав АК5М2Ц4 ТУ СОУ 29.1–05786100–005:2011. Хімічний склад та механічні властивості сплаву наведені у табл. 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сплаву

Сплав	Si	Mg	Cu	Mn	Ti	Zn	Fe	Al
АК5М2Ц4	4,0–6,0	0,2– 0,8	1,5– 3,5	0,2– 0,8	0,05– 0,2	3,5– 8,0	< 1,3	Основа

Таблиця 1.2 – Механічні властивості сплаву

Сплав	Вид ТО	Границя міцності при розтягу, кгс/мм ² (Па)	Відносне видовження, %	Твердість, НВ	Лінійна усадка, %	Рідинотекучість (мм) по спіральній пробі
АК5М2Ц4	Т1	22 (216)	1,3	95–125	1,25	410

Під час плавки частина металу втрачається через утворення шлаку, оксидних плівок та угару. Втрати металу при плавці алюмінієвого сплаву АК5М2Ц4 наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Втрати при плавці алюмінієвих сплавів

Марка сплаву	Види втрат, %			
	Шлак	Оксидні плівки	Угар	Загальні втрати
АК5М2Ц4	4,500		1,610	6,110

Алюмінієві сплави – це різновид кольорових сплавів з алюмінієвою основою, що містять один або кілька легуючих елементів. Легуючі елементи покращують механічні характеристики сплаву (твердість, міцність, пластичність) та технологічні властивості (оброблюваність різанням, рідинотекучість, зварюваність).

Залежно від типу легуючих елементів, алюмінієві сплави поділяють на:

- алюмінієво-мідні,
- алюмінієво-кремнієві,
- алюмінієво-магнієві,
- алюмінієво-марганцеві.

Окрім основних легуючих елементів, до складу сплавів можуть входити титан, олово, цинк та інші. Наприклад, сплав АК5М2Ц4 містить:

- 5% кремнію,
- 2% міді,
- 0,5% марганцю,
- до 8% цинку,
- невелику кількість титану (до 0,2%).

Залізо вважається шкідливою домішкою, оскільки підвищує крихкість сплаву.

Переваги алюмінію як основи сплавів:

- доступність, оскільки алюміній широко поширений у земній корі;
- мала густина, що робить конструкції легкими;
- висока міцність при невеликій масі;
- можливість багаторазової переробки, що забезпечує екологічність;
- корозійна стійкість, придатність до агресивних умов експлуатації;
- хороша оброблюваність різанням;
- високі ливарні властивості (добра рідинотекучість, невелика усадка, легкість лиття у форми);
- здатність до зварювання.

Завдяки цим властивостям, алюмінієві сплави широко застосовуються в Україні та світі в автомобільній, авіаційній, хімічній промисловості, машинобудуванні, приладобудуванні та інших галузях.

1.2.2. Вибір плавильного агрегату

Для плавлення алюмінієвих сплавів обрана індукційна тигельна піч ІАТ-2,5/1,15. Індукційні тигельні печі широко застосовуються у ливарних цехах завдяки ряду переваг: незначним втратам металу на угар та розплеску, високій продуктивності та ефективності, а також покращеним санітарно-гігієнічним умовам праці.

Постійне перемішування металу під дією індукційних струмів забезпечує однорідність розплаву за температурою та хімічним складом, сприяє швидкому засвоєнню легуючих елементів при введенні лігатур. Індукційні печі особливо ефективні для плавлення малорозмірних матеріалів, таких як стружка, і забезпечують високу гомогенність та рівномірність температури розплаву.

Безканальна індукційна піч ОТТО JUNKER має замінний керамічний тигель і дозволяє розплавляти та перегрівати метал за допомогою зовнішнього спірального водоохолоджувального індуктора. Піч обладнана магнітопровідними екранами, системою гідравлічного нахилу, замкненою системою водяного охолодження індуктора та силових кабелів, системою безперервного зважування для автоматизації завантаження шихти, а також системами контролю температури та автоматизованого керування процесом плавлення.

Завдяки багаторічному досвіду виробництва, печі ОТТО JUNKER зарекомендували себе як надійне, зручне у встановленні та експлуатації обладнання. Піч ІАТ-2,5/1,15 призначена для плавлення та перегріву сталі, чавуну та кольорових сплавів. Кольорові сплави плавляться у графітових тиглях, а чорні метали – у набивних тиглях.

Технічні характеристики печі наведені в таблиці 1.4, а її зображення представлено на рисунку 1.1.

Таблиця 1.4 – Технічна характеристика індукційної печі

IAT–2,5/1,15 OTTO JUNKER

Технічний параметр	Показник	
	Плавка в гарячому тиглі	Плавка в холодному тиглі
Ємність печі, т:		
по сталі	2,5	2,5
по міді	2,8	2,8
по алюмінію	0,85	0,85
Потужність,кВт :		
живлючого перетворювача	320	320
споживаєма	250	250
Температура перегріву, °С :		
сталі	1600	1600
міді	1200	1200
алюмінію	760	760
Питома втрата електроенергії на розплавлення та перегрів, кВт·год/т :		
сталі	665	750
міді	480	700
алюмінію	380	600
Максимальна швидкість плавки, т/год :		
сталі	1,5	1,0
міді	2,25	1,6
алюмінію	1,15	0,85
Час розплавлення та перегріву, год		
сталі	1,3	2,0–2,2
міді	1,0	1,4–1,8
алюмінію	0,6	0,8–1,0



Рис. 1.1. Індукційна тигельна піч 2,5/1,15

1.2.3. Розрахунок балансу металу

Баланс металу розраховуємо на 1 т придатних виливків.

Загальна маса металевої завалки для плавильних печей, що припадає на 1 т придатних виливків розраховується за формулою, т:

$$M = \frac{100 \cdot (\Pi + Л + Б)}{100 - y - z}, \quad (1.1)$$

де Π – маса придатного литва,

$Л$ – маса ливників,

$Б$ – маса браку,

y – відсоток угару при плавці, в зв'язку з тим що цей сплав дуже активний до окислення,

z – відсоток зливів, метал що залишається в ковші та іде на переплав.

Для сплаву АК5М2Ц4:

$$M = \frac{100 \cdot (1,000 + 0,354 + 0,058)}{100 - 1,61 - 4,5} = 1,504 \text{ т}$$

Тобто, для отримання 1т придатних виливків із сплаву АК5М2Ц4 необхідно розплавити 1,504 т металу.

Визначаємо відносний вміст складових балансу:- придатного литва, ливників та браку:

$$п = \frac{П}{М} \cdot 100\%; \quad л = \frac{Л}{М} \cdot 100\%; \quad б = \frac{Б}{М} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

$$п = \frac{1,000}{1,504} \cdot 100\% = 66,48\%,$$

$$л = \frac{0,354}{1,504} \cdot 100\% = 23,54\%,$$

$$б = \frac{0,058}{1,504} \cdot 100\% = 3,86\%$$

Визначаємо масу угару та зливів, т

Для сплаву АК5М2Ц4:

$$У = \frac{1,61}{100\%} \cdot 1,504 = 0,024 \text{ т}$$

$$З = \frac{4,5}{100\%} \cdot 1,504 = 0,068 \text{ т}$$

Таблиця 1.5 – Відомість балансу металу сплаву АК5М2Ц4

Складові балансу	т	%
Придатне литво	1,000	66,48
Ливники	0,354	23,54
Брак	0,058	3,86
Угар	0,024	1,61
Зливи	0,068	4,52
Всього	1,504	100,00

Підготовка до плавки шихти, відходів власного виробництва, переплаву алюмінієвої стружки, чушкового алюмінієвого сплаву

Перед плавкою алюмінієвого сплаву шихтові матеріали проходять ретельну підготовку:

1. **Очищення та подрібнення:** видаляють бруд, мастила та сторонні включення; матеріали подрібнюють до необхідної фракції.
2. **Сушіння та підігрів:** особливо важливо підігрівати лігатури для уникнення вологи.
3. **Умови зберігання:** шихту зберігають у сухому та чистому приміщенні, захищеному від атмосферних опадів. Волога може наситити розплав воднем і погіршити якість металу.

Склад шихти

- **Свіжі метали:** алюмінієвий сплав у чушках відповідного хімічного складу.
- **Відходи та брухт:** ливники, зливи, стружка.
- **Лігатури:** для коригування хімічного складу сплаву.

Розрахунок шихти

- Визначаються на основі хімічного складу сплаву за ГОСТ або ТУ.
- Ураховуються можливі зміни складу відходів (наприклад, випаровування цинку при багаторазовому використанні).
- Втрати металу на угар і пригар обов'язково враховуються.

Приклад: для приготування сплаву АК5М2Ц4 використовують 65% свіжого чушкового алюмінію та 35% відходів власного виробництва.

Основні рекомендації

- Регулярно перемішувати розплав для рівномірного розподілу елементів.
- Не допускати тривалого відстоювання розплаву, щоб уникнути насичення металу залізом з тигля.

Підготовка та рафінування металу перед заливкою

Для забезпечення належної якості розплаву на ділянці лиття в кокіль передбачають дві роздаточні печі на одне робоче місце:

1. **Перша піч:** безпосередньо для заливки форм.
2. **Друга піч:** для переливання розплаву з плавильного відділення, рафінування, витримки та зняття шлаку.

В якості роздаточних печей застосовують електричні печі опору НО-136. Технічні характеристики печі наведені у таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Технічна характеристика печі НО–136

Технічний параметр	Показник
Загальна маса печі без фундаменту і тигля	1365 кг
Продуктивність печі (у режимі плавки)	70 кг/год
Напруга жиличої мережі	380 В
Число фаз	3
Частота струму	50 Гц
Максимальна робоча температура	850° С
Число теплових зон	1
Час розігріву печі до робочої температури при потужності:	
40 кВт	3,5–4 год
48 кВт	2,5–3 год
55 кВт	1,5–2 год
Маса одноразового завантаження (по алюмінію)	200–220 кг
Розміри робочого простору :	
діаметр	500 мм
глибина	604 мм
Габаритні розміри печі :	
діаметр	1700 мм
довжина	2300 мм
висота	1770 мм

Плавлення алюмінієвого сплаву в індукційній печі – це досить простий процес, що складається з кількох основних етапів:

1. Підготовка:

- **Запуск печі:** Перед першою експлуатацією печі її слід ретельно просушити і поступово нагріти до 900°C. Це запобігає появі тріщин у футеровці та продовжує термін служби печі.
- **Підготовка шихти:** Підготуйте матеріали для плавлення (чушки, відходи, лігатури) і завантажте їх у піч.

2. Плавлення:

- **Завантаження шихти:** Робіть це обережно, щоб не пошкодити тигель.
- **Процес плавлення:** Розплавте шихту до потрібного об'єму, складу та температури.
- **Довантаження:** Додайте легкоплавкі присадки до розплавленого сплаву.

3. Рафінування:

- **Очищення:** Щоб уникнути газових раковин і дефектів, проведіть рафінування сплаву за допомогою флюсу АЛ224 за наступною процедурою:
 1. Відміряйте потрібну кількість флюсу.
 2. Загорніть його в папір у формі конверта (товщина ≤ 10 мм).
 3. Підготуйте інструменти для плавки: дзвоник, зчищалку, виливницю.
 4. Опустіть конверт у розплавлений метал на 50–100 мм при температурі 720–730°C.
 5. Рухайте дзвоник по спіралі протягом 5–8 хвилин.
 6. Після завершення витягніть дзвоник і очистіть його.
 7. Витримайте розплав 10–15 хвилин, щоб шлак і гази піднялися на поверхню.
 8. Очистіть поверхню сплаву зчищалкою.

4. Розливка:

- Розлийте очищений сплав у форми.

Примітка: Оксидна плівка Al_2O_3 , що утворюється на поверхні розплаву, захищає його від насичення киснем і воднем. Однак її захисні властивості можуть змінюватися під дією різних металів.

1.3. Відділення лиття в кокіль

Лиття в металеві форми (кокілі) – сучасний метод отримання високоякісних виливків із високою точністю.

Переваги лиття в кокілі:

- **Довговічність:** металеві форми витримують багаторазове використання, що знижує виробничі витрати.
- **Точність:** стабільні розміри порожнини форми дозволяють отримувати виливки 5-го класу точності.
- **Швидке охолодження:** металеві форми ефективно відводять тепло, формуючи дрібнозернисту структуру і високі механічні властивості виливка.

Захист форм від розплавленого металу:

Для запобігання руйнуванню формоутворюючих поверхонь застосовують вогнетривкі покриття на основі:

- **Оксиду цинку:** захищає від корозії та високих температур.
- **Графіту:** підвищує зносостійкість і теплопровідність.
- **Кераміки:** додає міцності та стійкості до температурних перепадів.

Важливо: склад покриття підбирають залежно від типу сплаву. Товщина покриття впливає на швидкість охолодження виливка та запобігає термічному ушкодженню поверхні форми.

Приклади складу покриттів наведено в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Вогнетривкі покриття для нанесення на кокіль, плавильний інструмент, тиглі та виливниці.

Складова	П1	П2	П3	П4
Оксид цинку	50 г	250 г	450 г	–
Вода технічна	1 л	1 л	1 л	1 л
Рідке скло	–	100 г	–	–
Gillolin A1223	–	–	–	250 г

Приготування покриттів:

- **На основі оксиду цинку (П1–П3):**

1. Нагріти воду до 60–80°C.
2. Просіяти окис цинку (сито 0,5 мм).
3. Додати окис до води і ретельно перемішати.
4. Для П2 додати рідке скло та знову перемішати.

- **На основі Gillolin A1223 (П4):**

1. Змішати 1 частину препарату з 3–5 частинами води кімнатної температури (20°C).
2. Перемішати до однорідної консистенції.

Нанесення покриття:

- **На плавильний інструмент:**

- Очистити від старого покриття, шлаку та окислів.
- Нанести тонкий шар пульверизатором, пензлем або зануренням.
- Нагріти до 150–200°C.
- Відновлювати покриття по мірі його руйнування.

- **На кокіль:**

- Очистити формоутворюючу порожнину.
- Продути половини стиснутим повітрям.
- Утеплити підживлюючу частину азбестовим листом (5 мм).
- Встановити інжекційну горілку.
- Нагріти до 150–200°C (можливо рідким металом).
- Провести 6–7 промивочних заливок металом.
- Нанести вогнетривке покриття та просушити 5–7 хвилин.
- Фарбувати по мірі руйнування покриття.

Примітка: після нанесення покриття форму підігрівають до $\leq 200^\circ\text{C}$.

Виливок видаляють при температурі $\geq 400^\circ\text{C}$.

Ключові параметри процесу:

- **Температура заливки:** залежить від складу сплаву та геометрії виливка.

