

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії чорних металів і ливарного виробництва

Пояснювальна записка
до випускної атестаційної роботи магістра

зі спеціальності 136 – Металургія
ОП «Ливарне виробництво чорних та кольорових металів і сплавів»

на тему:

**Аналіз та удосконалення технології виробництва виливків
із жароміцних сплавів в керамічних формах**

Виконав: студент групи ЛВ-24-1м
Керівник випускної роботи
Нормоконтролер
Завідувач кафедри

Ткач І.І.
Савельєв С.Г.
Савельєв С.Г.
Савельєв С.Г.

Кривий Ріг
2025 р.

ВІДОМОСТІ ОБСЯГУ МАТЕРІАЛІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кіл.	Примітка
				<u>Документація</u>		
A4		1	КНУ.РМ.136.25.500с-14 ПЗ	Пояснювальна записка		
				<u>Графічні матеріали</u>		
A4		2	КНУ.РМ.136.25.500с-14 ПР	Презентація		
A4		3				
A4		4				
A4		5				

					КНУ.РМ.136.25.500с-14 ВМ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ткач І.І.			ВІДОМІСТЬ МАТЕРІАЛІВ			Лім.	Арк.	Акрушіє	
Перевір.		Савельєв С.Г.								2	1
								ЛВ-24-1М			
Н. Контр.		Савельєв С.Г.									
Затверд.		Савельєв С.Г.									

РЕФЕРАТ

Так як виготовлення газотурбінних лопаток методом ЛВМ є складним технологічним процесом, то дуже важливо правильно підібрати сполучний матеріал і наповнювач, за допомогою яких формується оболонка при ЛВМ. У даній роботі досліджувалися властивості сполучного матеріалу на водній основі «Армосил» такі, як в'язкість змочуваність, розтікання і сушка його в залежності від введення в його розчинників.

Таким чином, можлива заміна етилсилікату Армосилом, якщо вводити в нього розчинник, наприклад, етиловий спирт. Поверхня оболонок на першому шарі повинна бути гладкою, з мінімальною шорсткістю, оскільки виливки, отримані ЛВМ, мають жорсткі вимоги до точності поверхні.

Експлуатаційні дефекти в турбінобудуванні є великою проблемою. Існує багато досліджень на тему ерозії з метою підвищення ефективності роботи двигунів і поліпшення характеристик основних компонентів. Ерозія погіршує і знижує продуктивність двигуна, оскільки при використанні відбувається безперервний знос деталей. Якщо тверді частинки потрапляють в двигун, вони пошкоджують поверхню основних частин двигуна. Інтенсивність ерозійного руйнування залежить і від твердості металу і частинок, які пошкоджують поверхню. У даній дисертаційній роботі були використані різні частинки, якими еродувалася поверхня: корунд і кварц з різними значеннями твердості за шкалою Мооса: дев'ять для корунду і шість для кварцу.

При вивченні ерозійних процесів дуже важливо знати вплив її на мікроструктури різних сплавів і як глибоко проникають напруги внаслідок ерозії в зразок. Кристалічна решітка сильно спотворюється в результаті ерозії через пластичну деформацію.

ВСТУП

Метод лиття за виплавлюваними моделями є універсальним способом отримання промислових і художніх виливків будь-яких габаритів, маси і ступеня складності з металів будь-яких марок. Переваги методу дають можливість

максимально наблизити виливку до готового виробу, а в ряді випадків отримати її без механічної обробки. Тому метод ЛВМ часто використовують в турбінобудуванні, і там, де точність поверхні відіграє величезну роль для роботи відповідальних деталей.

Ливарну форму отримують пошаровим нанесенням суспензії на блок моделей, обсіпанням кожного шару вогнетривким піском з подальшим його сушінням (затвердінням). Кількість шарів залежить від якості суспензії, габаритів модельного блоку і зазвичай становить чотири і більше. Суспензія складається з сполучної рідини і пилоподібного вогнетривкого матеріалу. У промисловій технології лиття за виплавлюваними моделями застосовуються різні склади суспензій з різноманітними сполучними — гідролізованим етилсилікатом, рідким склом, кремнеземом, металофосфатами.

В даний час широко розвинене і розвивається турбінобудування. Газотурбінні лопатки є важливою частиною турбінного двигуна. Тому висувують жорсткі вимоги до розробки технології їх лиття, конструктивних форм і властивостей матеріалу.

На рисунку 1 представлено зображення турбінного двигуна. Він має різні відповідальні деталі, які виготовляються з різних жароміцних сплавів, тому що кожна частина двигуна повинна витримувати певну температуру.

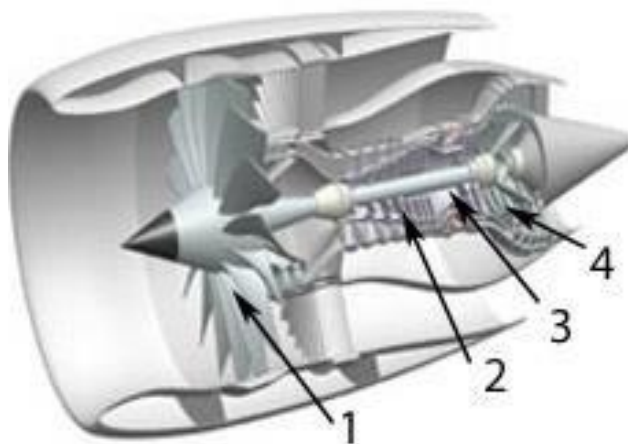


Рисунок 1.1 – Турбінний двигун, де:

1 – повітрозбірник, 2 – компресор, 3 – камера згоряння, 4 – турбіна

Повітряний колектор подає повітря в двигун, де за допомогою компресора воно стискається. Далі змішується з паливом і запалюється в камері згоряння. Повітря направляється на лопатки турбіни, які знімають до 80% потужності газів для обертання компресора. Також невід'ємною частиною будь-якого газотурбінного двигуна є турбіна, призначення якої – отримання енергії від газів, які виходять після камери згоряння на величезних швидкостях. Знаходиться вона на одному валу з компресором. Таким чином, виходить замкнутий цикл. Як і у всіх циклічних теплових двигунах, чим вище температура згоряння, тим вище ККД. Стримуючим фактором є здатність сталі, нікелю, кераміки або інших матеріалів, з яких складається двигун, витримувати температуру і тиск.

Частини компресора виготовляються з Ti6246, який має робочу температуру 450 °C. Остання частина компресора виготовляється зі сплаву TiNb – V4 ($T_p = 750$ °C). Лопаті компресора (робочі та лопатки сопла), колеса ротора турбіни та частини камери згоряння виконані зі сплаву Інконель 718. (Температура 650 ° C) [1].

Робочі лопатки турбін працюють при високих температурах, зазнають великих статичних, вібраційних і температурних напружень. Вони піддаються одночасно корозійному та ерозійному впливу. З огляду на важкі умови роботи робочих лопаток і їх роль в двигуні, до конструктивних форм робочих лопаток турбін, до способу їх кріплення в диску, до їх матеріалів, технології виготовлення і контролю в експлуатації висувають особливо жорсткі вимоги [2]. Однією з обов'язкових вимог до матеріалів є жароміцність. Жароміцні сплави — металеві матеріали, що мають високий опір пластичній деформації і руйнуванню під дією високих температур і окислювальних середовищ. Найбільш широке застосування в авіаційних двигунах отримали нікелеві жароміцні сплави, з яких виготовляють робочі і соплові лопатки, диски ротора турбіни, деталі камери згоряння тощо. Залежно від технології виготовлення нікелеві жароміцні сплави можуть бути ливарними, деформованими і порошковими. Найбільш жаростійкими є ливарні складнолеговані сплави на нікелевій основі, здатні працювати до температур 1050-1100 °C протягом сотень і тисяч годин при високих статичних і динамічних навантаженнях [3].

Іншою вимогою є хороші експлуатаційні властивості. Під час експлуатації двигуна поступово відбувається знос його деталей, коли тверді частинки, захоплені рідиною, пошкоджують поверхню. Виникає ерозія поверхні, яка є експлуатаційним дефектом. Ерозія є серйозною проблемою при використанні промислових і авіаційних газових турбін через різке погіршення продуктивності, за рахунок притуплення лез передніх крайок і зменшення хорди.

Цілями даної роботи є дослідження основних властивостей сполучного «Армосил», що застосовується при литті за виплавлюваними моделями, щоб в подальшому використовувати його, як аналог етилсилікату, а також дослідження властивостей мікроструктури литих виливків з жароміцних нікелевих сплавів.

Актуальність роботи:

У сучасному ливарному виробництві важливе місце займає застосування високоякісних зв'язувальних матеріалів для виготовлення керамічних оболонкових форм, а також дослідження жаростійких сплавів, що працюють в екстремальних температурних умовах. Пошук альтернатив етилсилікату, які забезпечують стабільність суспензії, регульовану швидкість сушіння та високу якість поверхні першого шару, є актуальним завданням для підвищення ефективності технології лиття за виплавлюваними моделями.

Одночасно з цим в умовах нафтохімічної промисловості виникає потреба у вивченні механізмів високотемпературного окиснення сплавів системи Fe–25Cr–35Ni–0,45C–Si–Nb, які працюють при температурах 1100–1200 °C та піддаються швидкій деградації через пористість оксидного шару. Розуміння кінетики утворення окалини, її структури та причин катастрофічного окиснення є необхідним для підвищення експлуатаційної надійності таких матеріалів.

Таким чином, актуальність роботи визначається необхідністю покращення технології виготовлення керамічних форм та поглибленим вивченням термостійкості жароміцних сплавів, що є ключовими факторами для розвитку ливарного та високотемпературного виробництва.

Мета роботи:

Метою роботи є експериментальне дослідження властивостей сполучного «Армосил» та кінетики високотемпературного окиснення жаростійкого сплаву Fe–25Cr–35Ni–0,45C–Si–Nb, а також визначення умов, що забезпечують оптимальне застосування «Армосила» у керамічних суспензіях та підвищення жаростійкості досліджуваного сплаву.

Завдання:

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі основні завдання:

1. Дослідити швидкість випаровування чистого «Армосила» та оцінити вплив введення розчинників на процес сушіння.
2. Встановити можливість заміни етилсилікату на «Армосил» для нанесення першого шару суспензії.
3. Оцінити в'язкість «Армосила» та визначити оптимальний тип розчинника, який забезпечує стабільність розчину.
4. Провести експериментальні дослідження високотемпературного окиснення сплаву Fe–25Cr–35Ni–0,45C–Si–Nb та визначити його стадії.
5. Дослідити вплив структури плівки Cr₂O₃ на кінетику окиснення та виявити умови її деградації.
6. Визначити швидкість корозії сплаву при високих температурах та порівняти її з поведінкою чистих металів.
7. Дослідити механізм утворення оксидних частинок, мікропор та дефектів у поверхневому шарі сплаву.
8. Сформулювати практичні рекомендації щодо застосування «Армосила» та покращення жаростійкості сплаву.

Об'єкт дослідження:

- зв'язувальне сполучне «Армосил» та його поведінка у складі керамічної суспензії;
- жароміцний сплав системи Fe–25Cr–35Ni–0,45C–Si–Nb.

Предмет дослідження:

- кінетичні та фізико-хімічні властивості «Армосила», процес його випаровування та взаємодія з розчинниками;

- механізм і кінетика високотемпературного окиснення сплаву, структура окалини та її захисні властивості.

1. ВИЛИВКИ ТУРБІННИХ ЛОПАТОК, ЇХ ВЛАСТИВОСТІ ТА УМОВИ РОБОТИ

Виготовлення газотурбінних лопаток методом ЛВМ є складним процесом, до якого входять такі операції, як розробка креслення деталі та виливки з ливниковою системою; підготовка та виготовлення модельних сумішей; вибір сполучного та вогнетриву, з яких відбувається приготування суспензії для виготовлення оболонки форми; нанесення шарів суспензії на модельні блоки і обсіпання їх піском; сушіння шарів суспензії. Далі модель виплавляють або видаляють іншими методами (випалюванням, розчиненням) з оболонки форми. Для міцності форми її прожарюють. Потім форми заливають і охолоджують. В кінці проводиться контроль якості виливків, тому що газотурбінні лопатки повинні мати високу точність поверхні і не мати дефектів.

Конструктивні та технологічні особливості турбінних лопаток мають великий вплив на газодинамічні характеристики двигунів і стійкість (надійність) їх роботи. Характеристики міцності робочих лопаток також впливають на характеристики надійності, оскільки обрив робочих лопаток може призвести до руйнування двигуна і катастрофи [2].

Багато фірм, науково-дослідні організації проводять широкомасштабні роботи з аналізу пошкоджуваності робочих лопаток і встановлення факторів, що чинять негативний вплив на характеристики різних вузлів двигунів.

По вентилятору:

- ерозія передньої кромки робочих лопаток (зміна радіуса заокруглення передньої кромки, зменшення довжини хорди профілю);
- пошкодження сторонніми предметами (значне викривлення профілю);
- зміна форми кінців лопаток;

- надмірна шорсткість поверхні лопаток.

По турбіні:

- ерозія, точкова корозія і прогар робочих лопаток.

Метою даної роботи є якісне і грамотне виготовлення виливки газотурбінної лопатки, яке дозволило б зменшити такі пошкодження.



Рисунок 1.2 – Вилив турбінної лопатки до і після експлуатації

На рис. 1.2 зображена турбінна лопатка до використання – ціла і без пошкоджень, і лопатка з помітними пошкодженнями: зі зміною форми, притупленими краями і зі стиранням матеріалу. Причиною більшості дефектів лопатки є ерозійні процеси, які спостерігаються при використанні турбінного двигуна.

У даній магістерській роботі представлена технологія лиття газотурбінних лопаток і досліджується вплив ерозії на мікроструктуру сплавів, з яких виготовляються газотурбінні лопатки.

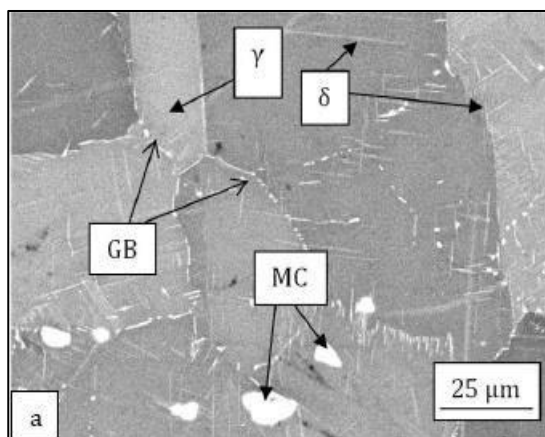
2.1 Використовувані сплави та їх виплавка

Сплави Інконель 718, Ti6246 і TNB-V4 використовуються у виробництві деталей турбодвигунів. Інконель 718 – суперсплав на основі Ni, що має різні склади. Всі вони мають нікель, як основний компонент, і хром в якості основного вторинного компонента.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад Інконель 718

Інконель	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Al	Co	Mn	Cu	Ti
718	50-55	17-21	5-10	2,8-3,3	4,75-5,5	0,65-1,15	1,0	0,35	0,2-0,8	0,3

Ці сплави стійкі до корозії та окислення. При нагріванні утворюється стабільний тонкий шар оксиду, який захищає поверхню.