- **Тривалість витримки:** визначається масою та розмірами виливка; передчасне розкриття або надмірна витримка можуть спричинити руйнування чи тріщини.

Для лиття виливків використовуємо кокільні машини моделі 59К613 (табл 1.8, рис. 1.3). Дані машини мають такі особливості:

- Використовуються для дрібних та середніх виливків до 7 кг.
- Шестипозиційні карусельні машини.
- Вертикальний роз'єм кокілю.
- Гідравлічний привід, напівавтоматичний цикл.
- Технологічні операції: заливка металу, охолодження, виштовхування, очищення і нанесення покриття.

Таблиця 1.8 – Технічна характеристика кокільної машини 59К613

Параметр	Значення
Кількість позицій	6
Розмір робочого місця (ширина x висота), мм	500 x 400
Найменша відстань між плитами, мм	500
Хід плити, мм	400
Зусилля розмикання кокілю, кгс	4000
Час повороту каруселі на 1 позицію, с	6
Діаметр каруселі, мм	4600
Продуктивність, заливок/год	до 180
Максимальна металоємність кокілю, кг	чорні: 40, кольорові: 10
Висота машини над підлогою, мм	2350
Загальна висота, мм	2900
Маса машини, кг	25000

На рис. 1.3 показано шестипозиційну кокільну машину 59К613 для виробництва фасонних виливків з алюмінієвих сплавів.

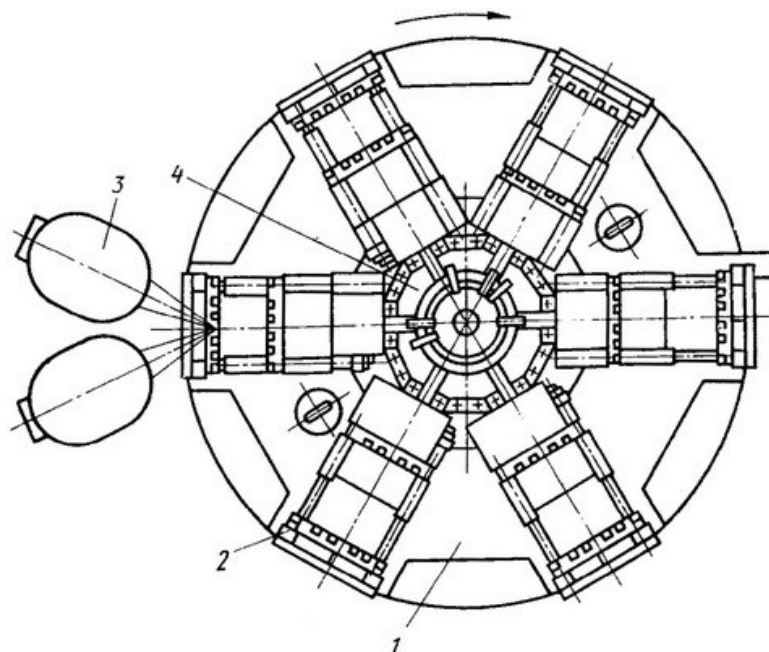


Рис. 1.3 – Карусельна кокільна машина мод. 59К613:
 1 – платформа, 2 – кокільна секція, 3 – дозатор розплаву, 4 – гідравлічна розподільна колонка управління

Основа машини (рис. 1.3) встановлюється на колоні, а її вага спирається на центральний підшипник. Періодичне обертання основи між позиціями забезпечується гідромеханічним пристроєм, який дозволяє точно повертати основу на заданий кут і точно позиціонувати на кожній позиції.

Кокільні позиції виконані похилими і працюють по копіру, що забезпечує зручне встановлення стержнів.

Заливка розплаву виконується за допомогою двопозиційного заливочного пристрою, дистанційно контрольованого з єдиного пульта управління. Для лиття алюмінієвих сплавів використовуються стандартні дозатори.

Переваги карусельних кокільних машин:

- Існує понад 30 моделей з різними рівнями автоматизації та продуктивності, які широко використовуються у вітчизняній промисловості.
- Оснащені пневматичними або гідравлічними приводами.
- Можливі вертикальні, рідше горизонтальні або похилі роз'єми кокілів.
- Деякі моделі обладнані електричним приводом для повороту каруселі.

Карусельні кокільні машини з програмним управлінням:

- Дозволяють регулювати параметри технологічного процесу у широкому діапазоні.
- Дають змогу виготовляти виливки різної складності з чорних та кольорових сплавів.

Для лиття виливків масою понад 7 кг використовують однопозиційні універсальні кокільні машини моделі 82А403 з гідравлічним приводом.

Технічна характеристика машини моделі 82А403 представлена в табл. 1.9:

Таблиця 1.9 – Технічна характеристика однопозиційної кокільної машини мод. 82А403

Параметр, од. вим.	Значення
Продуктивність, відл./год	25
Зусилля запирання форми, т	25
Розміри підкокільних плит, мм	200x800
Хід піддона, мм	530
Розміри кокіля, мм	200x1000x800
Габаритні розміри машини, мм:	
довжина	2860
ширина	1650
висота	1550
Маса машини, т	5

На рис. 1.4 показана однопозиційна універсальна кокільна машина 82А403 з гідравлічним приводом. Машина оснащена двома рухомими підкокільними плитами, рухомим піддоном, плитами для кріплення нижніх, бокових і верхніх стержнів, а також знімником виливків із форми.

Ця машина призначена для виготовлення виливків складної конфігурації з алюмінієвих сплавів широкого асортименту.

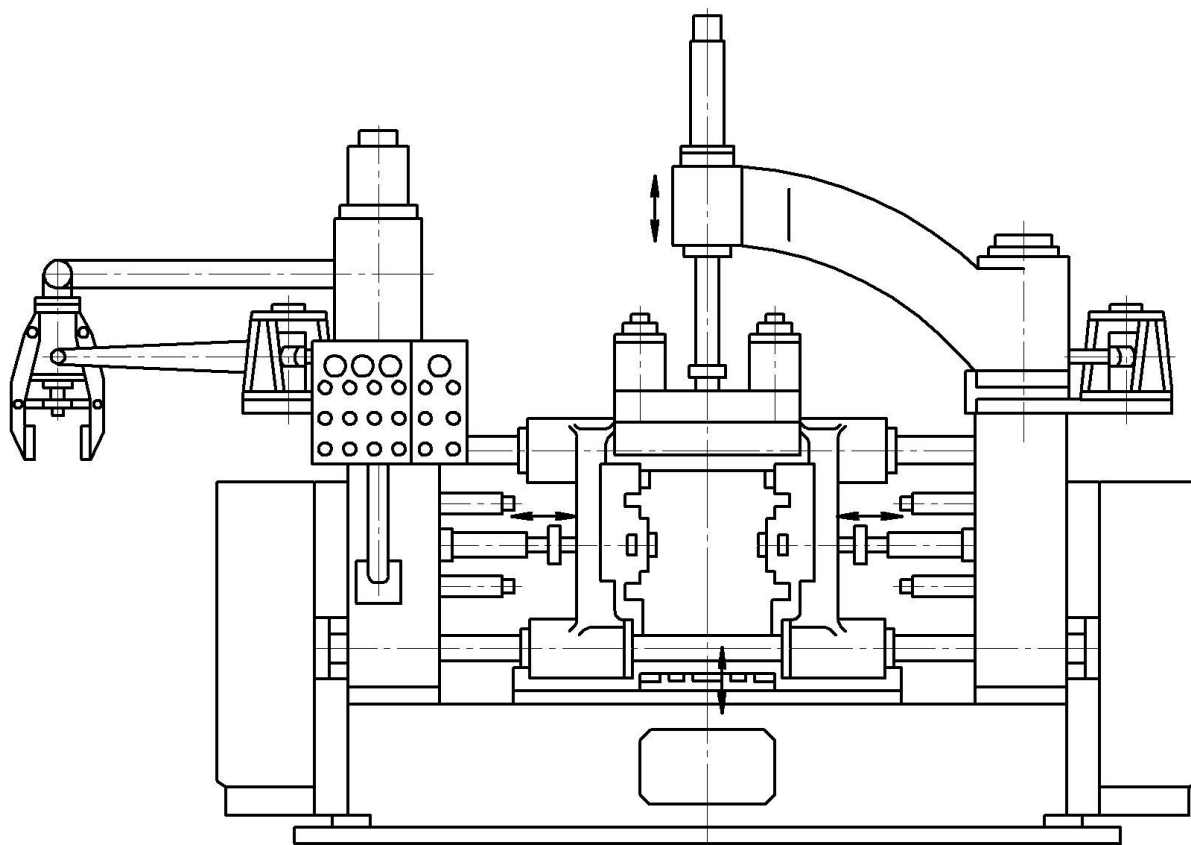


Рисунок 1.4 – Загальний вид однопозиційної універсальної
кокільної машини мод. 82А403

1.4. Відділення відрізки та обрубки ливників

Для обрубки ливників використовують обрубний гідравлічний прес РА35N, технічна характеристика якого наведена в табл. 1.10.

Таблиця 1.10

Технічна характеристика гідравлічного пресу РА35N

Основні данні	Величина
Величина ходу рухомої траверси, м	1
Зусилля пресу, т	100
Габаритні розміри, м	1,9x1,2x2,5
Продуктивність, шт/год	50
Закрита висота, мм	750

Для відрізання ливникових систем та підживлювачів використовують стрічко відрізні верстати моделі JET HVBS-812 R, загальний вид якого показано на рисунку 1.5, а технічна характеристика наведена у таблиці 1.11.



Рис. 1.5. Стрічко відрізний верстат JET HVBS-812 R

Таблиця 1.11 – Технічна характеристика
стрічко відрізного верстата JET HVBS-812 R

Зона обробки при 90°	Діаметр 200 мм
	180x305 мм
Зона обробки при 45°	Діаметр 127 мм
	120x125 мм
Розміри полотна пили	19x0,9x2362 мм
Регулювання лещат	0 - 45°
Діаметр шківів пили	290 мм
Швидкості пластин	25, 40, 60, 80 мм/хв
Потужність мотору	600 Вт/с
Ємність для охолоджувальної рідини	8 літрів
Продуктивність	0,2 т/год
Габаритні розміри верстата	1780x790x1120 мм
Маса	120 кг

Стрічковий відрізний верстат JET HVBS-812RKT – це багатофункціональний верстат, розроблений для різання різних матеріалів, що використовуються в машинобудуванні, таких як алюміній, кольорові метали та сплави чорних металів. Він відрізняється компактним дизайном, простотою установки, а також високою продуктивністю, надійністю та міцністю, що робить його ідеальним для промислового застосування.

Основні характеристики конструкції:

- Легкі шківни, що полегшують натяг пильного полотна.
- Подвійні регульовані роликові підшипники для точного направлення полотна.
- Гідравлічна система подачі з кінцевим вимикачем для підвищення безпеки.
- Зручні лещата з регульованими губками, швидким затискачем і можливістю повороту до 45° .
- Широкий діапазон швидкостей різання для роботи з різними матеріалами.
- Автоматичне вимкнення після завершення різку для безпеки оператора.
- Система охолодження для запобігання перегріву полотна та заготовки, особливо при роботі з великими деталями.

JET HVBS-812RKT – це надійне та ефективне рішення для промислового різання металу.

1.5. Відділення фінішної очистки виливків

Фінішна очистка виливків від облою, заливів по лінії роз'єму, залишків ливникової системи, заусенців використовують обдирно-шліфувальні верстати (рис. 1.6, табл. 1.12).

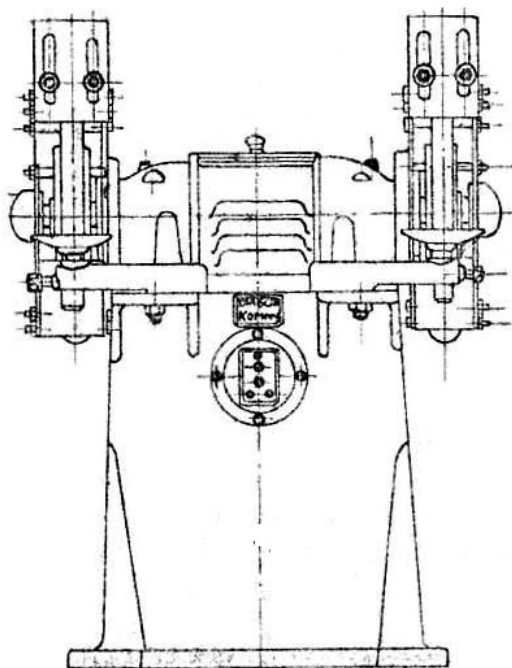


Рис. 1.6. Обдирно-шліфувальний верстат 3М634

Обдирно-шліфувальний верстат 3М634 є універсальним інструментом у виробничих цехах, призначеним для виконання різних операцій обробки металу.

Основні функції:

- Зачищення та обдирка виливків від обля та залишків ливниково-живильної системи.
- Видалення заусенців та виступів, що можуть ускладнювати подальшу обробку.
- Виконання слюсарних робіт, зокрема:
 - зняття задирок,
 - обробка фасок,
 - обдирка ливників,
 - заточування металорізального та деревообробного інструменту,
 - точіння та профілювання металевих деталей.

Верстат забезпечує високу продуктивність і точність, що робить його незамінним на виробництві.

Таблиця 1.12 – Технічна характеристика обдирно-шліфувального верстату

Характеристика	Величина	Одиниці
Кількість шліфувальних кругів	2	шт
Діаметр круга	400	мм
Максимальна ширина круга	40	мм
Посадковий діаметр круга	203	мм
Висота центру круга від підлоги	850	мм
Відстань між кругами	700	мм
Частота обертання шпинделя	1398	об/хв
Маса виливків	20	кг
Живлячий струм	380	В
Потужність двигуна	2,8	кВт
Годинна продуктивність	0,3...0,5	т/год
Габарити верстата	900x600x1200	мм
Маса	450	кг

1.6. Допоміжні відділення

1.6.1. Дільниця ремонту і футеровки ковшів

Дільниця ремонту та футеровки ковшів є важливою складовою ливарного цеху та розташована безпосередньо поруч із плавильним відділенням. Основні аспекти роботи цієї дільниці включають:

Футерувальні матеріали: Тут зберігаються різні матеріали для ремонту та футеровки роздавальних барабанних ковшів, зокрема шамотна цегла (прямокутна та фасонна), мелений шамот, пісок, зв'язуючі речовини, вогнетривкі обмазки та покриття.

Обладнання: Дільниця обладнана газовим пальником, який застосовується для сушки та прокалки ковшів після їх ремонту та футеровки.

Процес підготовки ковшів:

- Спершу ковші висушують на повітрі цеху протягом 24 годин.
- Потім їх поступово прогрівають газовим пальником протягом 4–6 годин для повного видалення залишкової вологи.
- Завершальний етап передбачає прокалку ковшів до температури 800 °С протягом 1–2 годин.

Такий підхід є критично важливим для забезпечення довговічності та надійності ковшів у ливарному виробництві.

1.6.2 Склад модельного оснащення

Склад модельного оснащення є важливою частиною процесу лиття в кокілі і розташований безпосередньо поруч із відділенням лиття, що забезпечує зручний доступ до кокілів.

Кокілі зберігаються на стелажах у зібраному вигляді, що спрощує їхню ідентифікацію та використання. Кожен кокілі розташовується напроти робочого місця, де він буде встановлений, що оптимізує робочий процес.

Поруч із складом знаходиться модельно-ремонтна майстерня, де здійснюються ремонти кокілів — це важливо для підтримки їхньої ефективності та довговічності.

У майстерні використовуються різноманітні металообробні верстати та інструменти, зокрема: шліфувальний, токарний, фрезерний і свердлильний верстати, а також ручний металообробний та слюсарний інструмент.

Завдяки цьому обладнанню виконують широкий спектр робіт — обробку, ремонт і налаштування кокілів, що забезпечує їхню високу якість і надійність під час лиття.

1.6.3. Лабораторії, службові та побутові приміщення

Лабораторія спектрального аналізу та відділ технічного контролю є ключовими підрозділами ливарного цеху.

Лабораторія спектрального аналізу розташована поруч із плавильним відділенням і призначена для дослідження матеріалів, що підлягають плавленню, що дозволяє контролювати якість сплаву.

Відділ технічного контролю розташований біля складу готової продукції та обладнаний приладами для перевірки механічних властивостей матеріалів, вимірювальними інструментами і засобами контролю технологічних параметрів, такими як термомпари, секундоміри та аналітичні ваги. Він забезпечує контроль якості готової продукції та технологічних процесів.

Адміністративні приміщення, розташовані в тій же будівлі, включають кабінети начальника цеху, головного металурга, технолога, енергетика, кімнату майстрів та технологічне бюро.

Побутові приміщення рівномірно розташовані по периметру цеху, що забезпечує комфорт працівників.

Така організація роботи сприяє ефективності ливарного цеху, високій якості продукції та створенню комфортних умов для персоналу.

1.7. Висновки по розділу

1. Наведено обґрунтування розташування та режиму роботи ливарного цеху, детально описано функціонування його основних відділень: плавильного, лиття в кокіль, відрізки та обрубки ливників, фінішних операцій, а також допоміжних підрозділів – дільниці ремонту та футеровки ковшів, складу модельного оснащення, відділу технічного контролю та лабораторії спектрального аналізу, адміністративних і побутових приміщень.
2. Для плавки металу обрано індукційні тигельні печі ІАТ-2,5/1,15 ємністю 850 кг. Наведено їхню конструкцію та технічні характеристики. Для розливання сплаву у форми застосовуються роздавальні печі НО-136 ємністю 220 кг. Описано процес рафінування алюмінієвих сплавів.
3. Для виготовлення виливків використано два типи кокільних верстатів: шестипозиційну машину моделі 59К613 для дрібних і середніх виливків масою

до 7 кг та однопозиційну універсальну машину моделі 82A403 для великих виливків понад 7 кг. Наведено їхню будову, принцип роботи, технічні характеристики, а також описано процедуру підготовки кокілів і технологію лиття.

4. Для відрізання ливників та підживлювачів застосовується стрічковий відрізний верстат JET HVBS-812RKT, а обдирка і зачистка виливків виконуються на обдирно-шліфувальних верстатах моделі 3M634.

2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ В КОКІЛЬ ВИЛИВКА «ОБОЙМА»

2.1. Аналіз конструкції деталі та технічних умов на виливок

Деталь – це виріб, виготовлений із однорідного матеріалу без виконання складальних чи монтажних операцій. Виливком називають деталь, отриману шляхом заливання розплавленого металу у спеціальну форму, у якій він твердне.

Виливок блоку обойми підшипникової шестеренчатого насоса НШ100А-3-05 (рис. 2.1) виготовляється методом лиття у кокіль з алюмінієвого сплаву АК5М2Ц4 відповідно до ТУ СОУ 29.1–05786100–005:2011. Хімічний склад і механічні характеристики сплаву подані в таблицях 1.1 та 1.2. Виливок належить до III групи, точність – 9-0-0-7т за ГОСТ 26645. Допустима різностінність становить до 1 мм, короблення – до 1,5 мм, перекіс по роз'єму – до 0,5 мм. Ливарні уклони – 3°, радіуси – 2...3 мм. Загальна пористість не повинна перевищувати еталон №2 за шкалою пористості згідно з ДСТУ 2839.

Обойма характеризується нескладною формою як зовні, так і у внутрішній порожнині. У складі корпусу шестеренчатого насоса вона забезпечує жорстке з'єднання корпусу з крилами (кінцями) обойми для підтримання стабільної міжцентрової відстані проточки під опори шестерень.

Обойма має циліндричну форму. Усередині розміщені круглі отвори: менші – під цапфи шестерень, більші – під самі шестерні. У центральній частині обойми, перпендикулярно осі насоса, розташовані клиноподібні отвори, які сходяться назустріч один одному та виконують функцію всмоктувальних каналів. На зовнішній поверхні є вісім впадин двох різних розмірів.

Габаритні розміри деталі становлять $\varnothing 154 \times 131$ мм. Маса готової деталі – 4,1 кг, маса виливка – 5,9 кг. Твердість – 75...115 НВ.

Базові поверхні повинні бути чистими та не містити раковин, заливів чи неметалевих включень. На деяких необроблюваних ділянках виливка допускається наявність поодиноких раковин і неметалічних включень: до 4 шт.

діаметром не більше 3 мм, глибиною до 10 мм, при мінімальній відстані між ними не менше 10 мм.

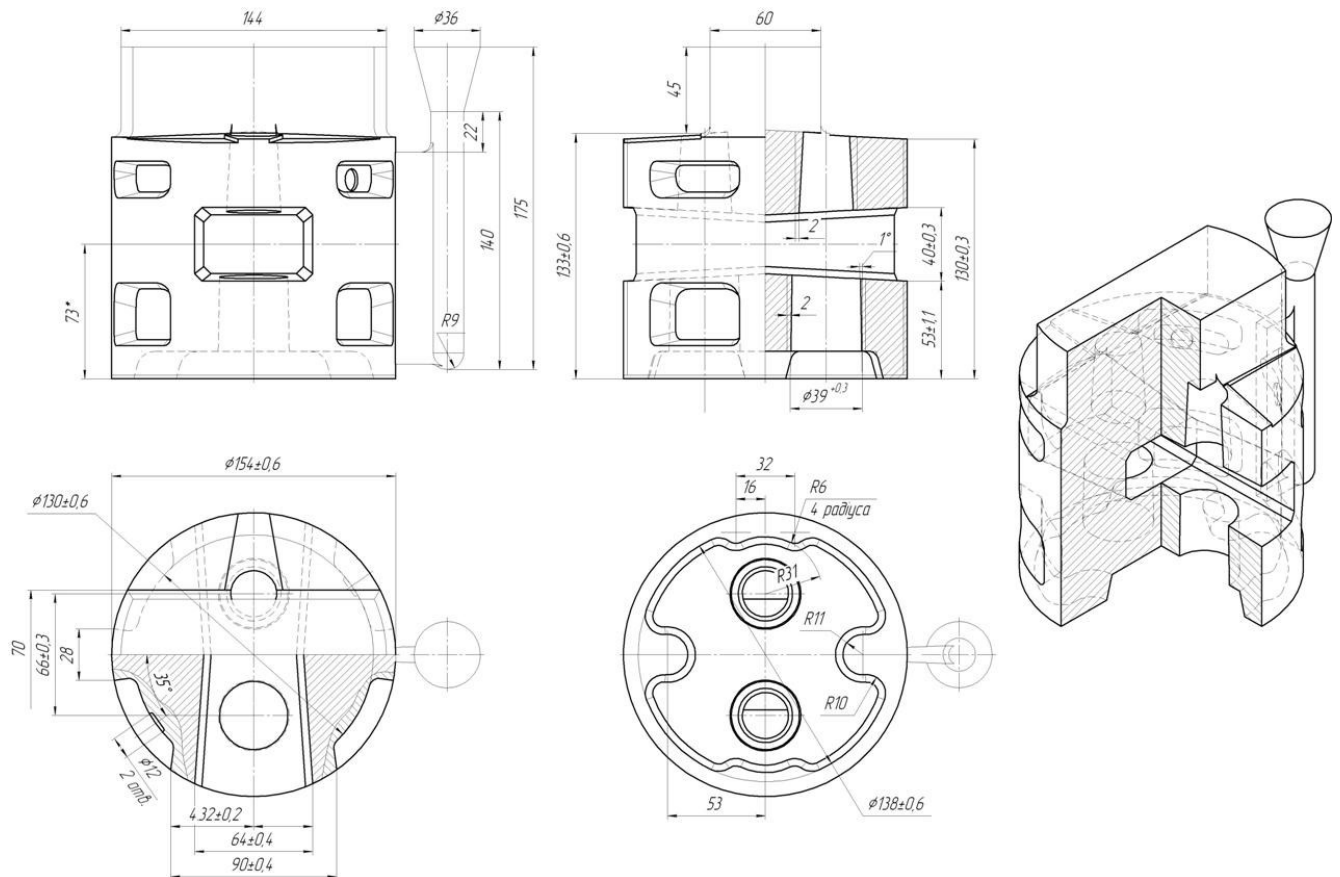


Рис. 2.1. Виливок блоку обойми підшипникової НШ100А-3-05

Допуск зміщення виливка по площині роз'єму – 0,8 мм. На поверхнях, які обробляються, допускаються різні дефекти, які не перевищують глибини в 0,5 припуску на механічну обробку.

2.2. Розробка технологічного процесу виготовлення виливка

Перед початком розробки технологічного процесу виготовлення виливка необхідно ретельно проаналізувати його конструкцію та технологічні вимоги. Після проведення аналізу слід визначити позицію виливка у формі під час

залівки й затвердіння, місця роз'єму форми, розрахувати припуски на механічну обробку та врахувати усадку, встановити радіуси скруглень і ливарні уклони.

2.2.1. Вибір поверхні роз'єму форми

Для отримання якісного вилівка необхідно правильно обрати раціональне положення поверхні роз'єму форми. Вибір поверхні роз'єму залежить від конструкції деталі, технологічних вимог і локальних конструктивних особливостей вилівка. При цьому слід керуватися загальними принципами технології формування та теорії ливарного виробництва:

- поверхня роз'єму повинна мати переважно вертикальне розташування;
- кількість поверхонь роз'єму має бути мінімальною;
- вибір роз'єму форми повинен забезпечувати зручність контролю її розмірів;
- бажано, щоб поверхня роз'єму була максимально плоскою;
- конструкція роз'єму повинна виключати підвісні стержні, а основні стержні мають бути розташовані зручно;
- роз'єм необхідно вибирати так, щоб базові поверхні під механічну обробку знаходилися в одній половині форми разом з оброблюваними поверхнями та не перетинались площиною роз'єму.

Після аналізу всіх зазначених вимог обрано лінію роз'єму з вертикальною орієнтацією та однією поверхнею роз'єму, розташованою по середині деталі. Таке рішення забезпечує легке вилучення вилівка з форми.

Площину роз'єму форми зображено на кресленні вилівка та на рис. 2.2 штрих-пунктирною лінією, яка закінчується потовщеними лініями з перехрестами. Стрілками показано напрям роз'єму форми, а буквами П – права і Л – ліва напівформи.

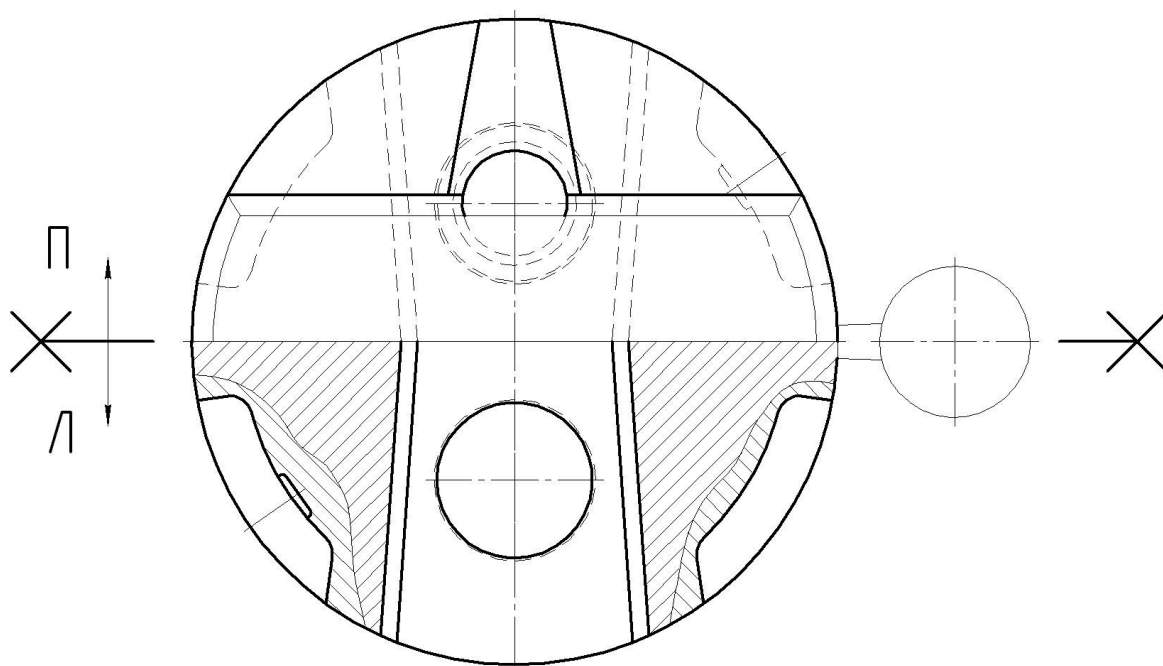


Рис. 2.2. Вибір поверхні роз'єму виливка

2.2.2. Вибір припусків на механічну обробку

Розміри виливка визначають, додаючи до розмірів готової деталі припуски на механічну обробку. Величина припуску залежить від найбільшого габариту виливка, розташування оброблюваної поверхні під час заливки (у верхній, нижній або боковій частині), способу виготовлення та класу точності виливка.