На рис. 2.1 можна побачити мікроструктуру Інконель 718. Є дві фази: γ і δ . Тут зображені білі цятки – це карбіди і між зернами чіткі межі. Інконель 718 має гранецентрировану кубічну решітку Ni.

Це жаростійкий сплав, який призначений для роботи при температурах до 980 °C, і він є найбільш поширеним сплавом в родині Інконель. Ці сплави найчастіше використовуються в компресорних і турбінних лопатах і камерах згоряння в газових турбінах. Також можливе використання Інконель в турбокомпресорах і в якості матеріалу для випускних клапанів двигунів внутрішнього згоряння.

Ti6246 є α - β -сплавом, який використовується в установках, в яких велику роль відіграють вага і корозійна стійкість. Ti6246 має дуже хороші антикорозійні властивості.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад сплаву Ti6246

Ti6246	Ti	Al	Mo	Zr	Sn
--------	----	----	----	----	----

	80,5 - 83,5	5,5 - 6,5	5,5	3,5 – 4,5	2
--	-------------	-----------	-----	-----------	---

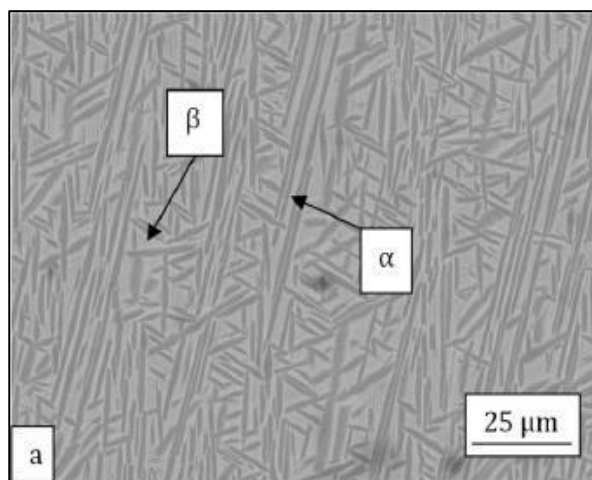


Рисунок 2.2 – Мікроструктура Ti6246

На рис. 2.2 представлена мікроструктура Ti6246. Зазначений сплав складається з двох фаз. α – фаза має голчасту структуру з ГПУ-граткою, яка знаходиться в β - фазі з кубичною об'ємно-центрованою граткою.

Ультралежки сплави γ -TiAl мають дуже хороші властивості: високу міцність, жорсткість, опір повзучості і термостійкість при температурах $T = 600-900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Він може служити заміною вогнетривким Ni-сплавам, які використовуються для виготовлення деталей двигуна.

Таблиця 2.3 – Хімічний склад сплаву TNB – V4

TNB – V4	Ti	Al	Nb	B	Mo
	42 - 45	42 - 45	0,1	0,1 – 0,5	0,5 – 1, 0

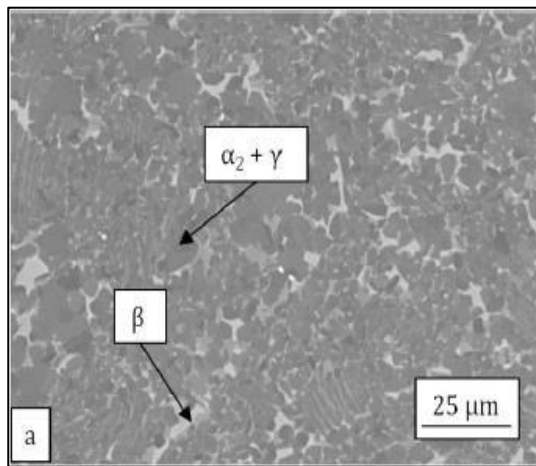


Рисунок 2.3 – Мікроструктура TNB – V4

На рис. 2.3 зображена мікроструктура сплаву TNB-V4, який має дві фази: грубі пластинчасті та кулясті $\alpha_2 + \gamma$, які знаходяться в β матриці. α_2 (Ti₃Al) має впорядковану структуру DO₁₉, в той час як γ (TiAl) - впорядковану L1₀. β – структура має об'ємно-центровану кубічну (ОЦК) структуру (ОЦК).

Всі подальші експерименти проводилися тільки для нікелевого сплаву.

2.2 Властивості нікелю

Ливарні жароміцні сплави на нікелевій основі є основними матеріалами для виготовлення робочих лопаток турбін сучасних газотурбінних двигунів. Сплави на основі нікелю характеризуються високим електричним опором і корозійною стійкістю, а також підвищеною жароміцністю і жаростійкістю. Щільність нікелю 8,9 г/см⁽³⁾, температура плавлення 1455 °С, температура кипіння 2900 °С. Він має гранецентровану кубічну кристалічну решітку з параметром $a = 0,352387$ нм [3].

Металургійна промисловість випускає кілька марок електролітичного нікелю, що відрізняються вмістом домішок.

Промислові сплави класифікують за хімічним складом і за областю застосування. За областю застосування вони поділяються на жароміцні, жаростійкі, корозійностійкі та спеціальні (з особливими фізичними властивостями). Жароміцні сплави — найважливіша група сплавів на основі нікелю. До них відносяться складнолеговані ливарні сплави серії ЖС, ВЖЛ (ЖС3, ЖС6, ЖС6К, ЖС6У,

ВЖЛ12, ЖС26, ЖС32, ЖС40 та ін.) і деформовані. Вони широко використовуються в сучасних газотурбінних двигунах. З жароміцних нікелевих сплавів виготовляють робочі лопатки і диски турбіни, направляючі лопатки, камери згоряння газотурбінних двигунів. Використання сучасних складнолегованих жароміцних нікелевих сплавів дозволило підвищити температуру газів на вході в турбіну з 800 до 1100 °С, що призвело до значного підвищення потужності, зменшення витрати палива, збільшення ресурсу і надійності роботи двигунів.

За хімічним складом (табл. 2.4) жароміцні сплави відносяться до складнолегованих. Основними легуючими елементами є: хром (10...25 %), алюміній (0,5...6,0 %), титан (1,0...3,0 %).

Таблиця 2.4 – Хімічний склад деяких жароміцних нікелевих сплавів, %

Марка сплаву	Cr	C	Co	Ti
ХН77ТЮ (ЕН437А)	19...22	0,06		2,3..2,7
ХН73МБТЮ (ЕН698)	13..16	0		2,35..2,75
ХН55ВМТФКЮ (ЭЮ29)	9	0,12	12...16	1,4...2,0
ЖС3	14..18	0,11..016	-	1,6..2,3
ЖС6	11,5..13	0,13..0,18		2,2..2,8
ЖС6К	10,5-12,5	0,13..0,2	4..5	2,5.-3,0
ЖС26	4,3-5,6	0,13..0,18	8..10	0,8...1,2
ВТ 36Л	10			0,4..2,7
Марка сплаву	Al	W	Mo	Інші елементи
ХН77ТЮ (ЕН437А)	055-0,95	-	-	-
ХН73МБТЮ (ЕН698)	1,3...1,7	—	2,8..3,2	1,8..2,2
ХН55ВМТФКЮ (EI929)	3,6-45	4,5-6,5	4	0,1
ЖС3	1,6-2,2	4,5-6,5	3,...4,5	0,2..0,8 V
ЖС6	4,7-5,2	6	4...5,5	—
ЖС6К	5	4,5-5,5	3,5-4,5	—

ЖС26	5,5-6,2	до 11,0	ДО 2,0	до 1,5 Fe
ВТ36Л	3,5-5,2	до 9,0	до 4,5	до 1,1V

У системі Ni—Cr утворюються евтектика і широкі області твердих розчинів на основі нікелю (γ) і хрому (α) (рис. 2.4).

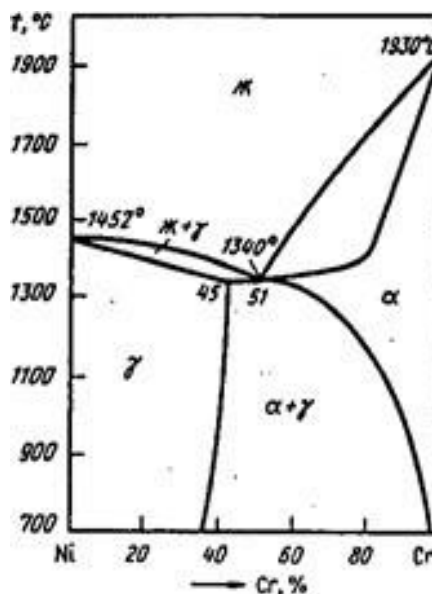


Рисунок 2.4 – Діаграма стану системи Ni—Cr [3]

Зі зниженням температури розчинність дещо знижується. Однак розчинність хрому в нікелі при кімнатній температурі досить висока і становить близько 30%.

Крім хрому, алюмінію і титану, жароміцні сплави на нікелевій основі містять ще 6...8 легуючих елементів, які сприяють підвищенню жароміцності, корозійної та ерозійної стійкості сплавів.

Алюміній і хром забезпечують стійкість до окислення; хром і титан підвищують стійкість до газової корозії. Газова корозія розвивається при високих температурах під спільним впливом звичайного окислення і взаємодії з сіркою та іншими домішками, що містяться в паливі і потрапляють в робочу зону двигуна з продуктами горіння палива [4].

Основою багатьох жаростійких сплавів є система Ni – Cr (табл. 2.5). Легування нікелю хромом призводить до сильного підвищення стійкості проти окислення при високих температурах. Висока жаростійкість сплавів нікелю з

хромом обумовлена утворенням під зовнішнім тонким шаром оксиду NiO другого окисного шару $\text{Cr}_{2}\text{O}_{3}$, а також проміжного шару шпінелі $\text{NiCr}_{2}\text{O}_{4}$. Висока жаростійкість нікелевих сплавів обумовлена також тим, що коефіцієнти лінійного розширення нікелю і NiO близькі за величиною, і тому різкі коливання температур не викликають відшарування оксидного шару від металу.

Таблиця 2.5 – Хімічний склад деяких жаростійких, корозійно-стійких і спеціальних нікелевих сплавів

Марка	Cr	Fe	Cu	Інші елементи
X20H80	20	-	-	0,40...1,5 S
X15H75Ж	15	5	—	
НМЖМц 28-25-1,5		2	27...29	1,2...1,8
Нікелева бронза		0,5	33	5...10 Sn; 1 Zn

2.3 Особливості плавлення нікелевих сплавів

Особливості нікелю та нікелевих сплавів — підвищена схильність до взаємодії з газами пічної атмосфери. Рідкий нікель розчиняє при 1660°C до 0,5 % кисню, близько 2,5 % вуглецю та до $43\text{ см}^3 / 100\text{ г}$ металу водню. Виділення водню при кристалізації — основна причина газової пористості у виливках. При взаємодії з парами води відбувається одночасне забруднення нікелю киснем і воднем.

Плавку нікелю з метою запобігання взаємодії з газами проводять під шаром флюсу, в якості якого застосовують скло, плавиковий шпат, вапно, мелений магнезит зі склом та ін. Неприпустимо застосування деревного вугілля і гіпсу. Флюс беруть у кількості 3...5 % від маси шихти. Він повинен покривати поверхню розплаву шаром товщиною 10...15 мм.

У більшості випадків для плавлення використовують індукційні каналні і тигельні печі, які дозволяють швидко досягати необхідної температури і форсовано вести процес. Значно рідше застосовують дугові печі. Виплавку нікелю для вакуумної техніки ведуть у вакуумних індукційних тигельних печах при

залишковому тиску 0,66 Па.

При температурі розплаву 1500...1600 °С його очищають від кисню і сірки. З цією метою в розплав вводять розкислювачі та десульфуратори. Характерна особливість плавки чистого нікелю — застосування комплексного розкислювача (вуглецю, кремнію, марганцю, магнію). Основним розкислювачем є вуглець, який вводять у вигляді графіту (бій) або лігатури Ni—C, що містить 1,5...2 % С. При введенні вуглецю у вигляді графіту його завантажують одночасно з першою порцією шихти. Для повного видалення кисню потрібен значний надлишок вуглецю. Однак надлишок вуглецю надає нікелю крихкість. Тому основну кількість кисню видаляють за допомогою вуглецю, а його залишок — кремнієм і марганцем після доведення температури розплаву до 1600 °С. Загальну кількість комплексного розкислювача приймають в межах 0,18...0,22 % від маси розплаву. Вуглець беруть у кількості 0,05...0,1 %, кремній 0,07...0,15 %, марганець 0,05...0,2 %, магній 0,05...0,1 %. Для розкислення нікелю використовують також силікокальцій, що містить до 23 % Са. Цей розкислювач вводять з розрахунку на 0,05...0,1 % Са.

Після розкислення розплав перемішують нікелевою мішалкою, витримують протягом декількох хвилин і при 1550...1650 °С заливають у форми. Щоб уникнути потрапляння флюсу в порожнину форми, його згущують. З цією метою на поверхню розплаву засипають мелений магнезит у кількості 0,2 % від маси шихти.

Для захисту розплаву від інтенсивної взаємодії з газами застосовують покривні флюси. Склад покривних флюсів, %:

№1100 СаО

№250 СаО; 50 СаF₂

№370 СаО; 30 СаF₂

№450 СаF₂; 50 MgF₂

№5100 скло (пляшкове)

№630 MnO₂ ; 30 NiO; 20 Fe₂ O₃ ; 20 SiO₂

Флюси № 1...4 — покривно-рафінуючі; №5 і 6 — покривні для плавки в індукційних печах.

Витрата флюсів становить 2...5 % від маси розплаву. За допомогою флюсів неможливо повністю виключити розчинення в металі водню, тому однією з найважливіших операцій при виплавці нікелевих сплавів є рафінування їх від розчинених газів.

Цю операцію здійснюють наведенням окислювального шлаку ($\text{MnO}_2 + \text{CuO} + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SiO}_2$) АБО продуванням розплаву інертними газами (аргоном або гелієм). Перед введенням легуючих компонентів, що утворюють тверді нерозчинні оксиди, нікель розкислюють марганцем, вуглецем, кремнієм і магнієм, окремо або спільно; в якості розкислювачів використовують також титан або силікокальцій [3].

При плавці жаростійких нихромов $\text{Ni} - \text{Cr}$ і $\text{Ni} - \text{Cr} - \text{Fe}$ в рідку ванну вводять більшу частину хрому (2 кг недовантажують для подальшого коригування складу сплаву за результатами визначення). Потім завантажують нікель і відходи. Одночасно засипають флюс у кількості до 5 % від маси металу. Розплавлення ведуть по можливості інтенсивно. Розкислюють ці сплави марганцем, титаном і силікокальцієм у кількості 0,1 – 0,15 %.

Сучасні жароміцні сплави містять у своєму складі 8... 12 % легуючих елементів; ряд елементів присутній у сплавах у вигляді домішок. Частина цих елементів при плавці на відкритому повітрі інтенсивно окислюється з утворенням стійких окисних плівок, які забруднюють метал, знижують його механічні властивості і служать причиною передчасного руйнування деталей. Крім того, при плавці на повітрі не вдається знизити вміст домішок, наприклад, кремнію, сірки та ін., до необхідного рівня. Ці та інші причини не дозволяють вести плавку більшості жароміцних сплавів у відкритих печах. Тому при виготовленні виливків із сучасних жароміцних сплавів використовують агрегати, в яких здійснюють плавлення сплаву і його розливання по ливарних формах у вакуумі.

При виробництві складних виливків, таких як турбінні лопатки, застосовують вакуумні індукційні тигельні печі безперервної та періодичної дії (табл. 2.6). У печах цього типу плавка та розливання металу по формах здійснюється при тиску 0,13... 13,0 Па. При виробництві злитків з жароміцних сплавів найбільшого поширення набула схема дуплекс-процесу, коли плавку

металу проводять в дуговій печі на повітрі, а потім його переплавляють у вакуумних електродугових печах із витратною електродом, або у вакуумних індукційних тигельних печах з подальшим переплавленням у вакуумних електродугових печах із витратною електродом. Для нашого сплаву вибираємо вакуумну індукційну піч ІСВ – 0,04.

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики деяких індукційних печей

Параметри	ІСВ-0,04- ПФ-І2	ІСВ-0,16-НФ-І1
Номінальна ємність тигля (по сталі), т	0,04	0,16
Встановлена потужність, кВ\А	250	525
Максимальна температура розплаву в тиглі, °С	1650	1700
Середовище в робочому просторі (плавильна камера)	Вакуум або нейтральний газ	
Граничне розрідження в холодній печі, Па	5-0,133	5-0,133
Продуктивність по розплавленню і перегріву, т/год	0,12	0,21
Питома витрата електроенергії на розплавлення і перегрів, кВт/т	1100	2000
Габаритні розміри форм, м:		
ширина x довжина x висота	0,5 x 0,6x1,0	0,7 x 1,6x1,0

2.4 Технологічний процес виготовлення виливків із жароміцних нікелевих сплавів

Складні виливки з нікелевих сплавів виготовляють за витоплювальними моделями. Керамічні форми за постійними моделями виготовляють з формувальних мас, що складаються з гідролізованого етилсилікату, маршалліту і сухого кварцового піску. Для гелеутворення етилсилікату до складу суміші вводять луг або інший гелеутворювач. Формовочну суміш заливають в опоки з встановленими в них модельними комплектами. Великі ливарні форми роблять

двошаровими: облицювальний шар з кераміки на етилсилікаті, а наповнювальний з рідкосклової суміші. Сушку форм проводять випалюванням спирту. Для цього відразу ж після вилучення модельного комплексу форми підпалюють факелом.

Після припинення горіння парів спирту напівформи прожарюють при 850...950°C протягом декількох годин, а потім охолоджують разом з піччю до 400...450 °C. Подальше охолодження проводять на повітрі. Після контролю якості поверхні напівформи зачищають, а потім направляють на складання. Метал перед заливкою нагрівають до 1600...1700 °C. Заповнюють форми через розширювані щілинні ливники з підведенням металу по висоті форми. Обсяг прибутку зазвичай приймають до 20...50 % більше обсягу живильного вузла. Ефективність прибутків підсилюють, обігріваячи їх екзотермічними сумішами. Прибутки і ливники відокремлюють за допомогою керамічних абразивних кругів або газовим різанням. Керамічні стрижні видаляють вилуговуванням в розчинах лугів.

Литі деталі з жароміцних сплавів — лопатки газотурбінних двигунів, суцільнолиті ротори енергетичних установок та інші деталі — повинні виготовлятися з високим класом точності і хорошою якістю поверхні. Ці деталі мають складну конфігурацію з глухими каналами і розвиненими внутрішніми порожнинами. Такі деталі можуть бути виготовлені тільки литтям за виплавлюваними моделями.

Технологічний процес виготовлення виливків із жароміцних сплавів методом лиття за витоплювальними моделями складається з таких основних операцій:

- приготування модельних сумішей і формувальних сумішей;
- виготовлення моделей і складання блоків моделей;
- виготовлення стрижнів і форм;
- плавлення металу і заливка форм;
- вибивання, очищення, термічна обробка і контроль виливків.

Моделі лопаток газотурбінного двигуна повинні мати достатню теплостійкість і міцність, легко видалятися з форми. Склади, що використовуються для виготовлення моделей, повинні також мати мінімальну і стабільну усадку.

Широке поширення для серійного виробництва складних за конфігурацією тонкостінних виливків з жароміцних сплавів мають напівмілі виплавлювані і водорозчинні модельні склади.

Модельні склади на основі карбаміду мають стабільну і малу усадку, в 2...5 разів меншу, ніж у воскоподібних складів, теплостійкі і мають високу міцність. Ці суміші в рідкому стані мають високу плинність, що дозволяє отримувати складні за конфігурацією і тонкостінні моделі методом вільного заливання модельної суміші в металеві прес-форми. Виготовлення порожнистих лопаток газотурбінних двигунів, що мають складну внутрішню конфігурацію при товщині стінки пера лопатки до 1,0 мм, вимагає застосування стрижнів, які при малій товщині (до 0,5 мм) і значних розмірах габаритних розмірах (до 300 мм) повинні мати необхідну міцність і не деформуватися при виготовленні та в період заливки форм металом. Широко застосовують керамічні стрижні на основі електрокорунду, які виготовляють методом твердофазного спікання. Використовують суміші, що складаються з білого електрокорунду (85 частин), глинозему (15 частин) і пластифікатора-парафіну (15 частин понад 100). Порошки електрокорунду і глинозему змішують з парафіном в обігріваному до 80... 100 °С змішувачі і отримують стрижневу масу, яку запресовують в прес-форму. Затверділий стрижень витягують з прес- форми і укладають на корундовий драйер, накривають другою половиною драйера і випалюють в дві стадії. Перший випал проводять в окислювальному середовищі 10...12 год, піднімаючи температуру в печі до 1250 °С зі швидкістю 50... 100 °С/год. Другий випал проводять протягом 4...6 год при 1550... 1600 °С. В результаті твердофазного спікання стрижні набувають високої міцності. Стрижні також виготовляють із сумішей, що складаються з вогнетривкого наповнювача (кварц, дистенсиліманіт, білий електрокорунд), сполучної речовини (розчину етилсилікату) і їдкого натру, шляхом їх пресування в стрижневих ящиках з подальшою тепловою обробкою відпресованих стрижнів. У ряді випадків стрижні виготовляють з водорозчинних складів на основі карбаміду.

Для виготовлення оболонкових форм використовують суміші на основі електрокорунду ($\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$), циркону (ZrO_2SiO_2) і дистенсиліманіту (Al_2SiO_5). В

якості сполучної речовини використовують гідролізований етилсилікат, оксинітрат алюмінію та ін.

З метою подрібнення структури металу в поверхневих шарах виливків у формувальну суміш для отримання облицювального шару вводять такі речовини, як алюмінат кобальту, оксид кобальту. Оболонкові форми для виливків з жароміцних сплавів виготовляють з 4...9 шарів. Перші два шари є облицювальними, решта — опорними.

Оболонки, що мають 7...9 шарів, направляють під заливку без формування. Оболонки, що мають 4...5 шарів, встановлюють в опоки, які заповнюють сухим або рідким наповнювачем. Для отримання виливків високої точності опоки заповнюють рідким наповнювачем, що складається з зернистих* вогнетривких матеріалів (кварцовий пісок, шамотна крихта тощо), глиноземного цементу і води. Для виливків нескладної конфігурації опоки заповнюють сухим наповнювачем. Використовують зернисті вогнетривкі матеріали: шамот, корунд, хромомагnezит та ін. Оболонкові форми без наповнювача або заформовані рідким або сухим наповнювачем нагрівають до 900...1000 °C Після випалу форми охолоджують до 700...900 °C і заливають розплавом. З метою отримання у виливках із жароміцних сплавів стовпчастої структури широко використовують різні технологічні прийоми, що забезпечують спрямоване затвердіння металу.

Залежно від призначення і вимог, що пред'являються до лопаток, використовують різні технологічні процеси лиття, що дозволяють отримувати виливки або з рівноосною, або з спрямованою стовпчастою, або з монокристалічною структурою. Лопатки з спрямованою стовпчастою і особливо з монокристалічною структурою мають високі міцнісні властивості, що дозволяє підвищити ресурс роботи виробів в 2...3 рази в порівнянні зі звичайним технологічним процесом, коли лопатки отримують з рівноосною структурою.

Після заливки форм їх охолоджують до 50...150 °C і проводять вибивання блоків виливків на вибивних решітках і поворотних машинах.

При вибиванні оболонка форми і частина наповнювача залишаються на поверхні виливки. Тому блоки виливків направляють на попереднє очищення,

потім на операцію відділення виливків від ливної системи і остаточне очищення.

Попереднє очищення найчастіше здійснюють на вібраційних установках. На цьому етапі оболонка видаляється тільки з зовнішньої поверхні виливків і залишається на внутрішніх порожнинах. Відділення виливків від ливної системи здійснюють обрізанням на металорізальних верстатах, відділенням на пресах, газополум'яним або анодно-механічним різанням. Дрібні виливки відбивають від ливників на вібраційних установках, поєднуючи цю операцію з попереднім очищенням. Остаточні способи очищення виливків, виготовлених за виплавлювальними моделями, поділяють на дві групи: механічні та хіміко-термічні. При литті складних за конфігурацією виливків використовують обидва способи очищення. До механічних способів очищення відносять очищення металевою дробом, гідроабразивне очищення, очищення в галтувальних барабанах, віброочищення.

Залежно від вимог до якості виливків контролюють такі параметри: хімічний склад, розміри виливків, механічні та конструкційні властивості, структуру виливків, а також наявність тріщин, пухкостей, пор, оксидних включень тощо. Внутрішні дефекти (пори, пухкі місця тощо) виявляють рентгенівським просвічуванням. Дефекти виливків (пори, тріщини тощо), що виходять на їх поверхню, виявляють люмінесцентним контролем і методом кольорової дефектоскопії [3].

3 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ З ВИТОПЛЮВАЛЬНИМИ МОДЕЛЯМИ

3.1 Вогнетриви для форми

Основою форми при ЛВМ є багатошарова нероз'ємна керамічна оболонка, виготовлена за разовими (витоплювальними, розчинними і випалювальними) моделями, що піддається перед заливкою прожарюванню при високих температурах (до 900 °С і вище), вогнетривка, не містить газоутворюючих

компонентів, володіє необхідною міцністю, термостійкістю і газопроникністю, має робочу порожнину з поверхнею дуже малої шорсткості і точними розмірами, чітко відтворює конфігурацію виливки.

Оболонку виготовляють зазвичай послідовним нанесенням на модельні блоки шарів суспензії, що містить розчин спеціального сполучного (зазвичай гідролізованого розчину етилсилікату) і порошок вогнетривкої основи (пилоподібних кварцу, силіманіту, електрокорунду, циркону та ін.).

Шари суспензії наносять зануренням в неї модельних блоків і відразу після стікання з моделей надлишків суспензії їх обсипають вогнетривким матеріалом (наприклад, кварцовим піском), крихтою шамоту, електрокорундом. Розмір зерен обсіпання для різних шарів 0,1-1,5 мм. Кожен шар оболонки просушують до видалення з нього не менше 80-90 % рідкої фази. Після цього, при використанні в якості сполучних розчинів кремнійполімерів, отриманих гідролізом етилсилікату (ЕТС) малю кількістю води, необхідно провести хімічне затвердіння сполучної плівки, впливаючи на неї вологим аміаком.

Зазвичай для отримання оболонки необхідної міцності наносять від трьох-чотирьох до семи-восьми шарів суспензії. Обсіпання піском, що впроваджується в шар свіжнанесеної вологої суспензії, зміцнює і потовщує його, збільшуючи поверхню випаровування летючих компонентів (спирту та ін.), сприяє прискоренню сушіння, забезпечує хороший зв'язок між шарами суспензії, підвищує газопроникність сформованої і прожареної оболонки.

Оболонка може бути єдиною частиною ливарної форми або поєднуватися з опорним наповнювачем. Заформовування в опорний наповнювач проводиться з метою зміцнення оболонки, захисту її від різких змін температури при прожарюванні і заливці, тривалого збереження в порожнині форми високої температури після прожарювання, що забезпечує хорошу заповнюваність при отриманні тонкостінних виливків. Опорний наповнювач може бути сухим сипучим (наприклад, пісок без будь-яких сполучних добавок) або насипним пластичним, зволженим сполучною речовиною, що твердіє в процесі сушіння і прожарювання (комбіновану форму з таким наповнювачем у верхній частині і сипучим у нижній;

наливним самотвердіючим (наприклад, на цементному сполучному). Окрему групу складають дво- та тришарові форми, які поки що не отримали значного промислового застосування, виготовлені за разовими моделями електрофоретичним осадженням на модельні блоки з струмопровідним покриттям вогнетривких порошків з водних суспензій, підданих впливу постійного струму. На стадії розробки знаходяться контурні одношарові керамічні форми, що отримуються заливкою об'ємно- твердіючої керамічної суспензії в простір між разовим модельним блоком і відтворюючим його конфігурацію роз'ємним кожухом, замість тривалого формування багатошарових оболонок.

Незважаючи на ряд переваг форм з опорним наповнювачем, все більш широко застосовують при ЛВМ незаформовані перед прожарюванням або заливкою оболонки. Це дозволяє різко скоротити тривалість і енергоємність теплової обробки форм, виключити застосування опок з жаростійких сплавів і опорних формувальних матеріалів, а також зменшити небезпеку пошкодження останніми самих оболонок внаслідок термічного розширення в замкнутому обсязі опоки при прожарюванні. Однак обов'язковою умовою успішного застосування оболонкових форм без опорного наповнювача є використання для їх виготовлення термостійких формувальних матеріалів з малим коефіцієнтом термічного розширення.

Найбільш поширеним формувальним матеріалом є кристалічний кварц, що застосовується в пилоподібному стані як вогнетривка основа суспензії і у вигляді піску для обсіпання її шарів, нанесених на модельні блоки. Значні і швидкоплинні об'ємні зміни в зернах кристалічного кварцу при нагріванні і охолодженні пов'язані з поліморфним перетворенням його $\beta_{(кв)} \leftrightarrow \alpha_{(кв)}$ при температурі 573 °С.

В оболонках форм з цього матеріалу при швидкому нагріванні в прокалювальній печі, охолодженні після виходу з неї і повторному нагріванні заливним металом виникають великі внутрішні напруження, що часто призводять до утворення тріщин. Щоб уникнути цього, оболонки з кристалічного кварцу (для захисту їх від різких змін температур) заформовують в опорний наповнювач. Значно вищою термостійкістю внаслідок меншого розширення при нагріванні (рис.