Розміри припусків на механічну обробку для виливків з алюмінієвих сплавів, виготовлених литтям у кокіль, регламентуються ГОСТ 26645. Приймальні значення припусків для різних поверхонь наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Припуски механічну обробку виливків із алюмінієвих сплавів при литті в
кокіль

Найбільший розмір	Положення при заливці	Найменший розмір
3,0	Верх	2,0
3,0	Низ	2,0
3,0	Збоку	2,0
3,0	Внутрішня поверхня	2,0

2.2.3. Вибір радіусів скруглень та ливарних ухилів

Радіуси скруглень визначаються за ГОСТ 10948 в залежності від матеріалу виливка, способу та точності литва, а також від розмірів спряжених поверхонь. На кресленні вказані не всі значення скруглень, але вони занесені в технічні вимоги на кресленні виливка, так само, як і ливарні уклони:

- невказані ливарні уклони – 3°;
- ливарні радіуси – 3 мм.

2.2.4. Припуски на усадку

Під усадочним припуском розуміють збільшення всіх ливарних розмірів моделі на величину, що компенсує ливарну усадку металу. Усадка задається у відсотках від фактичних розмірів виливка. Для алюмінієвого сплаву АК5М2Ц4 при литті в кокіль приймаємо лінійну усадку 1,25%, а об'ємну — 1,95%.

2.2.5. Розробка креслень модельно-ливарних вказівок

Креслення модельно-ливарних вказівок розробляється на основі креслення деталі блоку обойми підшипникової. Технологічне креслення являє собою документ із нанесеними технологічними позначеннями відповідно до ГОСТ 3.1125. На кресленні деталі необхідно зазначити:

- положення виливка у формі під час заливки та твердіння;
- припуски на механічну обробку;
- розташування поверхонь моделі у формі;
- межі стержнів та відповідні зазори;
- місця встановлення та розміри елементів ливниково-живильної системи.

Проекції креслення виливка повинні відповідати його положенню у формі під час заливки металом. На кресленні обов'язково вказують величини припусків на обробку. Отвори, які не формуються литтям, позначають суцільною лінією.

На кресленні вилівка згідно з ГОСТ наносять елементи ливарної форми: лінію роз'єму вилівка і форми зображають прямою лінією з позначенням «РФ». Усі елементи кресляться згідно з вимогами ГОСТ 2.423.

Припуски на механічну обробку позначають суцільною тонкою лінією; їх величини вказують числом перед знаком шорсткості або зазначають у вигляді значень уклонів і ливарних розмірів.

Позначення шорсткості поверхонь і правила їх нанесення виконують відповідно до ГОСТ 2.309. Якщо для всіх поверхонь задана однакова шорсткість, її розміщують у правому верхньому куті креслення.

Зображення елементів ливникової системи, підживлювачів та нанесення їхніх розмірів здійснюють згідно з ГОСТ 2.423. На кресленні модельно-ливарних вказівок ливникову систему подають у масштабі креслення суцільною тонкою лінією. Площі перерізів елементів не штрихують; у перерізах допускається вказувати площу перерізу (см^2), кількість елементів та їх сумарну площу.

2.3. Розрахунок та конструювання ливниково-живильної системи

2.3.1. Основні положення при конструюванні ливниково-живильної системи. Ливниково-живильна система являє собою послідовно з'єднані канали, через які розплавлений метал подається в порожнину ливарної форми. Зазвичай така система включає ливникову чашу або воронку, стояк, шлаковловлювач та живильник. Живильник прилягає безпосередньо до порожнини відливка і має бути сконструйований таким чином, щоб його можна було легко відокремити від готового вилівка, не пошкоджуючи деталь.

2.3.2. Вибір місця підведення металу у форму. Місце підведення металу обираємо в центральній частині вилівка по лінії роз'єму. Такий спосіб заливки забезпечує рівномірніше заповнення ливарної порожнини: окисні плівки спливають угору, а поверхня вилівка виходить чистішою та гладкішою. Обрана схема підведення металу належить до бокових систем зі щілинним живильником

і є широко застосовуваною для виливків подібної конфігурації з алюмінієвих сплавів.

2.3.3. Тип ливникової системи. Конструкція ливникової системи для даного вилівка при литті в кокіль є типовою – розширююча, бокова з щільовим живильником, горизонтальна (рис. 2.3).

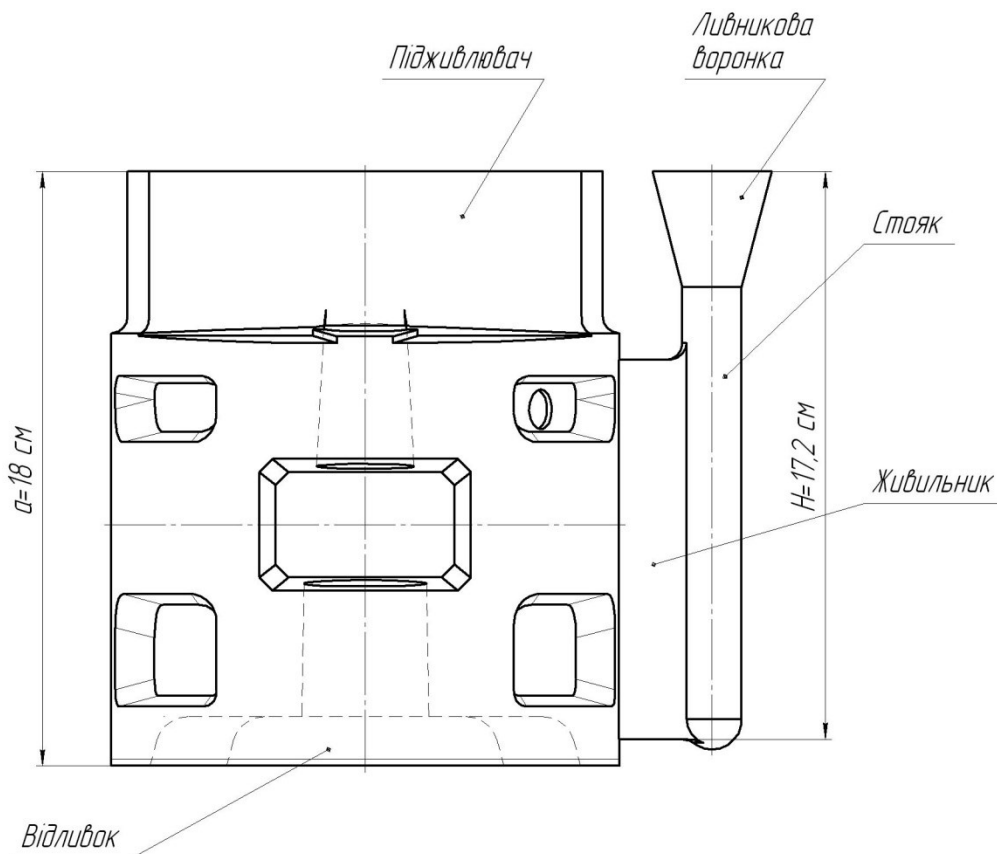


Рис. 2.3. Конструкція ливникової системи

2.3.4. Розрахунок конструкції підживлювача. Основною функцією підживлювача є запобігання утворенню раковин і рихлот у виливку, а також забезпечення переходу усадкових дефектів із робочої зони деталі в сам підживлювач. Підживлювачі розміщують у тих ділянках, які твердіють останні в процесі охолодження. У проєктованому виливку доцільно встановити підживлювач у верхній частині.

Розрахунок розмірів підживлювача ведемо за наступною методикою [9].

Висота підживлювача:

$$H = \sqrt[3]{\frac{x_{\varepsilon}}{\varepsilon_{\varepsilon}} V_{\Pi}}, \quad (2.1)$$

де x_{ε} – коефіцієнт усадкової раковини, $x_{\varepsilon} = 9 \dots 12$;

$\varepsilon_{\varepsilon}$ – приведений об'єм усадкової раковини $\varepsilon_{\varepsilon} = 9 \dots 12$;

V_{Π} – необхідний об'єм підживлювача, см^3 .

$$V_{\Pi} = \frac{\beta}{k} V_{\text{відл}}, \quad (2.2)$$

де β – коефіцієнт $\beta = 0,035 \dots 0,08$;

$k = 0,25$;

$V_{\text{відл}}$ – об'єм виливка $V_{\text{відл}} = 2200 \text{ см}^3$.

$$V_{\Pi} = \frac{0,07}{0,25} \cdot 2200 = 616 \text{ см}^3$$

$$H = \sqrt[3]{\frac{10}{9} \cdot 616} = 88 \text{ мм}$$

Діаметр підживлювача розраховуємо за формулою:

$$D = H(1,1 \dots 1,5), \quad (2.3)$$

$$D = 88 \cdot (1,1 \dots 1,5) = 97 \dots 132 \text{ мм}$$

Маса розрахованих підживлювачів коливається від 1,8 до 3,2 кг при вазі вилівка 4,6 кг, що становить 39–70% від маси вилівка. Така металоємність є значно завищеною.

Для більш ефективного живлення термічних вузлів вилівка та виведення газів із ливарної форми доцільно конструктивно прийняти підживлювач із формою і розмірами, зазначеними на рис. 2.4. Крім того, рекомендується утеплити його тепло ізолюючою вставкою товщиною 5 мм по всій боковій поверхні теплообміну.

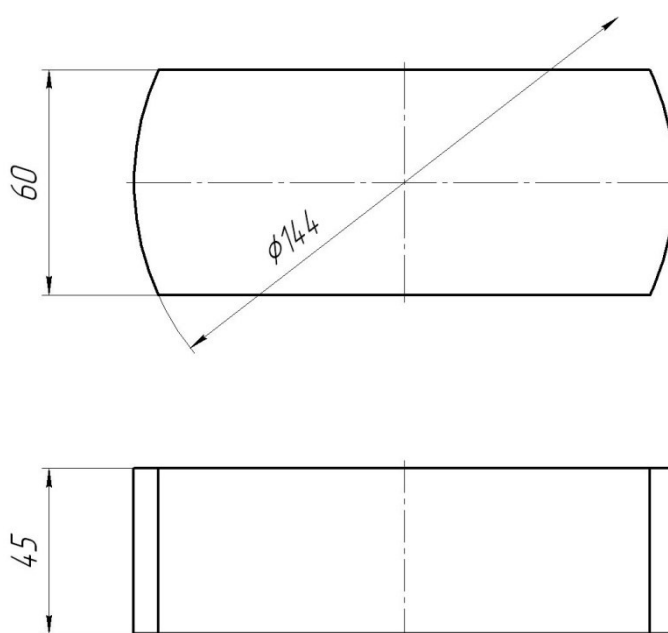


Рис. 2.4. Схема з розмірами підживлювача

2.3.5. Розрахунок ливникової системи

Розміри елементів ливникової системи для вилівоків з алюмінієвих сплавів визначаються на основі таких положень:

– значення критерію Рейнольдса Re для різних елементів ливникової системи не повинно перевищувати межі, при якій відбувається мінімальне потрапляння окислів та неметалічних включень у форму через порушення щільності металу;

– швидкість руху розплаву у формі повинна забезпечувати повне заповнення ливарної порожнини без утворення недоливів та спаїв у виливку.

Для отримання високоякісних виливків зі сплавів алюмінію швидкість руху розплаву має зменшуватися від перерізу стояка до живильника. Тому для даного виливка застосовується розширююча ливникова система з таким співвідношенням площ перерізів:

$$F_{\text{ст}} : F_{\text{ж}} = 1 : 4$$

де $F_{\text{ст}}$ та $F_{\text{ж}}$ – площі поперечного перерізу стояка та живильника відповідно.

Середню мінімальну швидкість підйому металу у формі визначають за теоретичними та експериментальними залежностями. Досить точною є формула:

$$u_p = (3,0 \dots 4,2) l_{\text{відл}}$$

де u_p – початкова швидкість підйому розплаву у формі, см/с;
 $l_{\text{відл}}$ – характерна товщина стінки виливка, см.

При литті мілких і середніх виливків у кокіль площа поперечного перерізу стояка визначається за формулою:

$$F_{\text{ст}} = \frac{(3,0 \dots 4,2) G}{\rho H_{\text{відл}} l_{\text{відл}} u_p}$$

де G – маса виливка, г, $G=5900$ г;

ρ – густина розплаву, г/см³, $\rho=2,75$ г/см³;

$H_{\text{відл}}$ – висота виливка, см, $H_{\text{відл}}=18$ см;

$l_{\text{відл}}$ – характерна товщина стінки виливка, см, $l_{\text{відл}}=2,0$ см;

u_p – швидкість руху розплаву, см/с.

Швидкість руху розплаву визначається за формулою:

$$u_p = \mu \sqrt{2gH_p}, \quad (2.7)$$

де μ – коефіцієнт втрати напору, $\mu = 0,6 \dots 0,7$;

H_p – статичний напір. Для обраного підводу металу у форму $H_p = H$ (рис. 2.3),

$$u_p = 0,6 \cdot \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 17,2} = 110 \text{ см/с}$$

$$F_{ст} = \frac{(3,0 \dots 4,2) \cdot 5900}{2,75 \cdot 18 \cdot 2,0 \cdot 110} = 1,63 \dots 2,27 \text{ см}^2$$

Визначаємо діаметр стояка:

$$D_{ст} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{ст}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,27}{\pi}} = 1,71 \text{ см}$$

Приймаємо $D_{ст} = 18 \text{ мм}$. Уточнюємо площу перерізу стояка з урахуванням прийнятого розміру:

$$F_{ст} = \frac{\pi \cdot D_{ст}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,8^2}{4} = 2,50 \text{ см}^2$$

Приймаємо $F_{ст} = 2,50 \text{ см}^2$, тоді $F_{ж} = 9,20 \text{ см}^2$ (в нашому випадку ливникова система складається зі стояка та живильника).

Живильник приймаємо прямокутний ширина – 8 мм, висотою – 115 мм.

Перерізи елементів ливникової системи показано на рис. 2.5.

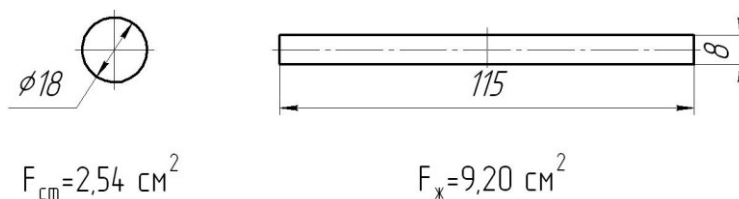


Рис. 2.5. Перерізи елементів ливникової системи

2.4. Технологічний процес виготовлення виливка

Технологічний процес виготовлення виливка в кокіль включає наступні операції: збирання кокілю, підготовка до роботи, заливка металу, охолодження, видалення виливка, його очистка та контроль якості.

1. Монтаж кокілю

Виливок – блок обойми підшипникової шестеренчатого насоса НШ100А-3-05 – виготовляється методом лиття у кокіль, який встановлюється на кокільний верстат 59К613. Технічна характеристика верстата наведена в розділі 1. Кокіль монтується на штоки бокових гідроциліндрів та направляючі, додатково встановлюються стержні. Напівформа та кокіль у зборі показані на рис. 2.6 і 2.7.

2. Розігрів кокілю

Після збирання кокіль розігрівають до 150–200 °С за допомогою пальника.

3. Нанесення протипригарної фарби

На розігрітій кокіль пульверизатором наносять фарбу Gillolin AL223 G – протипригарну тепло ізолюючу фарбу у вигляді порошку з оксидної кераміки та графіту. Фарбу розводять водою у пропорції 1:5 та наносять у два шари з просушуванням після першого шару 2–3 хв. Рекомендована товщина шару – 0,2 мм. За потреби фарбування повторюють.

4. Закриття кокілю та встановлення стержнів

Після просушування кокіль закривається гідроприводом, встановлюються стержні, після чого можна проводити заливку металу.

5. Заливка металу

В якості металу використовують алюмінієвий сплав АК5М2Ц4 з температурою заливки 720–740 °С. Сплав заливають у форму ковшем ємністю 10 кг.

6. Охолодження та витягування виливка

Після охолодження та повного затвердіння виливка досягається температура витягування (8–10 хв). Гідроприводом видаляють стержні, розкривають кокіль.

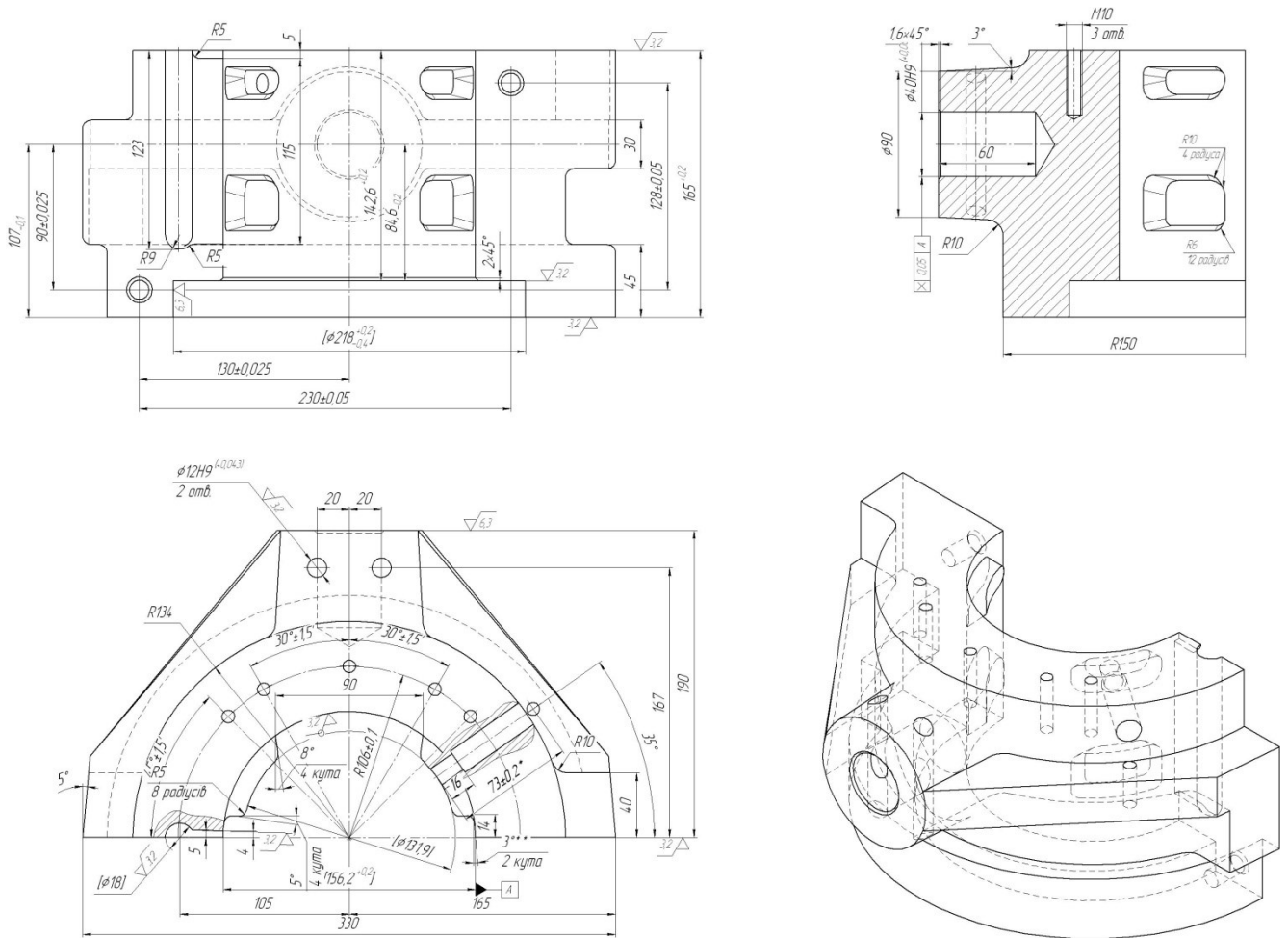


Рис. 2.6. Напівформа кокіля

7. Виймання та часткове гартування

Виливок знімають кліщами за підживлювач і опускають у бак з водою для часткового гартування та надання необхідних механічних властивостей. Після заповнення тари її транспортують цеховим транспортом на очисну ділянку.

8. Очистка та відділення підживлювачів

Виливки подаються на стрікопильний верстат для відділення підживлювачів. Допустима висота залишку підживлювача – до 5 мм.

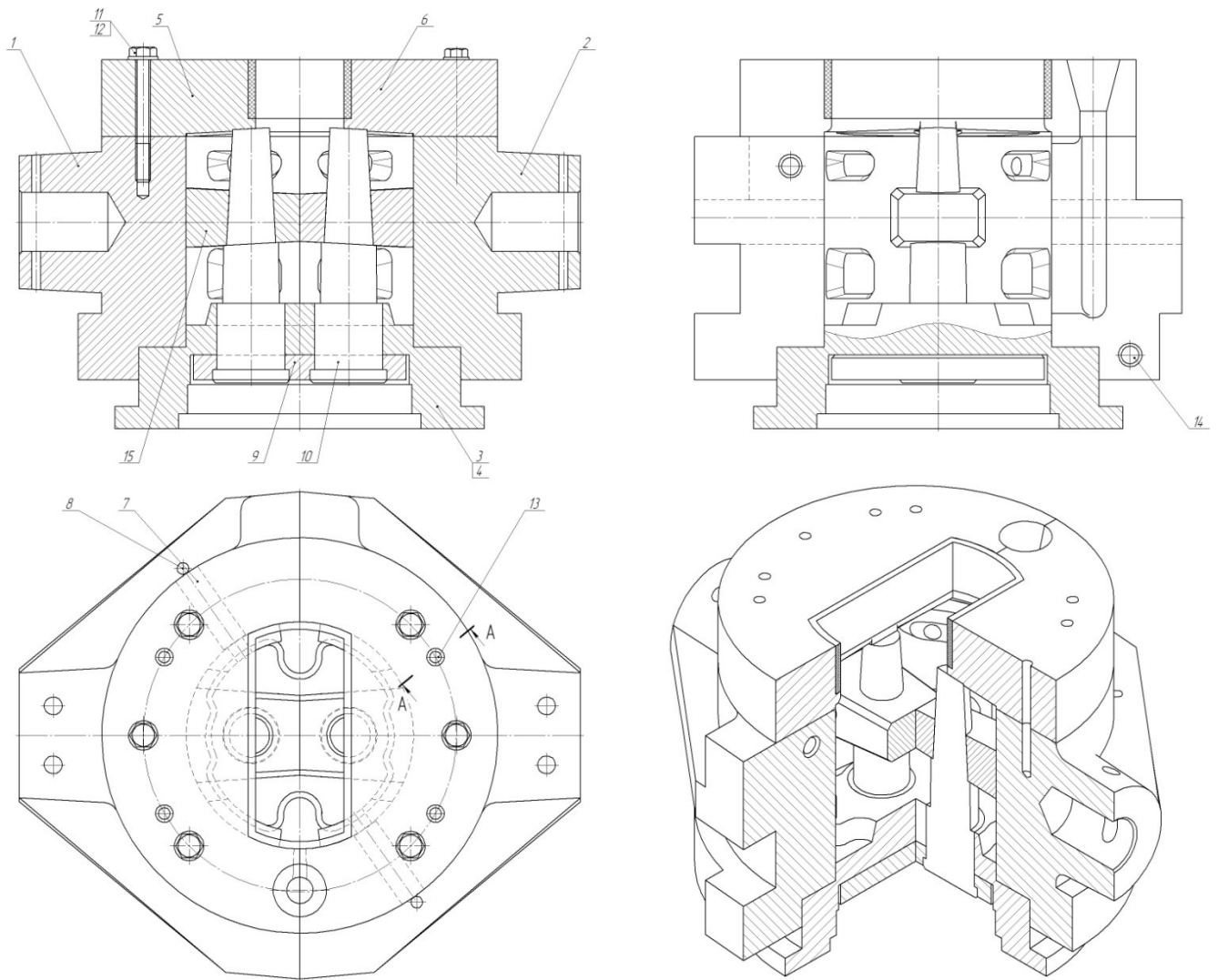


Рис. 2.7. Кокіль в зборі

9. Контроль якості

Після очистки виливки транспортують на естакаду очисної ділянки для пред'явлення відділу технічного контролю. Контроль проводиться вибірково та включає:

- вимірювання твердості у центрі підживлювача приладом ТШ-2 за наступними параметрами: діаметр кульки 10 мм, навантаження 1000 кгс, витримка 30 с. Місце вимірювання твердості вказується на кресленні виливка. Твердість перевіряється на трьох виливках однієї партії раз на зміну;

– візуальний огляд для виявлення дефектів (допускаються дефекти на оброблюваних поверхнях не більше 2/3 припуску на механічну обробку). Візуальний огляд проводиться на всіх виливках партії;

– вимірювання базових розмірів проводиться на трьох виливках однієї партії один раз в зміну. Вимірювання всіх розмірів проводиться при встановлені нової форми.

Також перевіряється хімічний склад сплаву на спеціально відлитих зразках спектральним методом – один раз на плавку.

Пористість перевіряється один раз в місяць на вирізаних з тіла виливка зразках.

Міцність перевіряється один раз на місяць на трьох окремо відлитих зразках без термічної обробки і на трьох зразках після проходження термічної обробки. Періодичність перевірки міцності – один раз на місяць.

10. Перевірка на герметичність

Виливок перевіряється на герметичність на спеціальних гідравлічних стендах.

2.5. Опис процесу проектування ливарної оснастки

Кокіль для виготовлення виливків блоку обойми підшипникової шестеренчатого насоса НШ100А-3-05 виготовляють із сірого чавуну СЧ20 методом лиття. Після виготовлення проводиться механічна обробка формоутворюючих поверхонь кокілю.

Стержні:

Круглі стержні виготовляють механічною обробкою круглих заготовок. Поверхні, що контактують із рідким металом, полірують. Матеріал – сталь 45 за ГОСТ 1050.

Плоскі стержні виготовляють механічною обробкою плоских заготовок. Контактні поверхні також піддають поліруванню. Матеріал – сталь 45 за ГОСТ 1050.

Усі стержні піддають термообробці – азотуванню з товщиною шару $h=0,05$ мм та твердістю HRC 30–35.

2.6. Висновки по розділу

1. Проведено аналіз конструкції деталі та технічних умов на виливок.
2. Описано етапи розробки технологічного процесу виготовлення виливка.
3. Розроблено модельно-ливарні вказівки та технічні умови на виливок.
4. Сконструйовано ливниково-живильну систему та перевірено її ефективність.
5. Описано технологічний процес виготовлення виливка.
6. Описано процес проектування ливарного оснащення.
7. Підготовлено технологічні креслення деталі з модельно-ливарними вказівками, кресленнями правої та лівої напівформ та форми в зборі.

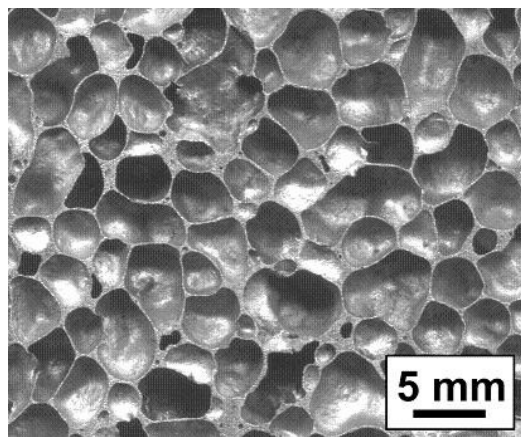
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІКИ ПРОЦЕСІВ ДИСОЦІАЦІЇ КАРБОНАТІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ПІНОАЛЮМІНІЮ

3.1. Перспективи використання піноалюмінію в промисловості

Піноалюміній є сучасним металевим матеріалом з пористою, комірковою структурою, яка поєднує малу густина, високу міцність і унікальні функціональні властивості. Його розвиток і впровадження в промисловість стають дедалі актуальнішими на тлі загальної тенденції до зменшення маси конструкцій, підвищення енергоефективності та застосування інноваційних матеріалів, здатних виконувати декілька функцій одночасно. Перспективи використання піноалюмінію сьогодні є дуже широкими й охоплюють різні галузі техніки, будівництва, енергетики та навіть медицини. Приклади застосування піноалюмінію показані на рис. 3.1.