2.1) володіють плавлені матеріали (електрокорунд і плавлений кварц), а також вогнетриви, що представляють собою подвійні оксиди: муліт, силіманіт, високоглиноземистий шамот і циркон. Перспективним матеріалом для форм ЛВМ є форстерит ($Mg_2 SiO_4$), великі запаси якого є на Кольському півострові.

Кристалічний кварц (пилоподібний і пісок), як найдешевший і найпоширеніший формувальний матеріал, широко використовують при ЛВМ з конструкційних вуглецевих і низьколегованих сталей.

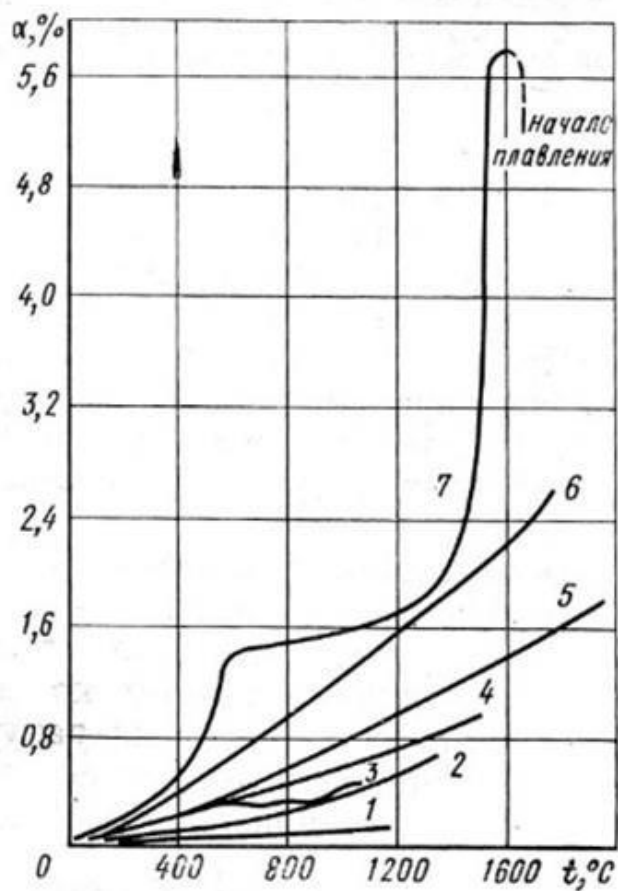


Рисунок 3.1 – Лінійне розширення при прожарюванні оболонок форм на етилсилікатній сполучній речовині, виготовлених із застосуванням різних вогнетривких матеріалів: 1 – непрозоре кварцове скло (плавлений кварц) (SiO_2), 2 – циркон ($ZrO_2 \cdot SiO_2$), 3 – шамот ($3Al_2O_3 \cdot SiO_2$), 4 – силіманіт ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$), 5 – електрокорунд (αAl_2O_3), 6 – магнезит (MgO), 7 – кварц кристалічний (SiO_2)

Пиловподібний кварц отримують помелом чистих кварцових пісків відповідно до ГОСТ 9077—82. Застосування пиловподібного кварцу (ПК) є кращим,

оскільки вміст у ньому домішок, що знижують вогнетривкість форми і погіршують якість поверхні виливків, є нижчим. Особливо небезпечний підвищений вміст вільного заліза, що потрапляє в ПК при помелі в результаті зносу мелючих тіл (сталевих куль). Залізо є сильним огелівачем етилсилікатних сполучних і різко знижує живучість суспензій. Його вміст в окремих партіях поставляється ПК може перевищувати 0,4% (мас. частка). При прожарюванні ПК залізо перетворюється в Fe_2O_3 . Нейтралізується залізо і водними розчинами кислот в процесі приготування суспензії, коли шляхом обробки ПК розчинами ортофосфорної кислоти перетворюється на фосфати, які є додатковим (крім етилсилікатного) сполучною речовиною, що підвищує міцність оболонок.

Для обсіпання шарів кварцової суспензії застосовують формувальні піски за ГОСТ 2138-84 (бажано збагачені) з малим вмістом глинистої складової і шкідливих домішок. Для першого шару оболонки необхідні досить дрібні піски, наприклад, 061K01 або 061K016, оскільки більші пробивають шар суспензії, збільшуючи шорсткість робочої поверхні форми, а, отже, і виливків. Для наступних (особливо зовнішніх, зміцнюючих) шарів рекомендуються більші піски: 061K0315—063K0315, 1K04 та інші або шамотна крихта з розмірами зерен до 2,0 мм.

Передбачено шість різновидів порошків НКС з розміром зерен від 1,6 мм (дуже грубий) до тонкого (пилоподібного) з гранулометричним складом від 0,063 мм і дрібніше.

Циркон отримують як побічний продукт збагачення титаномангнієвих руд. Три різновиди цирконового концентрату: порошкоподібний (КЦП), тонкодисперсний (КЦПТ) і зернистий (КЦЗ).

Високоглиноземистий шамот, (марки 0315 і 063) що використовується при ЛВМ, застосовують переважно як обсіпний матеріал при виготовленні термостійких оболонкових форм, що прожарюються в заливних без опорного наповнювача.

Дистенсиліманіт (кіаніт), використовують при виготовленні оболонок підвищеної термостійкості і керамічних стрижнів. Кіаніт (дистенсиліманітовий концентрат) поставляється у вигляді порошку (для суспензії) і зернистий (для

обсипання) відповідно марок КДСП і КДСЗ. До недоліків кіаніту відноситься те, що він при температурі 1380 °C і більше дисоціює на Al_2O_3 і SiO_2 з подальшим утворенням муліту (з Al_2O_3 і SiO_2).

Протікання такого процесу неприпустимо при заливці оболонок, так як викликає їх розм'якшення, деформацію і руйнування. Тому кіаніт не можна рекомендувати для лиття чорних і спеціальних (жароміцних та ін.) кольорових сплавів у випадках, коли форма може нагріватися заливаним в неї сплавом вище зазначеної температури дисоціації.

Електрокорунд білий, що отримується з чистого глинозему (містить до 99% і більше Al_2O_3) шляхом сплавлення його в електропечах при температурі понад 2050 °C з подальшим подрібненням, являє собою кристалічний матеріал, що володіє високою твердістю (9 за шкалою Мооса). При ЛВМ цей дорогий і дефіцитний продукт доцільно застосовувати у виняткових випадках (наприклад, при вакуумному литті лопаток турбін з жароміцних сплавів). У суспензіях, а також при виготовленні керамічних стрижнів застосовують мікропорошки електрокорунду, в обсіпках — шліфзерно.

Таким чином, застосування пилоподібного кварцу (ПК) є кращим, оскільки вміст у ньому домішок, що знижують вогнетривкість форми і погіршують якість поверхні виливків, є нижчим.

3.2 В'яжучі матеріали для форми

Збільшення точності і чистоти поверхні виливків може бути досягнуто застосуванням нероз'ємних форм з дрібнозернистим наповнювачем. Між чистотою поверхні виливків і зернистістю формувального матеріалу існує пряма залежність: чим дрібніше зерна формувального матеріалу, тим вища чистота поверхні. Для забезпечення необхідної міцності сполучна дрібнозернистого наповнювача повинна мати достатню адгезійну і когезійну міцність. Матеріал моделі необхідно вибирати з урахуванням забезпечення хорошої змочуваності сполучною речовиною. Якщо адгезія сполучної речовини до зерен наповнювача перевищує адгезію сполучної речовини до поверхні моделі $> 90^\circ$, то сполучна речовина під

дією сил поверхневого натягу і усадки втягується в пори між зернами наповнювача, утворюючи на поверхні форми різні поглиблення [5].

Для виготовлення оболонок форм використовують сполучні речовини, які в результаті хімічних і фізичних процесів при сушінні шарів і прожарюванні оболонки перетворюються на плівки вогнетривких оксидів, що міцно з'єднують зерна формувального матеріалу.

У вихідному стані всі використовувані сполучні речовини є рідинами, які повинні утворювати при змішуванні з порошками вогнетривкої основи стійкі суспензії, добре змочувати поверхню моделей, не вступаючи у взаємодію з модельним складом, по можливості швидко висихати і твердіти на поверхні модельних блоків, не зазнаючи при цьому значної усадки і утворюючи міцні плівки з високим ступенем адгезії до поверхні зерен вогнетриву.

Ці плівки не повинні утворювати з матеріалом основи легкоплавких евтектик і розпущуватися при прожарюванні, а також заливці оболонок. Бажано, щоб після затвердіння виливків таке розрідження наставало або мимовільно, або під впливом легкодоступних засобів без шкоди для якості виливків (наприклад, під дією води, пари, гарячих розчинів лугів і вібрації). Сполучні повинні бути придатні для тривалого зберігання, не містити токсичних і вибухонебезпечних речовин, а також продуктів, здатних до самозаймання, і бути по можливості дешевими.

Більшості цих вимог відповідають гідролізовані розчини кремнійорганічного продукту етилсилікату (ЕТС).

Різні за складом ЕТС отримують при взаємодії чотирихлористого кремнію і етилового спирту: $\text{SiCl}_4 + 4\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow (\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si} + 4\text{HCl}$.

Загальна формула таких полімерів $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_{2n+2} \text{Si}_n\text{O}_{n-1}$.

Таким чином, етилсилікат (ЕТС) — складна за складом рідина, що представляє собою суміш тетра-етоксисилану і полімерів, що утворюються в результаті процесу гідролітичної поліконденсації, а також продуктів взаємодії етоксисиланів з хлористим воднем, що виділяється в процесі етерифікації SiCl_4 . Ці продукти в подальшому гідролізуються і хлор в них заміщується гідроксильними групами.

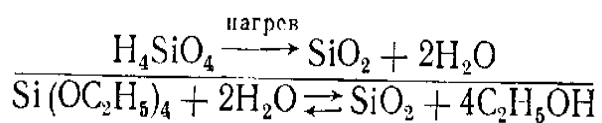
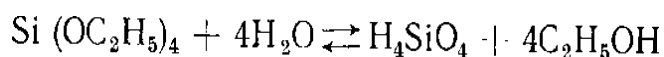
Етилсилікат являє собою прозору, злегка забарвлену в жовтий або бурий колір рідину з характерним запахом. За хімічним складом він відноситься до ефірів орто-кремнієвої кислоти $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ з температурою кипіння $438,5^\circ \text{K}$ при атмосферному тиску.

Сам по собі етилсилікат є поганим сполучною речовиною. Для утворення міцної маси, що скріплює зерна наповнювача, необхідно перевести етилсилікат в колоїдний стан з подальшим його перетворенням в золь.

Переведення етилсилікату в золь здійснюється гідролізом, при якому етоксигрупи ($-\text{OC}_2\text{H}_5$) частково або повністю замінюються гідроксильними групами ($-\text{OH}$).

В результаті виходить розчин з коагуляційною структурою, що володіє пластично-в'язкими властивостями. У міру видалення вологи утворюються і отримують розвиток структури, що володіють пружно-крихкими властивостями. При поступовому видаленні води розчин переходить в гель. У гелі кремнієвої кислоти після висушування і прожарювання можна виявити кристалічну структуру.

Отже, повний процес гідролізу моноефіру з утворенням золю SiO_2 описується реакціями:



На думку І. Н. Кривенка [6], гідроліз етилсилікату при кімнатній температурі протікає переважно з утворенням сітчастих структур, які мають кращі зв'язуючі властивості. Штучне підігрівання розчину сприяє утворенню лінійних структур, що мають меншу міцність.

Реакція гідролізу етилсилікату супроводжується виділенням великої кількості тепла і підвищенням температури розчину. Регулюванням температури реакції гідролізу, наприклад, зміною кількості введеної води, можна керувати

структурою одержуваного сполучного — полісилоксану.

Каталізаторами гідролізу і полімеризації полісилоксанів можуть бути соляна і сірчана кислоти та їх солі, луги, амонієві основи $(R_4N)OH$ та інші солі, що змінюють рН розчину.

На практиці в якості каталізатора гідролізу широко застосовують гідрат оксиду амонію $NH_4 OH$. Його дія полягає в омиленні етоксильних груп і переведенні їх в гель.

Гель кремнієвої кислоти є сполучною речовиною кремнезему.

Сполучні властивості гелю залежать від концентрації вихідних розчинів і швидкості коагуляції. Якщо швидкість коагуляції перевищуватиме швидкість релаксації напружень, що виникають за рахунок зміни об'єму коагуляту, то гелі, що утворюються, матимуть тріщини і знижені механічні властивості. Збільшення концентрації вихідних розчинів етилсилікату підвищує швидкість гідролізу і зменшує когезійну міцність гелю кремнієвої кислоти. Для гідролізу необхідно застосовувати розбавлений розчин етилсилікату. В якості розчинників етилсилікату застосовують спирт, ацетон, ефіро-альдегідну фракцію та ін.

За даними В. Н. Іванова і Г. М. Зарецької [7], органічні розчинники можуть бути замінені водою без значного зниження міцності оболонок. Етилсилікат і вода взаємно нерозчинні. При змішуванні вони розшаровуються, і реакція гідролізу відбувається тільки на поверхні розділу фаз. Зміною інтенсивності перемішування розчину можна регулювати величину поверхні розділу фаз. Кількість води, необхідна для гідролізу, визначається технологічним процесом приготування оболонкових форм на етилсилікаті. Застосування до 1 моля води на 1 моль моноєфіру недостатньо для повного гідролізу етилсилікату. У зв'язку з тим, що реакція етерифікації оборотна, оболонки, виготовлені на такому розчині, не висихають на повітрі і здатні набухати при змочуванні їх сполучною розчином або розчинником в процесі нанесення наступних шарів. Щоб зробити оболонки більш міцними, їх піддають сушінню в атмосфері вологого аміаку (в парах нашатирного спирту NH_4OH). Перевага цього методу полягає у високій еластичності оболонок після сушіння їх аміаком.

Найбільш широко застосовують ЕТС-40 і ЕТС-32.

Число, вказане в марці ЕТС, відповідає середньому умовному вмісту діоксиду кремнію [% (мас. частка)] і побічно характеризує ступінь полімеризації продуктів, що утворюють ЕТС.

Велику групу сполучних складають неорганічні сполуки: розчини силікатів (рідке скло), кремнезоль, фосфатні зв'язки та ін.

Рідке скло (ЖС) — в'язка, клейка рідина, що отримується розчиненням у гарячій воді силікатів натрію або калію. У ЛВ зазвичай використовують натрієве ЖС щільністю 1,5—1,55 г/см³, у складі якого 32—34,5% SiO₂, ксиду натрію 11,0—13,5% і більше 57% води. Найважливішим недоліком, що виключає можливість застосування ЖС при виготовленні високоякісних оболонок форм, є вміст в ньому Na₂O, що утворює з матеріалом вогнетривкої основи форм, що входять до суспензії, легкоплавкі сполуки, які різко знижують вогнетривкість оболонок, викликають їх розм'якшення в процесі прожарювання і заливки, а також виникнення пригару на поверхні виливків. Так, кварцові форми на ЖС повністю розм'якшуються при температурі 750-800 °С, тоді як при температурах до 500 °С вони мають міцність, в 2-2,5 рази перевищує міцність оболонок на етилсилікатному сполучному.

До недоліків оболонок форм на ЖС відноситься набуття ними високої міцності після заливки і охолодження нижче температури 400 - 500 °С, тобто оболонки стають непіддатливими, ускладнюють усадку виливків, викликають утворення в них внутрішніх напружень і тріщин.

Розроблено способи отримання ряду різновидів неорганічних сполучних при використанні ЖС в якості вихідного матеріалу. Найбільше практичне значення має кремнезоль, отриманий двостадійним процесом: обробкою рідкого скла іонообмінними смолами для видалення іонів Na з подальшим випарюванням золю низької концентрації до вмісту 30—40% SiO₂. Такі кремнезолі є дрібнодисперсними і містять стабілізатори, що забезпечують тривале зберігання цих сполучних. Висока концентрація в них двоокису кремнію забезпечує отримання оболонок з досить високими міцнісними властивостями — до 5 - 7 МПа

при статичному вигині.

Однак кремнезолі стають непридатними для використання під впливом низьких температур, що ускладнює їх транспортування і зберігання в зимових умовах. Ведуться роботи по створенню морозостійких кремнезолей.

Ємельянов В.О. та ін. [8] проводили дослідження, спрямовані на порівняння фізичних і технологічних параметрів вітчизняного сполучного для технології ЛВМ, що поставляється під торговою маркою «Армосил» і сполучного фірми «ДЮПОНТ», що поставляється під маркою ЛЮДЕКС – SKF.

3.3 Експериментальні дослідження сполучного «Армосил»

В даний час намагаються замінити етилсилікат на сучасні сполучні, наприклад, «Армосил», Людекс та ін. Готові сполучні типу «Армосил» мають наступні переваги по порівнянню з етилсилікатом:

- вони на водній основі, негорючі, нетоксичні, ідеальні з точки зору екології;
- суспензії на їх основі мають великий термін придатності, більш постійні властивості і вимагають мінімального обслуговування;
- забезпечують підвищену газопроникність форм і меншу їх схильність до розтріскування.

Поряд з багатьма перевагами «Армосила» перед етилсилікатом, він має і ряд недоліків:

- має поганою розтіканням, отже, погано змочує поверхню;
- шорсткість гірша;
- можуть з'являтися поверхневі дефекти;
- низька міцність форм до прожарювання.

Сушіння сполучного на водній основі «Армосил» має бути дуже інтенсивним, тому що саме по собі сполучне сохне довго, і можливе осідання шару обсипного матеріалу, а також виникнення поверхневих дефектів. З графіка порівняння сушіння сполучних Армосила і етилсилікату (рис. 3.1) видно, що форми на основі водного сполучного сохнуть довше в порівнянні з керамічними

оболонками на основі етилсилікату. Однак для прискорення процесу сушіння можна вводити розчинники, наприклад, ацетон або спирт.

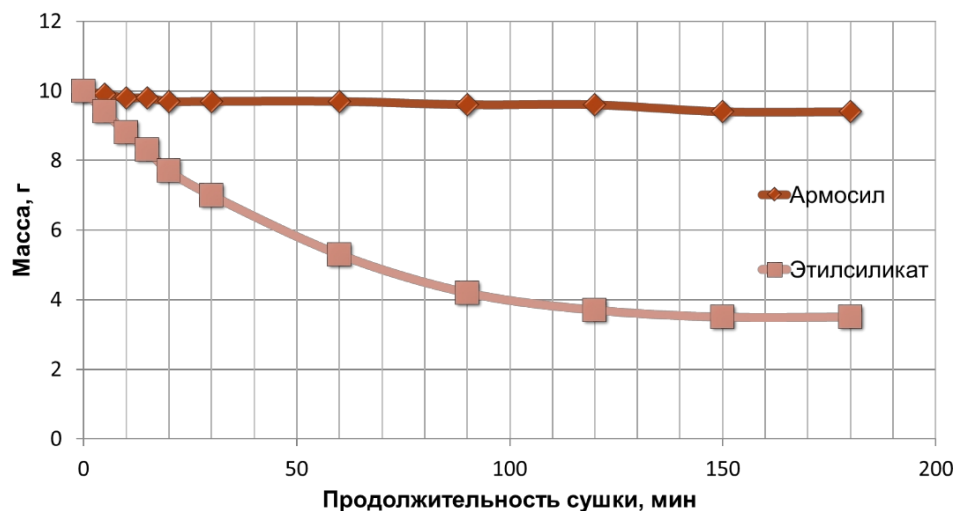


Рисунок 3.1 – Процес сушіння сполучних речовин: етилсилікату та Армосила

Недостатня змочуваність кремнезолями вітчизняного виробництва модельних складів призводить до необхідності застосування для в у першого шару, наносимого на модельний блок, суспензії з етилсилікатом. Для підвищення змочуваності кремнезоля в його склад вводять поверхнево-активні речовини, що в свою чергу вимагає додаткового введення піногасників.

У роботі пропонується для підвищення змочуваності введення до складу кремнезоля розчинників, які добре змочують модельні склади, в поєднанні з ПАР.

Особливу увагу слід звертати на процеси випаровування сполучного. Просушеність форми – дуже критичний показник. Нанесення шарів з недостатнім висушуванням попередніх покриттів призводить до руйнування форми при витопку модельного складу.

Були проведені експерименти, в ході яких була досліджена кінетика процесів випаровування різних сполучних: етилсилікату і «Армосил» і вплив на ці процеси розчинника.

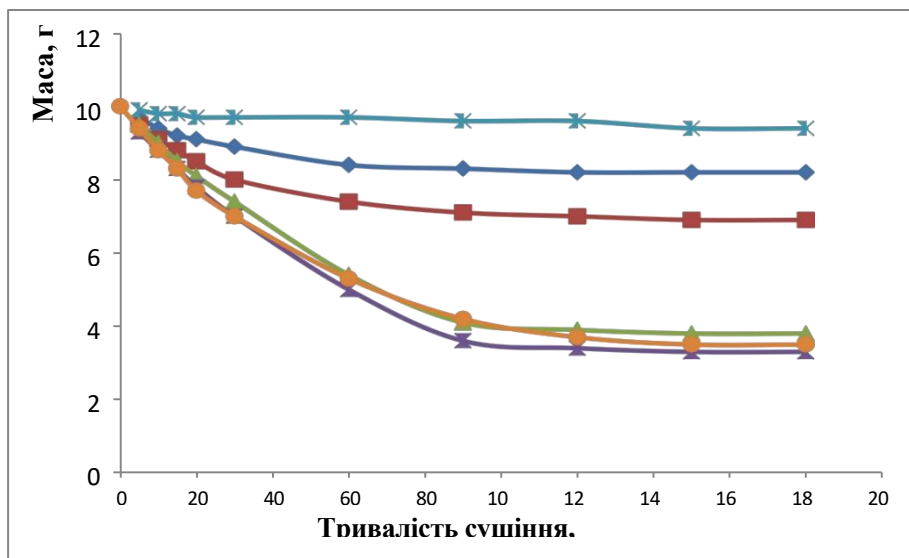


Рисунок 3.2 – Процес сушіння сполучного «Армосил» з різною кількістю розчинника, де: — «Армосил»+20% розчинника, — «Армосил»+40% розчинника, — «Армосил»+ 60% розчинника, — «Армосил»+ 80% розчинника, — «Армосил», — «Етилсилікат»

Було встановлено (Рис. 3.2), що процес випаровування чистого «Армосила» довше в кілька разів і, чим більше вводиться розчинника, тим швидше відбувається процес сушіння. Можлива заміна етилсилікату на «Армосил» для нанесення на модельний блок першого шару суспензії, якщо в нього додатково вводити ацетон або інший розчинник. Ацетон випаровується швидко, а як показано в роботі [8], зростає частка наповнювача і при цьому в'язкість суспензії з маршалітом зростає. Це призводить до підвищення якості поверхні першого шару форми і, як наслідок, до високої якості поверхні виливки.

Розтікання сполучного є важливим параметром, тому що без хорошого розтікання не існує хорошої змочуваності моделі, що призводить до поганої якості виливки. На рис. 3.3 представлений графік розтікання «Армосила» в залежності від додавання в нього розчинника: чим більше розчинника вводимо, тим більше

діаметр краплі. Наприклад, якщо при відсутності розчинника діаметр краплі дорівнював 8 мм, то при введенні в Армосил 20% розчинника діаметр краплі досягає 14 мм, тобто розтікання збільшується майже в два рази. І на стільки ж підвищується змочуваність сполучною моделей.

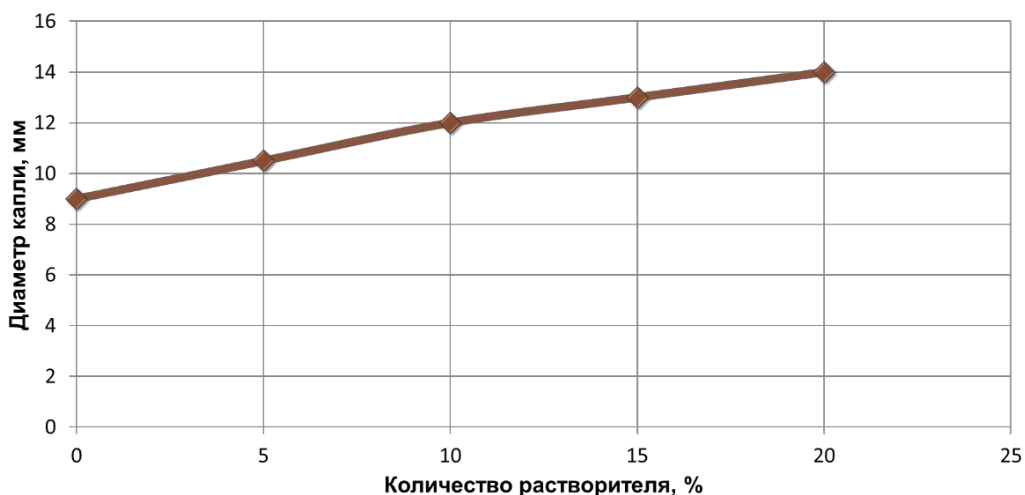


Рисунок 3.3 – Розтікання Армосила в залежності від додавання до нього розчинника

В'язкість відноситься до числа дуже важливих структурно-чутливих властивостей рідкого стану речовини. За характером зміни в'язкості можна судити про структурні зміни в рідині. З численних методів визначення в'язкості в даній роботі використовується метод Стокса, який базується на вимірюванні швидкості кульки, що падає в досліджуваній рідині.

Розрахункова формула для в'язкості:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{V_0} \cdot r^2 \cdot g ,$$

Де: ρ_1 - щільність матеріалу кульки;

ρ_2 - щільність рідини;

r - радіус кульки; g -прискорення вільного падіння;

V_0 - швидкість руху кульки в рідині; L -довжина шляху, який проходить кулька; τ -

час проходження шляху кулькою.

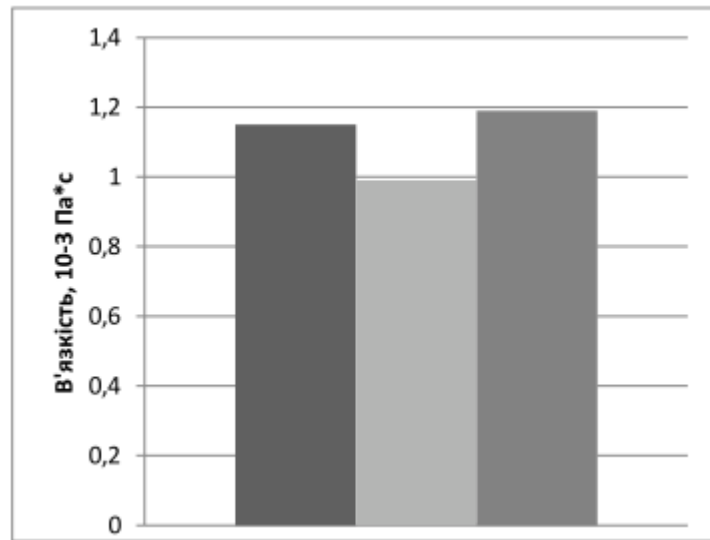


Рисунок 3.4 - Експериментальні значення в'язкості різних розчинів:■ Вода,■ - «Армосил»,■ - Спирт+Вода

В результаті дослідження було встановлено (рис. 3.4), що в'язкість сполучного «Армосил» без додавання в нього розчинника ($0,99 \cdot 10^{-3}$ Па*с) близька за значенням до в'язкості води ($1,02 \cdot 10^{-3}$ Па*с).

Були проведені вимірювання в'язкості сполучного «Армосил» з розчинником.

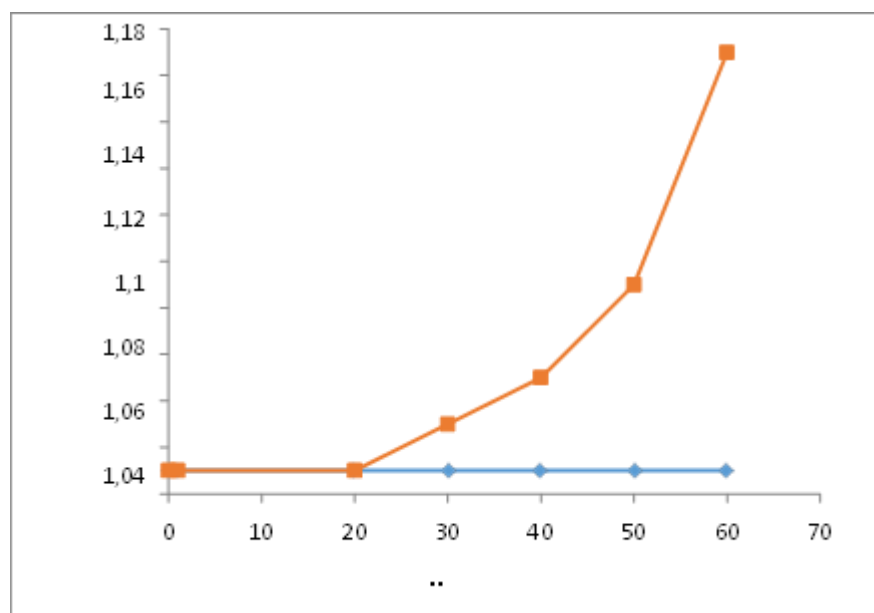


Рисунок 3.5 – Залежність в'язкості від часу, де:◆ «Армосил»,

■ «Армосил» з 10 % розчинника

Було встановлено, що при введенні 10% розчинника в «Армосил» в'язкість протягом 20 хвилин залишається незмінною ($0,99 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$), а потім величина в'язкості зростає до 60 хвилин з $1,01 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ до $1,17 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Це обумовлено тим, що спочатку відбувається внутрішня перебудова структури водного розчину Армосила. Далі починається процес гелеутворення, який представляє собою коалесценцію колоїдних частинок – укрупнення їх розмірів, що і призводить до зростання в'язкості розчину.