Литий піноалюмінієвий блок з закритими порами

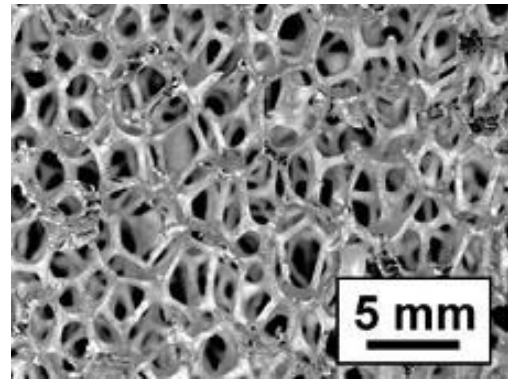


Область застосування:

- зміцнюючі та демпфуючі елементи для автопрому;
- елементи акустичних систем;
- шумогасники при скиданні високого тиску;

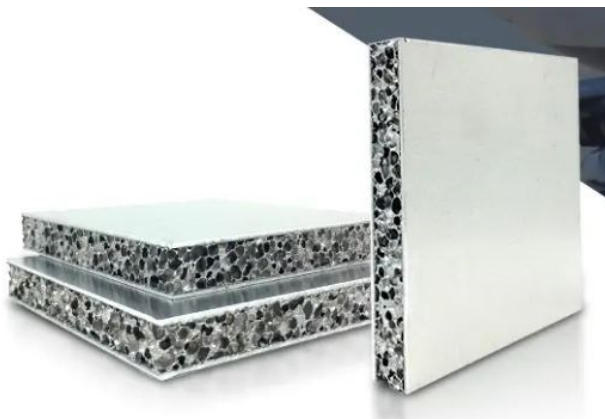


Алюмінієвий пінометал з відкритими (негерметичними) порами



Область застосування:

- теплотехніка, теплоенергетика;
- теплообмінні пристрої;
- вогне- і полум'яперегороджувачі.



Сендвіч-панель з піноалюмінію

Область застосування:

- шумозахисні екрани (для шосе, аеропортів, мостів та ін);
- звукопоглинаючі панелі (для кінотеатрів, стадіонів, житлових будівель та ін);
- надлегкі та термостійкі конструкційні елементи, три- та двошарові панелі, композиційні матеріали.



Піноалюміній з регулярною структурою порожнин

Область застосування:

- спеціальні елементи техніки: теплообмінні та тепловідвідні пристрої, шумопоглиначі, заповнювачі порожнин і ємностей, демпфери механічних, акустичних та електромагнітних імпульсів, вирівнювачі газових потоків, трибальні матриці та регулятори горіння палива;

Рисунок 3.1 – Види та приклади застосування піноалюмінію

Таблиця 3.1 – Фізичні властивості панелі з піноалюмінію

Алюмінієва пінопанель із закритими комірками		
Основна функція	Хімічний склад	Понад 97% алюмінію
	Тип клітини	Закритоклітинний
	Щільність	0,3-0,75 г/см ³
Акустична функція	Коефіцієнт акустичного поглинання	NRC 0,70~0,75
Механічна особливість	Міцність на розрив	2~7 МПа
	Міцність на стиск	3~17 МПа
Теплова функція	Теплопровідність	0,268 Вт/мК
	Температура плавлення	прибл. 780 °С
Додаткова функція	Здатність екранувати електромагнітні хвилі	Понад 90 дБ
	Тест на сольовий спрей	Відсутність корозії

Однією з ключових сфер, де піноалюміній демонструє найбільший потенціал, є машинобудування та транспорт. Завдяки своїй низькій густині він дозволяє істотно знизити масу конструкцій, не жертвуючи їхньою жорсткістю чи міцністю. У сучасному автомобілебудуванні цей матеріал розглядають як перспективний для виготовлення елементів пасивної безпеки, зокрема енергопоглинаючих вставок у бамперах, захисних структур у кузові чи деформаційних зон, здатних зменшувати наслідки удару. Легкість конструкцій на основі піноалюмінію сприяє зниженню витрат пального, а для електромобілів — збільшенню запасу ходу завдяки зменшенню загальної маси. В авіабудуванні та ракетній техніці піноалюміній використовується як матеріал для легких панелей жорсткості, антивібраційних елементів і теплоізоляційних шарів, оскільки поєднання пористої структури та металевої основи забезпечує високу стабільність і добру опірність коливанням. У залізничному транспорті він може застосовуватися в обшивці вагонів, протиударних

бар'ерах і конструкціях, які мають витримувати значні навантаження без суттєвого збільшення ваги.

Будівельна індустрія також виявляє інтенсивний інтерес до піноалюмінію, особливо в умовах переходу до енергоефективних та «зелених» технологій. Коміркова структура матеріалу забезпечує високі теплоізоляційні властивості, а негорючість робить його перспективним матеріалом для протипожежних перегородок, екранів та ізоляційних панелей, здатних витримувати значні температури без втрати властивостей. Естетичний зовнішній вигляд піноалюмінію, який може мати як природну пористу поверхню, так і декоративні варіанти з різними фактурами, робить його привабливим для використання у фасадних системах та інтер'єрному дизайні. До того ж його звукопоглинальні характеристики дозволяють застосовувати його для акустичних панелей у громадських будівлях, студіях, офісах чи для шумозахисних екранів уздовж доріг.

Перспективи використання піноалюмінію в енергетиці пов'язані з його здатністю ефективно проводити або, навпаки, ізолювати тепло залежно від конкретної структури. Пориста металева матриця створює розвинену поверхню теплообміну, що дає можливість застосовувати піноалюміній у теплообмінниках нового типу та радіаторах. У сфері водневої енергетики ведуться дослідження його використання як носія каталізаторів та як елемента, здатного розсіювати теплові навантаження завдяки високій теплопровідності металу та низькій масі конструкції.

У хімічній, екологічній та загалом технологічній промисловості піноалюміній може служити фільтрувальним матеріалом, стійким до агресивних середовищ, або основою для каталітичних систем, оскільки пориста структура значно збільшує площу поверхні. Він може застосовуватися в обладнанні, що потребує корозійної стійкості та одночасно низької маси, а також у системах шумоглушення та віброізоляції, де важлива здатність матеріалу поглинати механічну

енергію та знижувати резонансні коливання.

Особливий інтерес піноалюміній становить для оборонної промисловості. Комбіновані багатошарові панелі на основі сталі або композитів з прошарками піноалюмінію демонструють високу здатність до поглинання енергії вибуху та удару. Хоч сам по собі піноалюміній не є броньовим матеріалом, він значно підвищує ефективність багатошарових конструкцій, одночасно знижуючи їхню вагу. Це актуально для військової техніки, інженерних споруд і засобів захисту.

У медицині можливості застосування піноалюмінію пов'язані з його малою густиною, хорошою амортизацією та рентгенівською прозорістю. Він може використовуватися як вставковий матеріал у протезах, ортопедичних конструкціях і в біоінженерії, де його пористість дозволяє створювати каркаси складних форм. Розвиток технологій 3D-друку та адитивного виробництва відкриває перспективу виготовлення піноалюмінієвих імплантів з індивідуальною геометрією, хоча це поки що більше дослідна сфера.

Узагальнюючи, можна сказати, що піноалюміній має значні перспективи в промисловості, оскільки поєднує легкість, міцність, корозійну стійкість, звукопоглинання, теплоізоляційні властивості та здатність поглинати механічну енергію. Ці характеристики роблять його багатофункціональним матеріалом, здатним одночасно виконувати конструкційні, захисні та функціональні ролі. Розвиток технологій виробництва, зокрема адитивних методів, спрощення процесів спінювання та використання вторинної алюмінієвої сировини сприяють зниженню вартості матеріалу і поступовому переходу від малосерійного до масового застосування. У найближчі роки очікується розширення його присутності у транспорті, будівництві, енергетиці та обороні, а подальше вдосконалення технологій виробництва зробить піноалюміній невід'ємною частиною нових поколінь інженерних конструкцій і функціональних матеріалів.

3.2. Основні методи отримання піноалюмінію

Піноалюміній є перспективним пористим металевим матеріалом, якому притаманне поєднання малої густини, достатньо високої міцності, значної енергопоглинальної здатності та корозійної стійкості. Його характеристики істотно залежать від методу отримання, оскільки структура пор, їх розмір та розподіл визначають механічні, теплові й акустичні властивості матеріалу. У сучасному матеріалознавстві найбільш поширеними є методи спінювання розплаву, порошкової металургії, інфільтрації жертвенної матриці та адитивного формування структур, які дають змогу одержувати піноалюміній із заданими властивостями [11–13].

Одним із найбільш традиційних методів отримання піноалюмінію є **спінювання розплавленого металу**. Сутність методу полягає у введенні газу в рідкий алюміній з метою утворення множинних газових включень, що формують пористу структуру. Газ може подаватися через пористі керамічні або металеві барботери, або ж утворюватися *in situ* внаслідок розкладання газоутворювачів, зокрема гідриду титану TiH_2 [12]. Для стабілізації піни в розплав додають дрібнодисперсні оксидні або карбідні частинки, які підвищують в'язкість та перешкоджають руйнуванню бульбашок. Попри простоту реалізації та низьку собівартість, метод характеризується обмеженим контролем над структурою пор: одержувана піна є нерівномірною, що може призводити до значної анізотропії механічних властивостей [11].

Більш точним і керованим є **метод порошкової металургії**, який дозволяє формувати піноалюміній зі стабільними характеристиками. Технологія передбачає змішування металевого порошку з порошком газоутворювача, пресування суміші та подальше гаряче ущільнення. Під час нагрівання до температури, близької до плавлення алюмінію, газоутворювач розкладається, утворюючи газ, який формує пори в

напівтвердому об'ємі [13]. Метод забезпечує можливість точного контролю над вмістом газоутворювача, розподілом пор, їх розміром і морфологією. Він також дає змогу виготовляти конструкційні панелі типу "sandwich", де шар піноалюмінію виконує роль енергопоглинального осердя між двома металевими обшивками [14].

Метод інфільтрації жертвенної матриці базується на попередньому створенні пористої структури з розчинних або таких, що вигорають, матеріалів: солей, цукрів, полімерів чи інших композицій. Сформовану матрицю заповнюють розплавленим алюмінієм під тиском або за допомогою вакуумної інфільтрації. Після затвердіння металу матрицю видаляють, що дозволяє одержати піноалюміній із високою регулярністю й передбачуваністю геометрії пор [15]. Такий матеріал демонструє стабільні механічні та теплові характеристики, тому є перспективним у теплообмінниках, фільтраційних системах і конструкціях, де важливе точне керування пористістю.

Розвиток адитивних технологій відкрив можливість **створення пористих металевих структур методом 3D-друку**, зокрема шляхом лазерного спікання або плавлення порошків (SLM, DMLS). Такі структури не є піною у класичному сенсі, однак вони здатні імітувати механічні властивості традиційних металевих пін і водночас перевершувати їх за точністю відтворення архітектури пор [16]. Завдяки можливості оптимізувати форму та розмір елементів гратчастої структури адитивно виготовлені пористі матеріали успішно застосовуються в авіаційній промисловості, медицині, робототехніці й інших високотехнологічних галузях.

Таким чином, основні методи отримання піноалюмінію охоплюють широкий спектр технологічних підходів — від спінювання розплаву, що характеризується відносною простотою, до високотехнологічних адитивних процесів, які дозволяють створювати матеріали з точно контрольованою пористою архітектурою. Кожен із методів має свої

переваги й обмеження, а його вибір визначається вимогами до кінцевих характеристик матеріалу. Постійний розвиток технологій виготовлення піноалюмінію та розширення сфер його застосування свідчать про зростаючу роль цього матеріалу в сучасному матеріалознавстві та інженерії.

3.3. Обґрунтування застосування порофорів на основі карбонатів при виробництві піноалюмінію

Виробництво піноалюмінію із застосуванням карбонатів є перспективним напрямом, що останніми роками привертає увагу дослідників через можливість здешевлення технології та зменшення залежності від традиційних газоутворювачів, таких як гідрид титану (TiH_2). Використання карбонатів (вапняку $CaCO_3$, карбонату магнію $MgCO_3$, заліза $FeCO_3$) ґрунтується на їх здатності розкладатися при високих температурах із виділенням діоксиду вуглецю, який і формує пористу структуру в об'ємі розплавленого або напівтвердого алюмінію.

Перша перспективність технології полягає у доступності та дешевизні карбонатів. На відміну від TiH_2 , який потребує складного синтезу й значних витрат, вапняк є одним із найбільш поширених мінералів, що зменшує собівартість піноутворення та робить процес придатним для масового промислового виробництва. Це особливо важливо для галузей, де необхідні великі обсяги пористих матеріалів — будівництва, автомобілебудування та виробництва енергопоглинальних модулів.

Другий важливий аспект — екологічність процесу. Наявні промислові методи виготовлення піноалюмінію базуються на газоутворювачах, які можуть бути токсичними або вимагати утилізації небезпечних побічних продуктів. Вапняк, натомість, є природним матеріалом, а його розкладання супроводжується утворенням CO_2 без додаткових шкідливих домішок. Це

робить технологію придатною для інтеграції у «зелені» виробничі цикли та проекти з низьким екологічним слідом.

Третя перспектива — можливість тонкого контролю пороутворення. Розклад CaCO_3 відбувається в інтервалі температур, близьких до плавлення алюмінію, що дає змогу оптимізувати процес утворення пор і їх рівномірність. Дослідження показують, що попередня механохімічна активація вапняку, його диспергування до нанорозмірів або комбінування з металевими порошками сприяють формуванню стабільної піни з покращеною однорідністю. Це відкриває шлях до виготовлення конструкційних панелей, теплообмінних елементів і звукопоглинальних структур із більш передбачуваними властивостями.

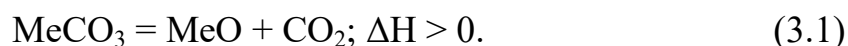
Окремо варто зазначити технологічну сумісність CaCO_3 із порошковою металургією. У таких технологіях газоутворювач змішують з алюмінієвим порошком і пресують у компакт, який згодом нагрівають. Вапняк як газогенератор добре інтегрується в цей процес, дозволяючи уникати необхідності термічної активації гідридів та спрощує апаратурну частину виробництва.

Перспективним є також комбіноване використання CaCO_3 з дрібнодисперсними стабілізуючими оксидами (Al_2O_3 , SiO_2), що забезпечує підвищену в'язкість напівтвердого металу та кращу стабільність сформованих газових бульбашок. Це дозволяє отримувати матеріали із більш рівномірною пористістю, зменшеним розміром пор і покращеними механічними характеристиками.

Таким чином, використання вапняку для виробництва піноалюмінію відкриває одразу кілька перспективних можливостей — від здешевлення і спрощення процесу до його екологізації та покращення контрольованості структури матеріалу. Попри необхідність подальших досліджень щодо стабілізації піни та оптимізації параметрів розкладу CaCO_3 , цей напрямок має потенціал стати однією з ключових технологій у промисловому виробництві металевих пін нового покоління.

3.4. Порівняльний аналіз пружності дисоціації карбонатів CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3

Дисоціація карбонатів в загальному вигляді відбувається за ендотермічною реакцією [17]:



Ця реакція оборотна і її константа рівноваги в загальному випадку визначається за формулою:

$$K_p = \frac{a_{\text{MeO}} \cdot p_{\text{CO}_2}}{a_{\text{MeCO}_3}}, \quad (3.2)$$

де a_{MeO} , a_{MeCO_3} – рівноважні активності оксиду і карбонату;

p_{CO_2} – рівноважний парціальний тиск CO_2 (пружність дисоціації карбонату MeCO_3).

Якщо карбонат і оксид – хімічно чисті речовини, що знаходяться в розчині, то їх активності рівні одиниці. Тоді константа рівноваги цієї реакції визначається тільки пружністю дисоціації карбонату MeCO_3 :

$$K_p = p_{\text{CO}_2}. \quad (3.3)$$

Взаємозв'язок між числом термодинамічних ступенів свободи рівноважної системи C , числом незалежних компонентів K і кількістю фаз f встановлюється за допомогою рівняння правила фаз Гібса:

$$C = K + 2 - f. \quad (3.4)$$

У даному випадку система складається з двох незалежних компонентів (

$K = 2$) за наявності трьох фаз ($f = 3$) (двох конденсованих – MeO і MeCO₃ і однієї газової – CO₂) має один ступінь свободи:

$$C = K + 2 - f = 2 + 2 - 3 = 1.$$

Це означає, що значення рівноважного парціального тиску p_{CO_2} буде залежати тільки від температури:

$$p_{\text{CO}_2} = f(T) = K_p. \quad (3.5)$$

Характер цієї залежності встановлюється рівнянням ізобари реакції:

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{\Delta H^0}{RT^2}. \quad (3.6)$$

Оскільки для даної реакції ΔH^0 має додатне значення, то функція $K_p = p_{\text{CO}_2} = f(T)$ повинна бути зростаючою функцією температури. Явний вигляд даної функції можна отримати двома способами:

Перший спосіб. Згідно з виразом (8.25) маємо:

$$\ln K_p = -\frac{\Delta G^0}{RT}. \quad (3.7)$$

В свою чергу, оскільки $\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^0$ (див. вираз (7.26)), то:

$$\ln K_p = -\frac{\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R}. \quad (3.8)$$

Після потенціювання виразу (3.8), та з урахуванням (3.5) маємо:

$$p_{\text{CO}_2} = K_p = \exp \left\{ -\frac{\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \right\}. \quad (3.8)$$

Другий спосіб. Проінтегруємо вираз (3.6) в межах $T \in (0; \infty)$:

$$\int d \ln p_{\text{CO}_2} = \int \frac{\Delta H^0}{RT^2} dT; \quad (3.9)$$

$$\ln p_{\text{CO}_2} = -\frac{\Delta H^0}{RT} + \text{const}. \quad (3.10)$$

Згідно із фізичним змістом сталою інтегрування у виразі (3.10) буде логарифм константи рівноваги при нескінченно високій температурі $\ln p_{\text{CO}_2}^\infty$ (при $T \rightarrow \infty$), який в свою чергу рівний:

$$\ln p_{\text{CO}_2}^\infty = \frac{\Delta S^0}{R}. \quad (3.11)$$

Підставивши (3.11) в (3.10) отримаємо:

$$\ln p_{\text{CO}_2} = -\frac{\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R}, \quad (3.12)$$

або

$$p_{\text{CO}_2} = \exp \left\{ -\frac{\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R} \right\}. \quad (3.13)$$

Порівняння різних карбонатів між собою за їх міцністю проводяться за допомогою значень їх пружностей дисоціації. Чим вища пружність дисоціації карбонату при одній і тій же фіксованій температурі, тим слабкіший карбонат, і навпаки (рис. 3.2).

Порівняння міцності карбонатів можна здійснити за допомогою вільної енергії Гібса. Запишемо вирази вільної енергії Гібса для різних карбонатів, адже при $\Delta G_T^\circ = 0$ буде починатись хімічне кипіння карбонату:



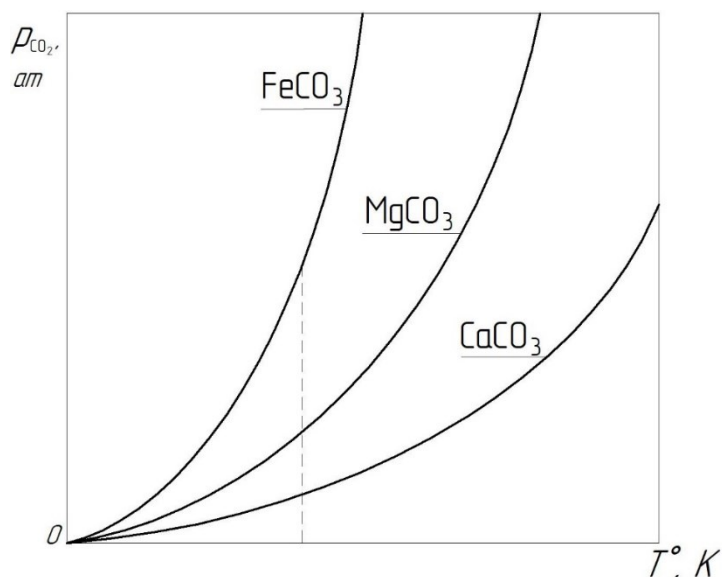


Рис. 3.2. До порівняння міцності різних карбонатів

З рис. 3.2 видно, що CaCO_3 найміцніший а FeCO_3 найслабкіший.

Розрахунок термодинамічних характеристик (ентальпія ΔH , ентропія ΔS , вільна енергія Гібса ΔG , логарифм константи рівноваги $\ln K_p$) вказаних вище реакцій, здійснюємо в інтервалі температур 298...1198 К скориставшись довідковими даними термодинамічних властивостей реагентів [17]. Методика розрахунку описана в [17]. Результати розрахунку представлено в табл. 3.2 – 3.5 та на рис. 3.3 – 3.6.

Таблиця 3.1 – Розрахункові значення ентальпії реакцій розкладу карбонатів кальцію CaCO_3 , магнію MgCO_3 та заліза FeCO_3

Т, К	ΔH , Дж/моль		
	CaCO_3	MgCO_3	FeCO_3
298	178023	100550	79790
398	177302	102244	85180
498	176612	102350	84295
598	175251	101157	82885
698	173899	99721	80726
798	172396	97781	77788
898	170765	95367	74540
998	169190	92497	69512
1098	167166	89183	64158
1198	165213	85433	57985
1298	163163	81251	50992

Таблиця 3.3 – Розрахункові значення ентропії реакцій розкладу карбонатів кальцію CaCO_3 , магнію MgCO_3 та заліза FeCO_3

Т, К	ΔS , Дж/моль К		
	CaCO_3	MgCO_3	FeCO_3
298	160,02	175,63	179,01
398	163,72	177,317	176,602
498	161,78	176,879	175,8
598	159,66	175,29	172,448
698	157,57	173,8	169,125
798	155,56	170,489	165,203
898	153,63	167,645	160,804
998	151,79	164,619	156,16
1098	150,24	161,458	150,909
1198	148,32	158,191	145,534
1298	146,68	154,841	139,932

Таблиця 3.4 – Розрахункові значення вільної енергії Гібса реакцій розкладу карбонатів кальцію CaCO_3 , магнію MgCO_3 та заліза FeCO_3

Т, К	ΔG , Дж/моль		
	CaCO_3	MgCO_3	FeCO_3
298	130337	48212,26	26445,02
398	112141	31671,83	14892,4
498	96048	14264,26	-3253,4
598	79777	-3666,42	-20238,9
698	63916	-21591,4	-37323,25
798	48260	-38269,22	-54043,99
898	32802	-55178,21	-69861,99
998	17702	-71792,76	-86335,68
1098	2202,5	-88097,88	-101540,1
1198	-12477	-104079,8	-116364,7
1298	-27225	-119732,6	-130639,7

Таблиця 3.5 – Розрахункові значення логарифму константи рівноваги реакцій розкладу карбонатів кальцію CaCO_3 , магнію MgCO_3 та заліза FeCO_3

T, K	ln Kp		
	CaCO_3	MgCO_3	FeCO_3
298	-52,61	-19,45948	-10,67376
398	-33,89	-9,571503	-4,500613
498	-23,2	-3,445163	0,785775
598	-16,05	0,737447	4,070763
698	-11,01	3,72062	6,431526
798	-7,274	5,768152	8,145815
898	-4,393	7,390626	9,357387
998	-2,133	8,65247	10,40518
1098	-0,241	9,650573	11,12308
1198	1,2527	10,4496	11,683
1298	2,5228	11,09501	12,10572

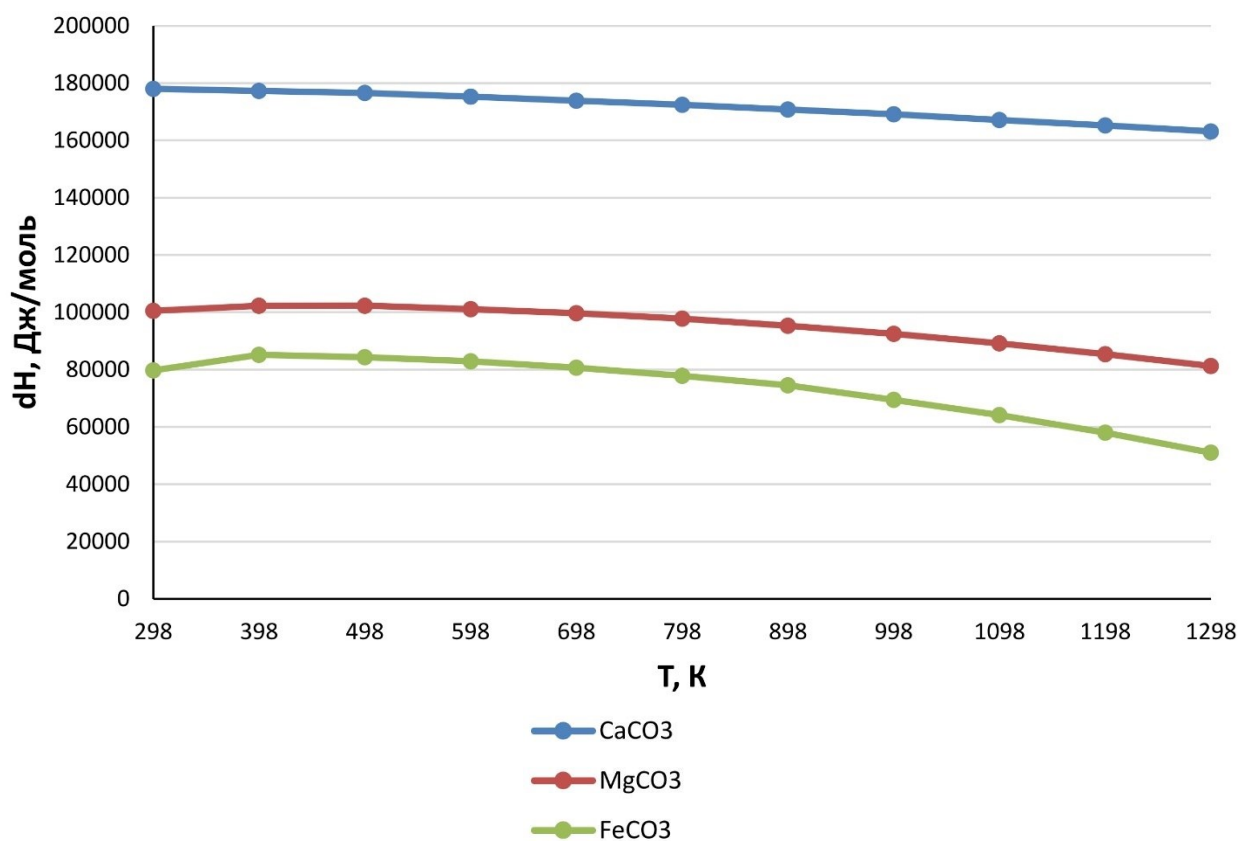


Рисунок 3.3 – Графік залежності ентальпії реакцій розкладу карбонатів кальцію CaCO_3 , магнію MgCO_3 та заліза FeCO_3

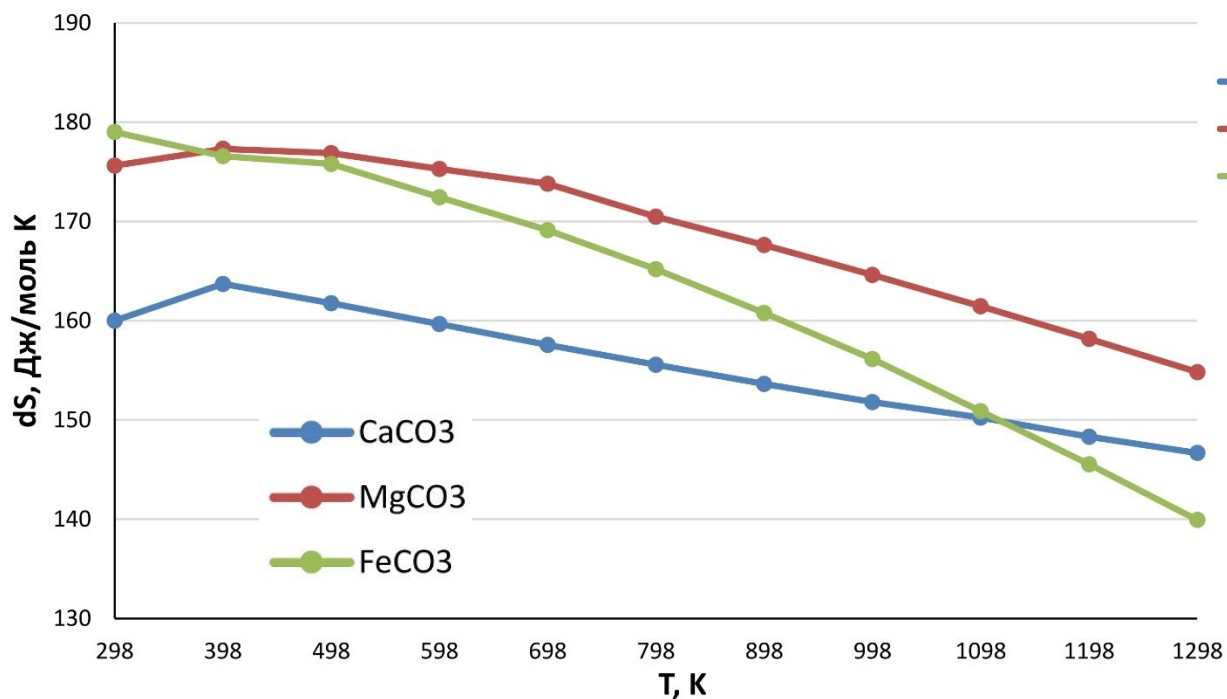


Рисунок 3.4 – Графік залежності ентропії реакцій розкладу карбонатів кальцію CaCO_3 , магнію MgCO_3 та заліза FeCO_3