Таким чином, можна зробити висновок, що можливе використання

«Армосила», як сполучного з додаванням розчинника при виготовленні виливків методом ЛВМ.

Було проведено дослідження поверхонь форм на основі різних сполучних. Ємельянов та ін. [8] визначили, що застосування Армосила можливе, але перший шар найкраще робити на основі етилсилікату, тому що якість поверхні для етилсилікату вийшла вищою, ніж для Армосила. Гранулометричний склад наповнювача вогнетривкої суспензії і обсипного матеріалу для всіх вогнетривів був однаковий. Порошки 5...50 мкм, обсипка 0,16...1 мм для першого і четвертого шару відповідно. На графіках видно, що початкова проникність різна.



Рисунок 3.6 – Мікроструктура поверхні оболонкових форм (x60): а) Армосила, б) Людекса с) Етилсилікату

З рис. 3.6 видно, що мікроструктура поверхні етилсилікату має меншу

шорсткість, ніж Армосил і Людекс. Це пов'язано з кращою змочуваністю поверхні. Армосил і Людекс мають практично однакові дані по міцності форм [8]. Контактна поверхня керамічної форми на основі Людекс-SKF покрита порами на 40 – 50 %. Розмір пор становить від 20 до 100 мікрон. В основному переважають пори близько 50 мікрон.

Пори мають округлу форму. Витягнуті пори часто вигнуті, хоча і мають невелику довжину. Розташовані пори одна від одної приблизно на однаковій відстані.

Контактна поверхня керамічних форм на основі китайського сполучного GN-25 + 10 % латексу представлена на рис. 3.7.



Рисунок 3.7 – Контактна поверхня керамічної форми (фрагмент) на основі китайського сполучного GN-25 (вміст SiO_2 25 %)+ 10 % латексу і кварцового піску ($\times 56$)

Вона покрита порами значно меншою мірою, ніж поверхня форм на Людекс-SKF. Кількість пор займає близько 30% поверхні. Розмір пор значно менше, ніж і , становить від 5 до 20 мікрон. Переважають пори близько 10 мікрон. Пори також мають в основному округлу форму. Витягнуті пори вигнуті, хоча і мають невелику довжину. Розміщені пори одна від одної приблизно на однаковій відстані.

Було встановлено, що при додаванні 20% спирту в якості розчинника у водний розчин кремнезоля якість поверхні оболонок на сполучному «Армосил» дуже сильно зростає. На рис. 3.8 представлена мікроструктура поверхні оболонки на Армосилі з 20% спирту.



Рисунок 3.8 – Мікроструктура поверхні оболонки

З рис. 3.8 видно, що якість поверхні дуже висока, шорсткість невелика, отже, Армосил можна використовувати нарівні з етилсилікатом, якщо вводити в нього розчинник – спирт. Введення ацетону є недоцільним, тому що він сприяє огелюванню розчину, що ускладнює подальшу роботу з даним сполучною речовиною. Коли починається процес гелеутворення, який представляє собою коалесценцію колоїдних частинок – укрупнення їх розмірів, починається зростання в'язкості розчину.

3.4 Моделювання при розробці технології

Для скорочення термінів технологічної підготовки може бути реалізована така послідовність проектування турбінної лопатки [9]:

- 1). Створення 3D-моделі турбінної лопатки в CAD-системі;
- 2). 3D-моделювання елементів прес-форми для лиття лопатки;
- 3). Обробка технології виготовлення деталей прес-форми на верстаті з ЧПУ.

Конструктивно лопатку можна умовно розділити на три частини: перо, хвостовик і технологічну полицю. Побудова профілю пера лопатки проводилася за трьома перерізами. Для цього на основі креслення потрібно було задати координати трьох точок профілів, а також координати кіл кромки лопаток. Готова CAD-модель заготовки лопатки (з урахуванням 2% - ної ливарної усадки показана На рис. 3.9.

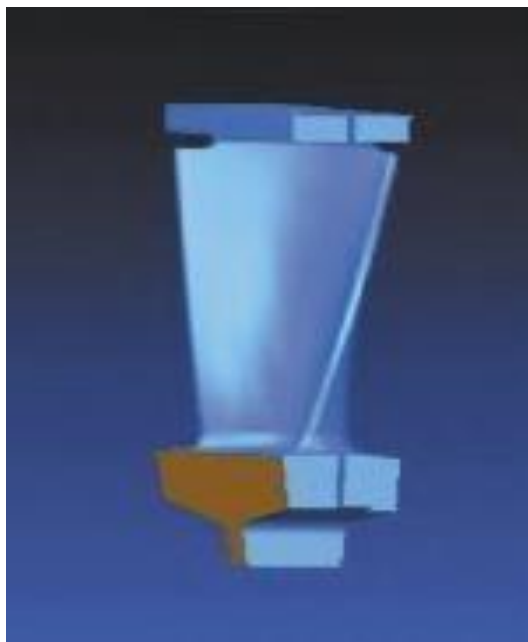


Рисунок 3.9 – Модель турбінної лопатки [9]

Проектування прес-форми для лиття воскової моделі починається з побудови лінії роз'єму пера лопатки. Готові CAD-елементи прес-форми показані на рис. 3.10.

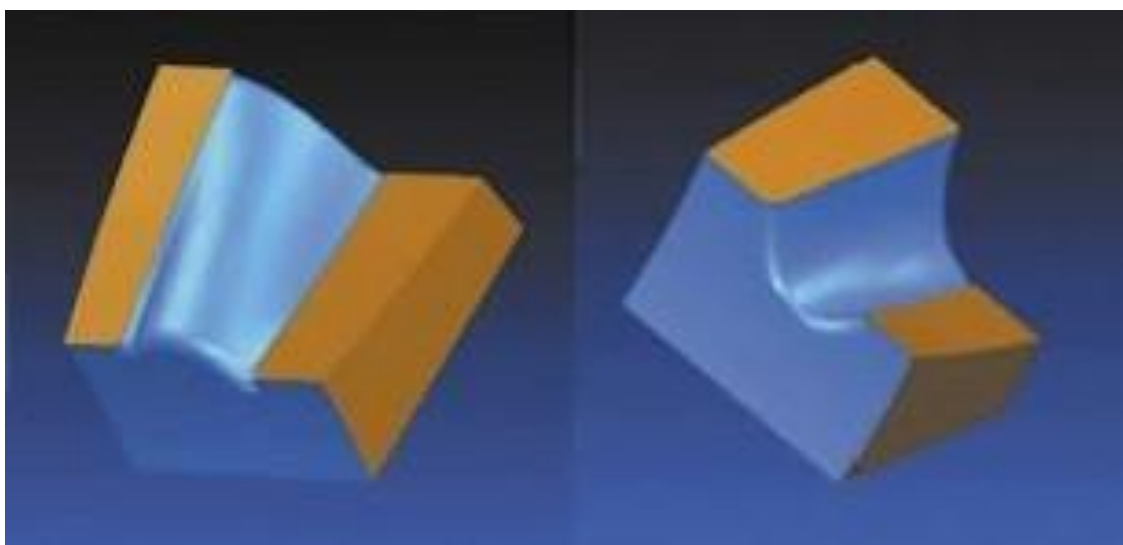


Рисунок 3.10 – Готова прес-форма [9]

Далі на основі готових CAD-моделей формують формуючі елементи прес-форми, наприклад, в САМ-системі PoverMILL, розробляються керуючі програми для обробки їх масштабних воскових прототипів (в масштабі 1:2) на навчальному фрезерному верстаті з ЧПУ PAG 0501. Для фрезерування використовується набір з двох кінцевих і двох кульових фрез діаметром від 1,0 до 6,0 мм. На рис. 3.11

зображені елементи готової прес-форми, яка вже пройшла тестову перевірку на відливку воскової моделі заготовки лопатки.



Рисунок 3.11 – Прес-форма

Виготовлені таким чином воскові заготовки лопатки відправляються в ливарний цех, де за технологією виплавлюваних моделей були сформовані ливарні форми (рис. 3.12) і відлиті вже металеві заготовки турбінних лопаток (рис. 3.13).



Рисунок 3.12 – Ливарна форма для лиття за виплавлюваними моделям



Рисунок 3.13 – Готова турбінна лопатка

4. ЕРОЗІЯ Cr–Ni СПЛАВІВ

Одним з найбільш поширених експлуатаційних дефектів є ерозія. Ерозія металу - це механічний вплив, наприклад, рухомих частинок, рідин, твердих речовин, суспензій і газових бульбашок на поверхню металу. Інтенсивність ерозійного руйнування залежить і від твердості металу. Для підвищення стійкості металу до ерозії додають легуючі компоненти, які збільшують його опір. Або ерозійна стійкість може бути збільшена за рахунок зміцнення поверхні [14].

Вивчення ерозії можна проводити частинками з розмірами широкого діапазону від мм до мікрометрів. Можна виконувати кількісні вимірювання за допомогою оптичного мікроскопа, скануючого або трансмісійного електронного мікроскопів. Часто різні мікроскопи використовуються для оцінки ерозійних тестів при різних геометричних факторах. Форма частинок є важливим параметром так само, як і швидкість частинок, кут падіння і твердість частинок [15].

Важливо вивчити вплив ерозії на якість поверхні лопатки турбіни. У початковий період – інкубаційний – відбувається металева деформація шляхом поверхневого зміцнення. Поверхня металу знаходиться в напруженому стані, втомна міцність по відношенню до навантаження на турбіну зменшується у вигляді

стрибків тиску. Це призводить до розтріскування і може призвести до повного виходу з ладу лопатки. Початок утворення тріщин і полів напружень на поверхні супроводжується утворенням мікротріщин. Це, в свою чергу, є наслідком деформації і процесів локальної втоми матеріалу.

4.1 Часові періоди ерозійних процесів у виливку

Процес ерозії одночасно залежить від частинок, якими еродується поверхня, а також від самого матеріалу. У статті НАСА в 1982 році, в якій ерозія алюмінієвих сплавів [16] характеризується наступними періодами:

1. Інкубація, або індукція – період, в якому, у зв'язку з дією абразивних частинок, незначна або взагалі відсутня втрата ваги.
2. Прискорення або накопичення – період, в якому швидкість втрати ваги швидко зростає.
3. Затримка або ослаблення – період, в якому швидкість втрати ваги швидко падає.
4. Баланс – тривалий період, в якому швидкість втрати ваги є постійною. Цей період являє собою «максимальну швидкість» або «константу швидкості» [17].

Ці періоди важливо розрізняти, тому що існують різні матеріали, кожен з яких характеризується характерною швидкістю.

4.2 Вплив температури на експлуатаційні властивості виливки

У статті Roy [20] стверджується, що зміна швидкості ерозії різних металевих сплавів є функцією від температури (рис. 4.2 і 4.3.). На цих малюнках показані дані ерозії, в якій частинки вдаряються об поверхню з високою швидкістю і під певним кутом падіння. Вплив температури на швидкість ерозії зі збільшенням швидкості можна розділити на три групи. У першій групі швидкість ерозії зменшується при постійно зростаючій температурі, при досягненні швидкості ерозії мінімального значення вона починає зростати зі збільшенням температури. Сплави 5Cr - 0,5Mo,

17-4 PHSS, 410 SS, Alloy 800, Ti -6Al-4V і вольфрам належать до цієї групи.

Процес окиснення при температурах 400–1150 °С умовно складається з етапів утворення окалини та деградацією її структури. Для достовірної оцінки ресурсу роботи жароміцних сплавів системи Fe-25Cr-35Ni-0,45C-Si-Nb необхідно в кожному конкретному випадку проводити попередні експериментальні дослідження їх корозійної стійкості.

Підвищення ефективності сучасної промисловості потребує збільшення допустимої температури, який супроводжується можливими локальними перегрівами робочих зон турбінних лопаток. У зв'язку з цим актуальним є вивчення процесів окиснення в інтервалі температур 1100–1200 °С жароміцних сплавів на основі Fe–Cr–Ni, що використовуються для виготовлення високотемпературного обладнання.

Таблиця 4.3 - Швидкість окиснення на повітрі сплавів на основі системи Fe–Cr–Ni

Марка сплава	Скорость окисления, г/м ² ч, при разных температурах (°C):									
	800	900	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350
45X26H33C2B2	—	0,153	0,191	0,286	0,555	1,148	2,008	—	—	—
36X18H25C2 [16]	0,14	0,25	0,42	—	0,77	—	—	—	—	—
10X16H45Ю3 [16]	—	—	—	—	—	—	0,25	0,28	0,33	0,45

Основне положення теорії окиснення — «оксидний шар є щільною, ідеально прилягаючою до сплаву окалиною». Це справедливо для деяких особливо чистих металів (нікель, мідь, алюміній тощо), але у випадку окиснення сплавів, які містять декілька хімічних елементів і неминучі домішки, практично не виконується. Причини цього полягають у тому, що на поверхні таких сплавів утворюються оксиди з великою кількістю дефектів різної природи, у структурі сплавів присутні фази з різною схильністю до окиснення, які трансформуються при робочих температурах, а також спостерігається вплив робочих напружень і термічних циклів. Ці фактори неминуче призводять до руйнування структури оксидних плівок на поверхні сплавів і зниження їхніх захисних властивостей у процесі експлуатації

[11–13].

Водночас основна вимога до жаростійких сплавів — забезпечення працездатності виготовлених із них деталей в умовах інтенсивної взаємодії з навколишнім і робочим середовищем різного складу та хімічної активності. Для цього жаростійкі сплави під час розроблення та освоєння виробництва піддають корозійним випробуванням при високих температурах, найчастіше — на повітрі.

Під час зміни умов експлуатації необхідно оцінювати їхній вплив на працездатність деталей відповідно до нових умов. У зв'язку з цим аналіз процесу окиснення жароміцних багатокомпонентних сплавів на основі системи Fe–Cr–Ni під час тривалої високотемпературної експлуатації потрібно проводити для конкретних умов роботи, з урахуванням складу сплаву, технології виготовлення деталей і характеру робочого середовища.

5. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОКИСНЕННЯ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

Метою цієї роботи було дослідження процесу окиснення сплавів системи Fe–25Cr–35Ni–0,45C–Si–Nb при температурах 400–1150 °C та оцінка їх жаростійкості в умовах, що відповідають експлуатації роботи турбінних лопаток.