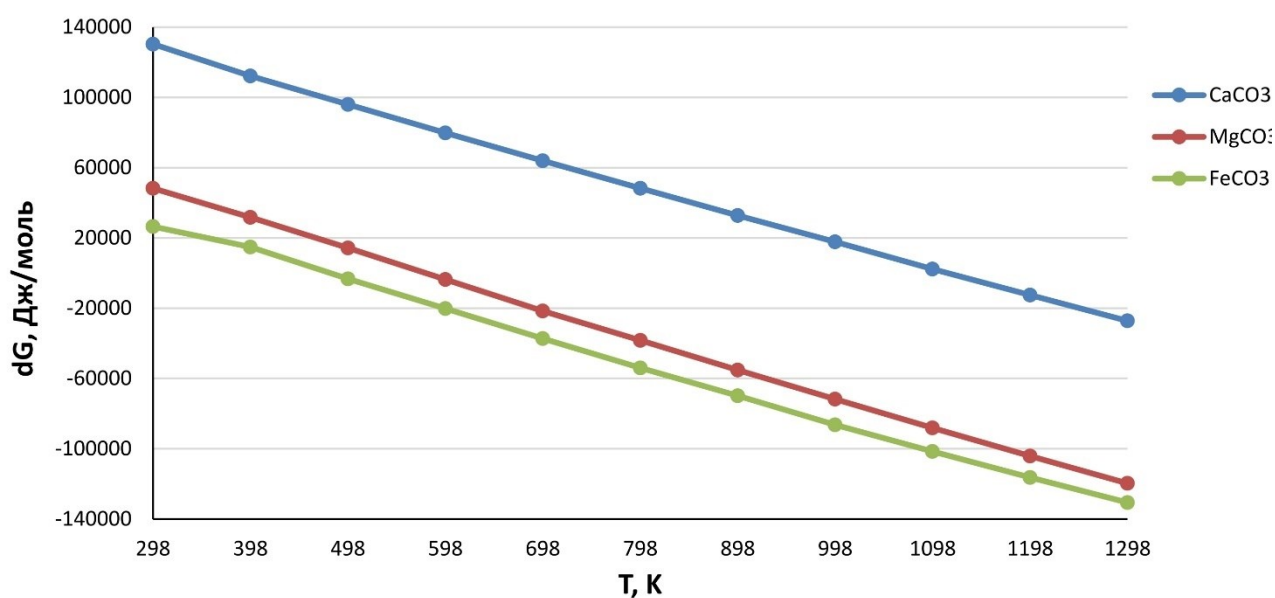


Рисунок 3.5 – Графік залежності енергії Гібса реакцій розкладу карбонатів кальцію CaCO_3 , магнію MgCO_3 та заліза FeCO_3

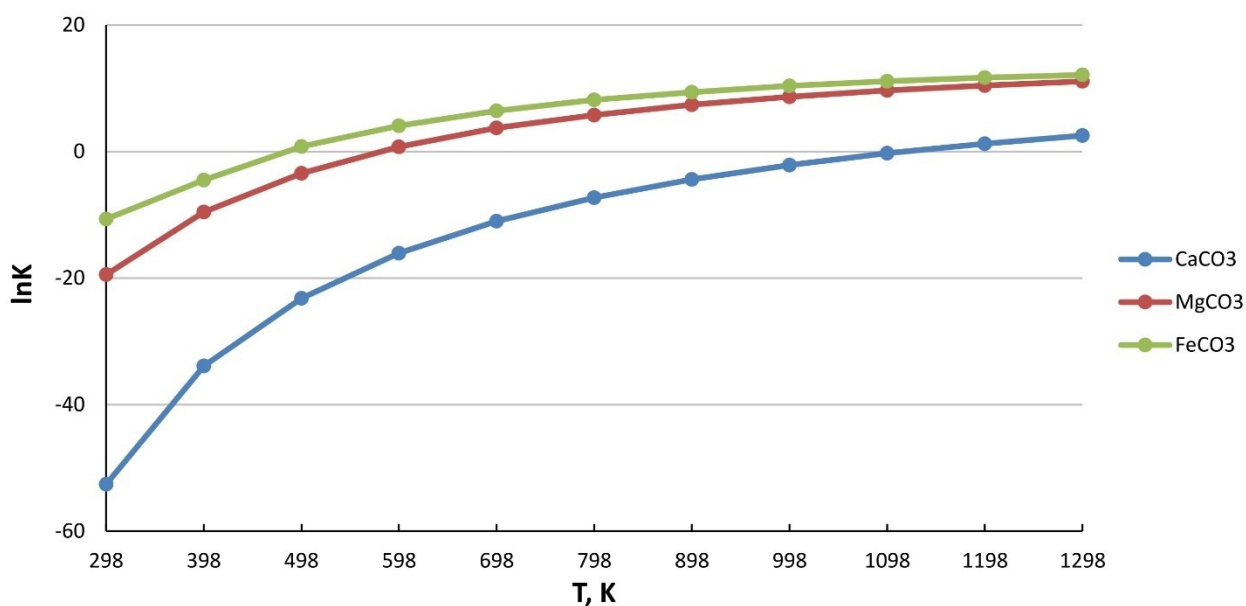


Рисунок 3.6 – Графік залежності логарифму K_p реакцій розкладу карбонатів кальцію CaCO_3 , магнію MgCO_3 та заліза FeCO_3

3.4. Висновки по розділу

1. Описано перспективи використання піноалюмінію в промисловості. Розглянуто основні способи виробництва піноалюмінію. Досліджено термодинамічні характеристики процесів дисоціації карбонатів при виробництві піноалюмінію.

2. З графіка залежності $\Delta H = f(T)$ (рис. 3.3) видно, що реакції розкладу карбонатів кальцію CaCO_3 , магнію MgCO_3 та заліза FeCO_3 є ендотермічними на всьому температурному інтервалі – протікають з поглинанням теплоти, про що свідчать додатні значення ентальпії. Причому, карбонат заліза поглинає найменше теплоти, а карбонат кальцію – найбільше. Характер залежності ентропії в цілому такий же, як і у ентальпії. Виходячи з першого слідства з принципу Потилицина–Ле-Шалельє–Брауна (ПЛБ) підвищення температури буде сприяти протіканню реакцій дисоціації. Отже при підвищенні температури інтенсивність піноутворення буде зростати.

3. Вільна енергія Гібса (рис. 3.5) спочатку додатна для всіх карбонатів. Це є ознакою того, що реакції протікають в зворотному напрямку утворення

карбонатів. З підвищенням температури функції ΔG починають зменшуватись і змінюють свій знак на від'ємний. Це є ознакою того, що реакції починають протікати в необхідному нам прямому напрямку – розкладу карбонатів з утворенням газу CO_2 . Температури початку хімічного кипіння карбонатів складають: для FeCO_3 – 446 К (173 °С), для MgCO_3 – 574 К (301 °С), для CaCO_3 – 1114 К (841 °С).

4. З другого слідства з принципу ПЛБ слідує, що при зменшенні тиску в системі повинен проходити процес, який супроводжується збільшенням кількості газоподібних молекул і навпаки. Оскільки, згідно з хімічними реакціями розкладу карбонатів відбувається збільшення кількості газоподібних молекул, а саме CO_2 , то для інтенсифікації даного процесу необхідно зменшувати тиск і піноутворення доцільно поєднувати з вакуумуванням.

5. З третього слідства з принципу ПЛБ слідує, що для того щоб реакція протікала якомога повніше необхідно підвищувати площу реакційної поверхні вихідних речовин шляхом подрібнення шматків карбонату.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі за другим (магістерським) рівнем вищої освіти розв'язане важливе науково-технічне завдання розробки технології лиття в кокіль вилівка «Обойма» з дослідженням термодинаміки процесів дисоціації карбонатів при виробництві піноалюмінію.

При розв'язанні даного завдання вирішено наступні задачі:

- вибрано обладнання для виготовлення вилівоків та описано роботи ливарного цеху;
- розроблено технологію лиття в кокіль вилівка «Обойма»;
- досліджено термодинамічні характеристики хімічних реакцій дисоціації карбонатів, що протікають при плавлі піноалюмінію;
 - розроблено рекомендації щодо удосконалення процесу виробництва піноалюмінію із застосуванням карбонатів.

В першому розділі магістерської роботи наведено обґрунтування розташування та режиму роботи ливарного цеху, детально описано функціонування його основних відділень: плавильного, лиття в кокіль, відрізки та обрубки ливників, фінішних операцій, а також допоміжних підрозділів – дільниці ремонту та футеровки ковшів, складу модельного оснащення, відділу технічного контролю та лабораторії спектрального аналізу, адміністративних і побутових приміщень. Для плавлі металу обрано індукційні тигельні печі ІАТ-2,5/1,15 ємністю 850 кг. Наведено їхню конструкцію та технічні характеристики. Для розливання сплаву у форми застосовуються роздавальні печі НО-136 ємністю 220 кг. Описано процес рафінування алюмінієвих сплавів. Для виготовлення вилівоків використано два типи кокільних верстатів: шестипозиційну машину моделі 59К613 для дрібних і середніх вилівоків масою до 7 кг та однопозиційну універсальну машину моделі 82А403 для великих вилівоків понад 7 кг. Наведено їхню будову, принцип роботи, технічні характеристики, а також описано процедуру підготовки кокілів і технологію

лиття. Для відрізання ливників та підживлювачів застосовується стрічковий відрізний верстат JET HVBS-812RKT, а обдирка і зачистка виливків виконуються на обдирно-шліфувальних верстатах моделі 3М634

В технологічному розділі магістерської роботи виконано аналіз конструкції деталі та технічних умов на виливок, описано послідовність розробки технологічного процесу виготовлення виливка, розроблені модельно-ливарні вказівки та технічні умови на виливок, сконструйовано ливниково-живильну систему, описано процес проектування ливарного оснащення, описано технологічний процес виготовлення виливка, розроблені технологічні креслення деталі з розробкою модельно-ливарних вказівок, правої і лівої напівформ та форми в зборі.

В науковому розділі магістерської роботи на основі аналізу термодинамічних характеристик хімічних реакцій дисоціації карбонатів досліджено умови утворення пор та розроблено рекомендації щодо удосконалення процесу виробництва піноалюмінію із застосуванням карбонатів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Проектування машинобудівних заводів та цехів / За ред. В.М. Шестопада. - М.: Машинобудування, 1974. - 294 с.
2. Логінов І.З. Проектування ливарних цехів.-Мінськ: Вища шк., 1975. - 230 с.
3. Рибальченко Н.А. Проектування ливарних цехів. - Вид-во Харк. ун-ту, 1965. - 306 с.
4. Проектування ливарних цехів: Навч. посібник/Б.Ф. Туманський. К.: НМК, 1992. -188 с.
5. Аксьонов П.М. Обладнання ливарних цехів. - М.: Машинобудування, 1997. - 510с.
6. Основи проектування ливарних цехів та заводів/Л. І. Фанталів, Б.В. Кнорре, С. І. Четвертухін: Під. ред. Б.В. Кнорре. - М.: Машинобудування, 1979. - 375 с.
7. Сафронов В.Я. Довідник з ливарного обладнання. - М.: Машинобудування, 1985. - 319 с.
8. Тітов Н.Д., Степанов Ю.А. Технологія ливарного виробництва: Підручник для машинобудівних технікумів. 2-ге вид. Перероб. - М.: Машинобудування, 1978. - 432 с.
9. Степанов Ю.А., Баландін Г.Ф., Рибкін В.А. Технологія ливарного виробництва. - М.: Машинобудування, 1983. - 287 с.
10. Засоби та системи автоматизації ливарного виробництва / К.С. Богдан, В.М. Горбенко, В.М. Денисенко, Ю. П. Каширін. - М.: Машинобудування, 1981. - 287 с.
11. Ashby M.F., Evans A., Fleck N., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G. Metal Foams: A Design Guide. Butterworth-Heinemann, 2000.
12. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science, 46, 2001, pp. 559–632.

13. García-Moreno F. Commercial applications of metal foams: A review. *Materials*, 9(2), 85, 2016.
14. Baumeister J., Schrader H., Weber M. Aluminum Foam Sandwich Panels: Manufacture, Properties and Applications. *Advanced Engineering Materials*, 2019.
15. Duarte I., Oliveira M. Production of metal foams through replication process: A review. *Materials*, 12, 2019.
16. Tang Y., Dong G., Zhao Y.F. Architected and lattice materials via additive manufacturing: A review. *Additive Manufacturing*, 23, 2018, pp. 343–362.
17. Конончук, С.В. Фізико-хімічні основи ливарного виробництва : навч. посіб. / С.В. Конончук, В.М. Кропивний , О.В. Скрипник ; за ред. професора В.М. Кропивного. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 338 с.
18. Сумцов В.П. Устаткування ливарних цехів. - К.: ІСДО, 1993. - 552 с.
19. Ливниково-живильні системи. Конструювання та розрахунок літникових систем. Навчальний посібник/Л.А. Большаков. - Маріуполь: ПДТУ, 2007. - 125 с.
20. Москальов І.Н. Ліварні сплави та їх плавка: Навчальний посібник. - К.: НМК ВО, 1993. - 368 с.
21. Рубцов М.М. Спеціальні види лиття. - М.: Машгіз, 1955. - 331 с.
22. Галдін М.М. Ливникові системи для виливків із легких сплавів. - М.: Машинобудування, 1978. - 195 с.
23. Лиття в кокіль / За ред. А.І. Вейника. - М.: Машинобудув., 1980. - 415 с.
24. Конончук, С.В. Термодинамічні дослідження металургійних процесів : метод. вказ. до виконання лаб. робіт з курсу «Фізико-хімічні основи ливарного виробництва» : для студ.-ливарників спец. 131 “Прикладна механіка”, 133 “Галузеве машинобудування” / С.В. Конончук, О.В. Скрипник ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. матеріалознавство та ливарне виробництво. - Кропивницький : ЦНТУ, 2020. – 44 с.
25. Дубінін М.П. Беліков О.А та ін. Кокільне литво - Довідковий посібник. М.: Машинобудування, 1967. - 456с.

26. Баландін Г.Ф. Теорія формування вилівка. М. Видавництво МДТУ ім. Н.Е. Баумана, 1998 рік. 359 с.

27. Белов А.Ф., Добаткін В.І., Квасов Ф.І. та ін. Алюмінієві метали. Промислові деформовані, спечені та ливарні алюмінієві сплави. Довідник М.: Металургія.1972.С. 552.

28. Фрідляндер І.М. Металознавство алюмінію та його сплавів. Довідник М: Металургія. 1983.С.560.

ДОДАТКИ