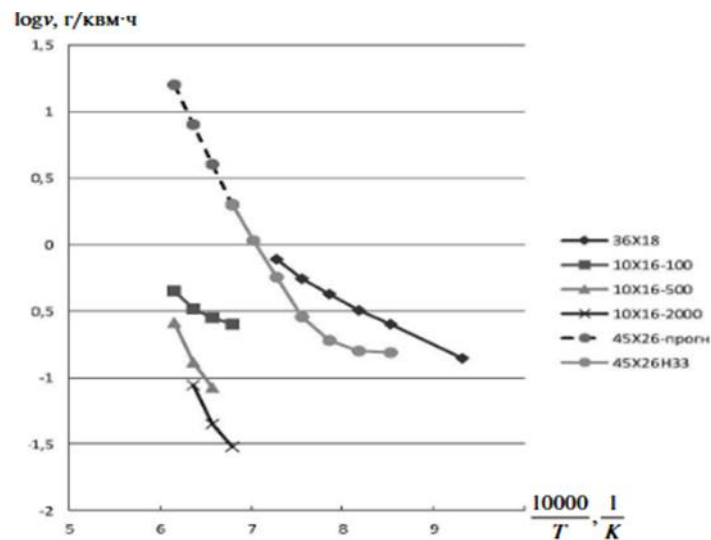
Матеріалом дослідження був жароміцний сплав системи Fe–25Cr–35Ni–0,45C–Si–Nb марки 45X26H33C2B2. Сплав виплавляли в індукційній печі місткістю 500 кг із чистих шихтових матеріалів і розливали в оболонкові форми стандартні клиноподібні ливарні зразки (ГОСТ 977–88).

Фактичний хімічний склад дослідженого сплаву, % (мас.): 0,46 C; 25,5 Cr; 35,6 Ni; 1,73 Si; 1,60 Nb; 1,31 Mn; 0,59 W; 0,31 Mo; 0,21 Ti; 0,05 N; решта — Fe.

Аналіз кінетики окиснення сплаву проводили за допомогою приладу комбінованого термогравіметричного аналізу та диференціальної сканувальної калориметрії TGA/DSC 1/1600 HF («Mettler-Toledo AG», Швейцарія). Для дослідження температурної залежності швидкості окиснення використовували

зразки у вигляді стружки товщиною 0,2–0,4 мм, масою 73,014 мг; швидкість нагріву на повітрі в інтервалі 400–1200 °С становила 1 °С/хв.

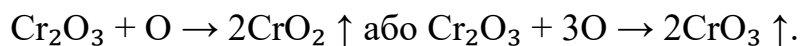
Дослідження кінетики окиснення при постійній температурі 900 °С проводили на плоских шліфованих зразках розміром 48,0×8,0×4,5 мм із початковою масою 14,0777 г. Точність вимірювання маси становила 0,0001 г. Контроль температури здійснювали термопарою типу ВР (W-Re), з точністю вимірювання ± 2 °С.



допускається швидкість корозії $v = 3,0 \text{ г/м}^2\cdot\text{год}$, то сплав може витримувати короточасні навантаження при $1250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Підвищена швидкість високотемпературного окиснення сплавів за нижчих температур (див. рис. 4.14) пов'язана з дефектністю поверхні зразків, що формується під час їх виготовлення (включно з поліруванням), а також із термодинамічними особливостями утворення оксиду на основі хрому, який перебуває в матричному твердому розчині (γ -фаза).

За підвищеної температури процес окиснення переходить у режим, що визначається дифузією атомів кисню через окалину, і характеризується лінійною залежністю $\lg v$. Подальше підвищення температури та ступеня дефектності структури окалини призводить до надлишку кисню, унаслідок чого в окалині зростає ступінь окиснення оксиду з утворенням летких сполук за реакціями:



Наслідком цього є руйнування окалини та перехід до катастрофічного режиму окиснення з втратою (знесенням) маси зразків [18–20].

Для детальнішого аналізу характеру високотемпературного окиснення сплаву 45Х26Н33С2Б2 було досліджено його поведінку під час ізотермічної витримки при температурі $900 \text{ }^\circ\text{C}$ на повітрі. Окиснення зразка проводили у три технологічні етапи:

тривалість першого становила 40 хв, другого — 110 хв, третього — 200 хв.

Після кожного етапу зразок охолоджували разом із піччю до кімнатної температури. Такий режим окиснення імітує експлуатаційні умови, що включають запуск і зупинку обладнання, при яких термоцикування істотно впливає на формування структури окалини та дефектів у ній.

Підтримання температурного режиму здійснювалося автоматично, а зважування зразка під час ізотермічної витримки виконували з інтервалом 30–60 с. За експериментальними даними приріст маси зразка перераховували в умовну

товщину окалини згідно з виразом $\delta \approx \Delta m / (\gamma S_0)$, де Δm — приріст маси (г), γ = 8,15 г/см³ — густина сплаву, S_0 = 12,72 см² — площа поверхні зразка. Результати дослідження наведено на рис. 2.

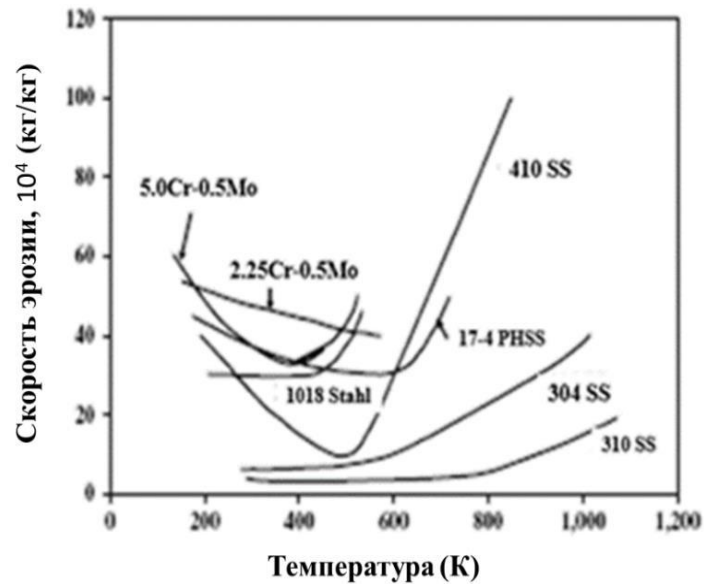


Рисунок 4.2 – Вплив температури на швидкість ерозії ряду сплавів

РОЗДІЛ 6

ОЦІНКА СТАНУ УМОВ І БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ПІСЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

На сьогоднішній день актуальною у металургії є проблема зменшення дефектів при виготовленні турбінних лопаток.

Якість виливків характеризують точністю розмірів, шорсткістю поверхні, структурою, механічними й фізичними властивостями металу, а також наявністю або відсутністю у виливках внутрішніх і зовнішніх дефектів (наприклад, раковини, тріщини тощо).

Технологія виготовлення виливків суттєво впливає на їхню якість і, як наслідок, визначає принципи, якими слід керуватися при конструюванні. Переваги способу можуть бути реалізовані, якщо вилівка технологічна для виготовлення литтям по виплавлюваних моделях.

У сучасних цехах операції литва по моделях, що виплавляються, комплексно механізовані і автоматизовані. Проте технологічний процес цього методу лиття супроводжується утворенням таких несприятливих виробничих чинників, як пил, шкідливі гази і пари, надмірне тепло і шум. Високодисперсний кварцовий пил виділяється при помелі кварцового піску, в процесі формування і вибивання сухого наповнювача з опоки, при звільненні виливок від кераміки. Пилоутворенням супроводжується також операція нанесення на модельні блоки пилоподібного кварцу.

Шкідливі гази і пари (неграничні вуглеводні, пари етил силікату і аміаку) виділяються на ділянках розплавлення парафіно-стеаринових і інших модельних матеріалів, при нанесенні вогнетривких покриттів на модельні блоки, при їх сушці в аміачному середовищі і при виплавленні модельних блоків з керамічних форм. Виділення променистого тепла особливо характерно для ділянок витягання форм з прокалочних печей, приготування ливарних розплавів, їх заливки у форми і вибивання відливів з форм. Джерелами утворення шуму і вібрації є установки, призначені для відділення кераміки і стояків від відливів. Тому при даній технології особливу увагу приділяють техніці безпеки праці, пожежній безпеці та засобам індивідуального захисту.

При технологічній конструкції литої деталі, якій можна виготовити виливок, що відповідає вимогам, пропонованим до точності, шорсткості поверхні, фізико-механічним властивостям і структурі металу при найменших витратах на виробництво. При цьому враховують витрати виробництва при виготовленні виливка й наступної її механічній обробці.

Вим.	Арку	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив								
Перевірів								
Рецензент								
Н. Контр.								
Затвер								
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						1	13	

Але нажаль сьогодні в Україні використовують застарілі методи боротьби з браком, які несуть за собою матеріальні та енергетичні затрати, а також збільшують чинник забруднення.

У магістерській роботі запропоновано більш раціональний, економічно вигідний процес виробництва відливок, методом лиття у моделі що виплавляються.

Характерною особливістю цього методу лиття є застосування моделей, що виплавляються, дозволяють робити нероз'ємні разові форми з товщиною стінок 0,5 мм. Такі моделі виготовляють з суміші парафіну, стеарину і інших легкоплавких матеріалів.

Об'єктом дослідження вибрано лопатку для ГТД. В даний час в Україні і за кордоном при виробництві робочих лопаток ГТД широке застосування

Одним з напрямків розвитку авіадвигуннобудування є збільшення температури газів перед турбіною. При цьому, однак, відбувається зростання термомеханічної напруженості лопаток газових турбін і, як наслідок, подальше ускладнення їх конструкції. Від надійності цих елементів двигуна найбільшою мірою залежить надійність і ресурс газотурбінних двигунів в цілому, і, відповідно, безпеку польотів. Проблему надійності газових турбін авіадвигунів можна вирішити тільки шляхом розробки та впровадження якісно нових технологій, у тому числі і розробка технологічного процесу заповнення форми.

Для кожної лопатки характерний власний аеродинамічний профіль. Зазвичай він нагадує крило літального апарату. Найістотніша відмінність лопатки від крила полягає в тому, що лопатки працюють в потоці, параметри якого дуже сильно змінюються по її довжині.

Лопатки змінного перерізу мають змінний профіль на наступних східцях, причому площа поперечних перерізів плавно зменшується від кореневого перерізу до вершини. У лопаток останніх східців це співвідношення може досягати 6-8. Лопатки змінного перерізу завжди мають початкове закручування, тобто кути, утворені прямій, що сполучає кромки перерізу (хордою), з віссю турбіни, званими кутами установки перерізів. Ці кути, з міркувань аеродинаміки, по висоті задаються різними, з плавним збільшенням від кореня до вершини.

У сучасних авіадвигунах лопатки турбіни не можуть працювати протягом заданого ресурсу без надійного захисту від газової корозії. За час експлуатації поверхневий шар лопаток турбіни інтенсивно пошкоджується. У захисних покриттях зовнішньої і внутрішньої поверхонь лопаток турбіни виникають і розвиваються мікротріщини, нерідко утворюються ерозійні пошкодження, відколи покриття, відбувається внутрішнє окислення металу, знижується концентрація захисних елементів, виникають пори, змінюється фазовий склад і структура поверхневого шару. Поверхневий шар сплавів збіднюється елементами, відповідальними за жаростійкість, за стійкість покриттів до газової корозії.

Найбільш часто пошкодження поверхневих шарів спостерігаються на робочих лопатках турбіни високого тиску. Ступінь пошкодження лімітується, насамперед, допустимою деформацією покриттів. Пошкоджуваність поверхневих шарів лопаток турбіни залежить від багатьох факторів: складу газового

середовища, режиму термоцикування , рівня температур і напруг, товщини покриттів , їх складу та структури . Найбільш гостро проблема нанесення надійних захисних покриттів встала при розробці , серійному виробництві та ремонті авіаційних двигунів четвертого покоління , коли рівні температур і навантажень на лопатках турбіни значно зросли та допуск будь-якого браку у лопатках може призвести до трагедії.

Відпрацьовані лопатки з газотурбінного двигуна знімаються і вирушають на переплавку. В першу чергу відбувається сортування лому по хімічній суміші і габаритам. Сортування здійснюється при використанні спеціального устаткування - віброконвеєрів, магнітних сепараторів і інших пристроїв. Таке устаткування дозволяє відокремити метал від непотрібних домішок і сміття. Відділення лому кольорового металу від чермета робиться вручну.

Від ваги і виду лому лопаток (негабарит, габаритний, легковагий), його чистота залежить спосіб переробки. На підприємствах великі шматки негабарита лом металу «обробляють» ручними різаками на частини прийнятних розмірів.

Коли лом пройшов сортування, різання і пресування, його відправляють в конвертер або електропіч. І тільки після цього колишні чавунні ванни, старі покрівлі, металеві ліси стануть блискучими листами металопрокату, новими кузовами автомобілів і так далі. При цій стадії переробки лому лопаток через недосконалість технології процесу переробки додатково викидається в атмосферу газу і витрачається додаткові електроресурси.

Виправлення дефектів виливків доцільно, якщо витрати на роботу менше вартості виготовлення виливка.

У сучасності існує безліч технологій по ремонту і відновленню лопаток ГТД. Розвиток науки і техніки в швидкому темпі, розкриває перед нами безліч технологій, які спрямовані на зменшення собівартості і збільшення якості ремонту і відновлення лопаток ГТД.

Технологія ремонту і відновлення лопаток ГТД складається з етапів:

- вхідний контроль;
 - металургійне дослідження;
 - зняття зовнішнього і внутрішнього жаростійкого покриття;
 - наплавлення;
 - термообробка;
 - підготовка під нанесення покриттів;
 - нанесення покриття на внутрішню порожнину;
 - нанесення покриття на проточну частину пера лопатки;
 - вихідний контроль.
- методи наплавлення (рис. 6.1)



Рисунок 6.1 - Методи відновлення лопаток наплавлення електродуги і імпульсного лазерного наплавлення.

Різні технології відновного ремонту лопаток ГТД мають свої достоїнства та недоліки.

Основними недоліками всіх ремонтів браків лопаток є те що при наплавці при роботі сварки суттєво підвищується температура навколишнього середовища, що в свою чергу впливає на працівників цеха. Також суттєвим при заварюванні браку є виділення гамма лучів, виділення в атмосферу свар очних аерозолей. Не малу роль відіграє шкідливе обладнання яке застосовується в різних циклах операціях зменшення браку.

На мою думку такий метод не є ефективним у відновленні лопаток, тому що потребує додаткове технологічне обладнання, витрати на електроенергію, витрати на додаткові умови безпеки працівників на даній операції.

Тому в магістерській роботі було зроблено акцент на заміну етилсилікату на «Армосил» для нанесення на модельний блок першого шару суспензії, якщо в нього додатково вводити спирт або інший розчинник.

Армосил – це високотемпературний водний сполучний матеріал, який використовується для виготовлення керамічних оболонок (форм) при точному литті за моделями, що виплавляються.

Армосил відноситься до водних колоїдних розчинів (кремнезолі або алюмозолі), які є екологічно безпечнішими ніж етилселікатні сполучні.

Етилсилікатні сполучні матеріали мають низку шкідливих властивостей, які обмежують їх застосування і вимагають суворих заходів безпеки.

Виділення спирту – при гідролізі етилсилікату (взаємодії з водою) та подальшому затвердінні етилсилікату виділяється значна кількість етилового спирту (етанолу). Пари спирту мають наркотичну дію, подразнюють дихальні шляхи та слизові оболонки очей, а при тривалому впливі можуть спричинити головний біль, нудоту та пошкодження центральної нервової системи.

Утворення діоксиду кремнію (силікоз) – як і у випадку з водним сполучним, кінцевим продуктом перетворення етилсилікату є діоксид кремнію (SiO_2). Основна небезпека полягає в утворенні дрібнодисперсного пилу в процесі приготування суміші, сушіння та подальшого вибивання форм. Вдихання цього пилу може призвести до силікозу – невиліковного професійного захворювання легень.

Подразнення шкіри та очей – прямий контакт рідкого етилсилікату зі шкірою або очима спричиняє сильне подразнення, сухість та дерматит.

Пожежо та вибухонебезпечність – легкозаймистість: етиловий спирт, що входить до складу сполучного або утворюється під час його використання є легкозаймистою речовиною. Пари спирту можуть утворювати вибухонебезпечні концентрації в повітрі робочої зони. Це вимагає використання спеціального вибухобезпечного обладнання, систем вентиляції та суворого дотримання правил пожежної безпеки.

Екологічні аспекти – високий вміст летких органічних сполук (ЛОС), які містять етилсилікати, забруднюють повітря робочої зони та навколишнє середовище. Це є однією з причин переходу багатьох підприємств на менш токсичні водні сполучні матеріали, такі як Армосил.

Для роботи з етилсилікатними сполучними необхідне використання ефективної припливно витяжної вентиляції, герметизація процесів, застосування засобів індивідуального захисту (спецодягу, рукавиць, захисних окулярів, респіраторів або протигазів), а також наявність засобів пожежогасіння.

Армосил – це водні колоїдні розчини (кремнезолі або алюмозолі), які є екологічно безпечнішими за традиційні етилсилікатні сполучні.

Водні колоїдні розчини забезпечують високу чистоту поверхні готових виливків, характеризуються хорошою адгезією до модельних восків, підвищують міцність керамічних форм як у сирому, так і в прожареному стані, є пожежо та вибухобезпечними, стійкими до впливу органічних розчинників, кислот та солей.

Хоча водні сполучні матеріали вважаються безпечнішими за традиційні етилсилікатні аналоги, вони все ж створюють певні небезпеки у ливарному виробництві, пов'язані головним чином із загальними умовами ливарного процесу та специфікою самого матеріалу.

Головна небезпека походить не стільки від рідкого сполучного, скільки від використання кварцового піску та інших матеріалів із високим вмістом кремнезему (SiO_2) в процесі формування та вибивання форм.

При роботі з сухими компонентами та подальшому руйнування вже готових форм утворюється дрібнодисперсний пил діоксиду кремнію, вдихання якого може призвести до небезпечного професійного захворювання легень – силікозу.

Прямий контакт рідкого сполучного (яке зазвичай має слаболужну або слабокислу реакцію), зі шкірою або слизовими оболонками може спричинити подразнення.

Під час сушіння керамічних оболонок у подальшого випалювання модельного воску утворюються пари та продукти згоряння, які потребують ефективної системи вентиляції.

Основний ризик у ливарному виробництві – це робота з розплавленим металом. Процес заливки, навіть при використанні міцних керамічних форм, несе ризик розбризкування металу, прориву форм або інших аварійних ситуацій, що може призвести до серйозних термічних травм.

Хоча самі водні сполучні є пожежо та вибухобезпечними, загальний технологічний процес вимагає дотримання правил охорони праці у вибухонебезпечних середовищах, особливо при використанні органічних розчинників або моделюючих матеріалів.

Робота з важким обладнанням, формами, металом та інструментами несе ризик механічних травм, що є загальною небезпекою для будь-якого виробництва.

Для мінімізації цих ризиків необхідне використання засобів індивідуального захисту (респіраторів, рукавиць, спецодягу, захисних окулярів), ефективної загально обмінної та місцевої вентиляції, а також суворе дотримання правил охорони праці у ливарному виробництві.

7 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

В попередніх розділах даної роботи було показано як технології отримання виливків з використанням керамічних ливарних форм може впливати на технологічну ефективність ливарного процесу. Особливо це важливо для підприємств, що виготовляють лиття з дорого вартісних жароміцних сплавів. При виготовленні самих форм до собівартості виливків обов'язково додається вартість їх виготовлення з урахуванням вартості матеріалу та операцій сушіння форм та її підготовки до розливу в неї гарячого сплаву шляхом покриття форми спеціальним покриттям, що спрощує вибивку відливки з форми. Було доведено, що важливим при цьому є досягнення необхідних значень фізико-механічних властивостей керамічних форм, а це в свою чергу дозволяє підтримувати високі вимоги до точності геометричних розмірів та шорсткості поверхні виливків навіть при виробництві великих партій однакових та складних виробів. Тому, вибір обладнання та технології для виробництва керамічної ливарної форми є надзвичайно важливим для забезпечення не тільки технологічної, але й економічної ефективності, враховувати складні умови, що виникають на різних етапах експлуатації, а також специфіку відливки в них жароміцних сплавів.

Для економічної доцільності використання запропонованої технології враховується, що виливки, отримані литтям у керамічні форми, характеризуються високою точністю розмірів (до 4-5 класу), що дозволяє мінімізувати кількість втрат металу. Також деталі характеризуються досить високим рівнем чистоти поверхні по шорсткості, що зменшує витрати на механічну обробку. Ще одним позитивним фактом є точність геометричних розмірів вилівка, які максимально наближеною до готової деталі та в деяких випадках механічна обробка взагалі не потрібна. Цей тип виробничого процесу лиття включає кілька операцій з використанням різних матеріалів, а це визначає збільшення собівартості готового литого виробу.

Для виробництва виливків з жароміцних сплавів з високим рівнем відтворюваності та стабільності властивостей, використання технології лиття в

керамічну форму та отримання економічної вигоди можливе, якщо виконуються умови забезпечення:

- точності формування конструкції моделі;
- міцності керамічної форми, що впливає на кількість разів її використання і відповідно може впливати на вартість процесу;
- термічної стійкості форми, так як мова йде про використання їх для жароміцних сплавів з високими температурами плавлення;
- достатньо високого газопроникнення для видалення газотвірних складових з форми, що впливає і якість кінцевої ливарної продукції, а відповідно і на її ціну.

Під час визначення показників економічної ефективності необхідно враховувати специфіка конкретного ливарного виробництва. Тож при використанні керамічних ливарних форм важливим є рівень витрат на обладнання (відтворення шляхом поточних та капітальних ремонтів, амортизацію), матеріальні витрат та затрачений час на виготовлення партії виробів або його одиниці. Чим менші витрати будь-якої групи, тим ефективнішим є виробництво. Але є варіант коли ускладнення технології або ефективність використаних ресурсів при зміні технології може привести і до зростання вартості виготовлення продукції. Тоді для економічної вигоди потрібно щоб її ціна була вища за базову. Так як продукції виготовлена за нашою технологією є досить високотехнологічною, саме вартість її збуту є ключовим параметром забезпечення вигоди. Тобто приріст собівартості повинен бути меншим відносно зростання ціни.

Найважливішими показниками, які слід враховувати при прийнятті рішення про використання технології лиття в керамічні форми є:

- мінімізація втрат металу, яка встановлюється різницею між вагою готової відливки та вагою металу, використаного для його виробництва. Залежить від втрат під час плавлення металу, і що важливо для наших рекомендацій від втрат при заливанні у форму та кількістю дефектних виливків;
- зменшення часу на підготовку оснащення до ливарного процесу. Так як втрати часу виникають на будь-якому етапі технологічного процесу – їх необхідно

враховувати для контролю виробничої продуктивності та загальної потужності, не допускати не доцільних затримок виробництва не пов'язаних з ним (наприклад, порушення трудової дисципліни);

- зниження витрат на технічні ресурси, до яких відносимо все, що необхідно для технологічного процесу виробництва лиття;
- підвищення продуктивності праці на всіх етапах технологічного процесу – від розробки технології до передачі готової продукції замовнику. Рівень продуктивності визначає потребу у персоналі, а від так впливає на витрати праці у вигляді заробітної плати.

При правильному врахуванні всіх чинників формування витрат та доходу ливарного виробництва підприємство може отримати вигоду, яка формується за принципом показаним на рис. 7.1.

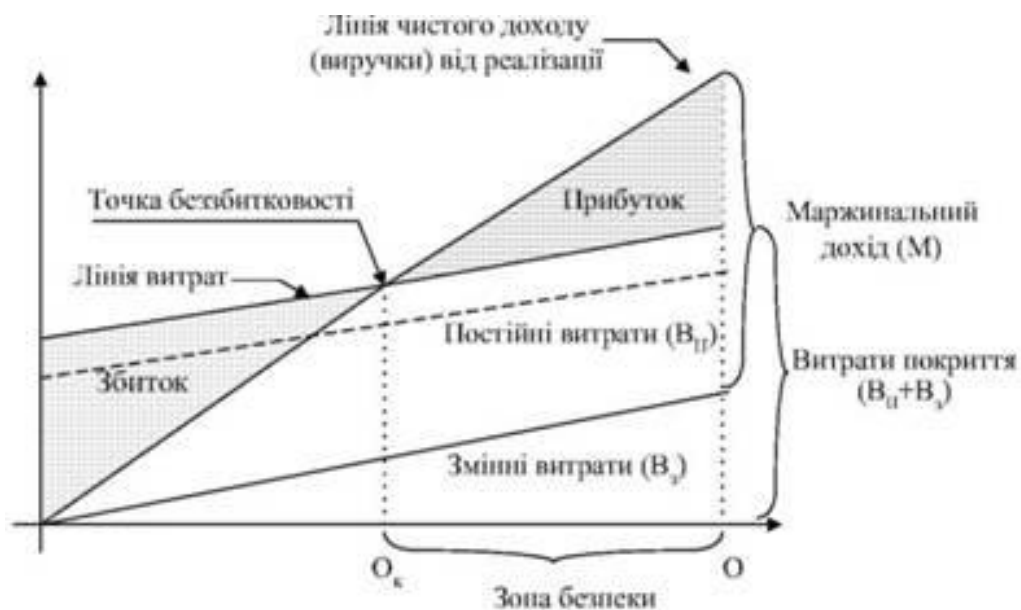


Рис. 7.1 – Принцип співставлення витрат та вигод для визначення найвищого рівня економічної ефективності

Для визначення вартості продукції ливарного процесу з використанням керамічних ливарних форм враховували витрати на його складові, що відображені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Витрати матеріальних та енергетичних ресурсів при

виготовленні керамічних форм на 1 т виливок

Технологічна операція	Норма витрачання / вартість на 1 т придатного лиття			
	керамічна основа кг / грн.	вогнетривка фарба кг / грн.	добавки кг / грн.	електро енергія кВт-год /грн.
Виготовлення форми			1,2 / 150	15 / 128
Нанесення покриття на модель		40 / 2480		10 / 85
Формовка	100 / 450			1,5 / 13
Заливка				4,5 / 38
Утилізація суміші				10 / 85
разом	450	2480	150	349
всього	3429			

Враховуючи всі принципи визначення економічної вигоди при виготовленні лиття з жароміцних сплавів (на прикладі, системи Fe-25Cr-35Ni-0,45C-Si-Nb марки 45X26H33C2B2) можна визначити доцільність впровадження наших пропозицій (табл. 7.2).

Таблиця 7.2 – Порівняння показників виготовлення виливків з жароміцної сталі

Показник	Величина за порівнюваними технологіями		Зміна величини показника	
	базовою	рекомендованою	абс., нат. од.	віднос., %
Коефіцієнт виходу придатного лиття	0,87	0,92	+0,05	+5,7
Вартість ливарної форми, грн./шт.	3200	3429	+229	+7,2
Собівартість 1 т виливків з жароміцного сплаву (45X26H33C2B2), тис. грн.	120	122,5	+2,5	+2,1
Ціна лиття, тис. грн./т	145	156	+11	+7,6
Економічна вигода від реалізації з	25,82	27,47	+1,65	+6,4

урахуванням ставки прибутку 18%, тис. грн./т				
--	--	--	--	--

Знаючи величину витрат та вигод порівнюваних варіантів технологічних підходів до виготовлення виливків з жароміцних сплавів можна порівняти і рівень рентабельності виробництва:

$$R = E_{\text{виг}} / C \times 100, \% \quad (7.1)$$

То ж при використанні традиційної технології цей показник становитиме

$$R = 25,82 / 120 \times 100 = 21,5, \%$$

а при впровадженні запропонованої технології лиття в керамічні форми відповідно

$$R' = 27,47 / 122,5 \times 100 = 22,4, \%$$

Незначне, але все ж таки збільшення рівня рентабельності виробництва на

$$\Delta R = 22,4 - 21,5 = 0,9 \%,$$

повністю підтверджує економічну ефективність впровадження наших досліджень і можна говорити про доцільність рекомендацій щодо використання виготовлення виливків із жароміцних сплавів з використанням керамічних форм.

ВИСНОВКИ

1. Було встановлено, що процес випаровування чистого «Армосила» триває в кілька разів довше, ніж процес випаровування етилсилікату, і чим більше вводиться розчинника, тим швидше відбувається процес сушіння.
2. Можлива заміна етилсилікату на «Армосил» для нанесення на модельний блок першого шару суспензії, якщо в нього додатково вводити спирт або інший розчинник.
3. В результаті дослідження було визначено, що в'язкість сполучного «Армосил» без додавання в нього розчинника ($0,99 \cdot 10^{-3}$ Па*с) близька за значенням до в'язкості води ($1,02 \cdot 10^{-3}$ Па*с).
4. В якості розчинника краще використовувати спирт, який в результаті не призводить до огелювання розчину.
5. Експериментально встановлено, що процес високотемпературного окиснення сплаву системи Fe–25Cr–35Ni–0,45C–Si–Nb має нанорозмірний характер і відбувається у три основні етапи: інтенсивне початкове окиснення, перехід до параболічного режиму росту окалини та завершальний етап з деградацією оксидного шару.
6. Кінетика окиснення визначається утворенням і структурною стабільністю плівки оксиду хрому Cr_2O_3 , яка при товщині понад 3 мкм стає пористою і втрачає захисні властивості. Подальше підвищення температури спричиняє перехід до катастрофічного режиму окиснення через утворення летких оксидів хрому (CrO_2 , CrO_3).
7. Виявлено, що швидкість корозії сплаву 45X26H33C2B2 при 1200 °C становить $v = 2,0$ г/м²·год, що на два порядки вище за швидкість росту оксиду хрому на поверхні чистого металу. Це свідчить про значну дефектність окалини і потребу в попередніх корозійних випробуваннях для оцінки ресурсу деталей у конкретних умовах експлуатації.
8. Механізм окиснення визначається формуванням оксидних структур кількох «поколінь» частинок нанорозмірного масштабу, утворенням

мікропор та сегрегацією хрому до поверхневого шару. Ці процеси зумовлені термодинамічними факторами та станом приповерхневої зони, де концентрація дефектів істотно впливає на дифузію кисню.

9. Доведено, що структура окалини складається з дрібнозернистих кристалів Cr_2O_3 з підвищеною проникністю вздовж меж зерен. Для стабілізації оксидного шару і підвищення жаростійкості необхідно контролювати умови формування окалини, температурний режим експлуатації та стан поверхні сплаву після механічної обробки.