

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ

І ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Пояснювальна записка

до випускної магістерської роботи

зі спеціальності 136 – Металургія

за освітньо-професійною програмою – Ливарне виробництво чорних та кольорових металів і сплавів

На тему: Удосконалення рецептури стрижневої суміші для лиття виливків із жаростійких сплавів по витоплюваним моделям

Виконав: магістрант групи ЛВ-23-1м _____ Карелін О.А.

Керівник випускної роботи _____ Губін Г.В.

Нормоконтролер _____ Губін Г.В.

Завідувач кафедри _____ Савельєв С.Г.

Кривий Ріг

2024р.

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ ФОРМ І СТРИЖЕІВ

- 1.1. Вимоги до стрижнів та оболонкових форм
- 1.2. Вибір матеріалів для керамічних стрижнів
- 1.3. Вибір матеріалів технологічної зв'язки
- 1.4. Аналіз складів керамічних сумішей
- 1.5. Склади керамічних сумішей на основі плавленого кварцу.....

2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

- 2.1 Методика визначення межі міцності та прогину під час вигину
- 2.2 Методика визначення відносної усадки під час випалювання
- 2.3 Методика визначення уявної пористості
- 2.4. Методика визначення шорсткості поверхні зразків
- 2.5. Методика визначення термічного розширення
- 2,6. Методика виготовлення суміші та зразків для дослідження

3. ДОСЛІДЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ СУМІШІ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВДАСТИВОСТІ СТРИЖНІВ

- 3.1. Обґрунтування складу стрижневої суміші
- 3.2 Дослідження фізико-хімічних і механічних властивостей суміші
 - 3.2.1 Дослідження граничної міцності зразків під час вигину
 - 3.2.2 Дослідження відносної усадки
 - 3.2.3 Дослідження уявної пористості
 - 3.2.4 Дослідження шорсткості
 - 3.2.5 Дослідження коефіцієнта термічного розширення
- 3.3. Моделювання процесу заповнення блоку виливків
- 3.4. Дослідження якості стрижнів з рекомендованої суміші та виливків

4. ЕКОНОМІКА ВИКОРИСТАННЯ ОПТИМІЗОВАНИХ СКЛАДІВ СТРИЖНЕВИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ЛИТТЯ ПО ВИТОПЛЮВАНИМ МОДЕЛЯМ

5. ОЦІНКА СТАНУ УМОВ ПРАЦІ І БЕЗПЕКИ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ПІСЛЯ
ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ
СПИСОК ВИКОРСИТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

До теперішнього часу загальноприйнятою стала технологія виготовлення стрижнів з термопластифікованих стрижневих складів, що являють собою суспензію з поліфракційного вогнетривкого наповнювача і пластифікатора. Безсумнівно, що вимоги до стрижневих складів повинні узгоджуватися з вимогами до стрижнів, які, своєю чергою, регламентуються індивідуально з урахуванням конструкції виливки і прийнятої технології лиття. Причому різноманіття і суперечливість часто взаємовиключних вимог до стрижнів ускладнює науково-обґрунтований вибір хімічного і фракційного складу стрижневої суміші. У кожному конкретному випадку до вирішення цієї проблеми зазвичай підходять емпірично, зважаючи на загальні міркування, засновані на закономірностях керамічної технології, а також виробничого досвіду, накопиченого під час виготовлення подібних виливків.

Робочі лопатки газотурбінних двигунів (ГТД) зазнають екстремальних температурно-силових впливів під час роботи, і підвищення їхніх експлуатаційних характеристик є ефективним способом поліпшення техніко-економічних показників сучасних ГТД.

Виготовлення лопаток для ГТД проводиться литтям за виплавлюваними моделями (ЛВМ). Робочі лопатки з жароміцних сплавів виготовляються порожнистими для прокачування холодного повітря, щоб зберегти їхню працездатність в умовах високих температур. Ефективність охолодження залежить від конструкції внутрішньої порожнини лопатки, яка в міру збільшення температури газів дедалі більше ускладнюється.

Точність геометричних розмірів стрижня, комплекс його термо-механічних характеристик (коефіцієнт термічного розширення (КТР), лінійне розширення, міцність) мають визначальний вплив на розмірну точність порожнини в лопатці.

Конструкція керамічного стрижня повинна забезпечувати необхідну міцність у сирому стані до випалу для проведення таких технологічних операцій

як знімання з пресформи, рихтування, укладання в коробки і достатню міцність після випалу для стійкості стрижня під час заливання розплавом ливарної форми. Крім того, стрижнева суміш має бути хімічно інертною по відношенню до сплаву, що заливається.

У зв'язку з цим магістерська робота, спрямована на розроблення та дослідження стрижневої суміші для лиття охолоджуваних лопаток ГТД є актуальною.

Мета роботи:

Розроблення стрижневої суміші для виробництва охолоджуваних лопаток ГТД для забезпечення найменшого браку за викривленням стрижнів.

задачі дослідження:

1. Обґрунтування вибору матеріалів стрижневої суміші, що забезпечує найменше викривлення стрижнів для отримання охолоджуваних лопаток ГТД;
2. дослідження коефіцієнта термічного розширення та межі міцності у залежності від відсоткового вмісту компонентів стрижневої суміші, що забезпечує зменшення браку виливків.

Практична значущість роботи.

Розроблено рекомендації щодо складу стрижневої суміші, фізико-хімічні властивості якої дають змогу знизити брак за викривленням стрижнів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ ФОРМ І СТРИЖЕІВ

1.1. Вимоги до стрижнів та оболонкових форм

Вимоги до стрижневих складів формуються на основі вимог, що висуваються до стрижнів, які оформляють внутрішню порожнину лопаток ГТД.

До керамічних стрижнів висувають вимоги щодо якості поверхні (шорсткість $R_a < 0,5$ мкм); точності геометричних розмірів ($\pm 0,15$ мм від номінальних); міцності під час вигину (15-30 МПа), пористості (не менше ніж 30 %) та стійкості до термічних ударів до температур 1250-1300 °С [1]. Стрижні повинні витримувати температурно-силові навантаження під час заливання форми металом з мінімально допустимою, або взагалі без деформації. Температура початку деформації при 0,4 МПа має бути вищою за 1450°С і відповідати умовам заливки. Коефіцієнт термічного розширення (КТР) стрижня повинен бути мінімальним і, по можливості, ближчим до КТР форми, що знижує рівень термічних напружень у цих елементах. Стрижень повинен мати високу термохімічну стійкість до розплаву, що заливається, і легко видалятися із затверділого вилівка. І, нарешті, бажано, щоб матеріали для виготовлення стрижнів були недефіцитними і недорогими.

Розробка стрижневої суміші ускладнюється суперечливістю перерахованих вище взаємовиключних вимог до стрижнів. Так вони повинні володіти високими характеристиками міцності й одночасно мати високу пористість для полегшення їх видалення з вилівка. Стрижні повинні добре спікатися за відносно низьких температур, що, своєю чергою, передбачає, що вони гірше чинитимуть опір високотемпературним впливам під час заливання, деформуючись і погіршуючи розмірну точність вилівка. Для забезпечення гарної якості поверхні необхідно застосовувати шихту з дрібнофракційною основою, але це призводить до підвищення усадки стрижня під час випалу.

У міру ускладнення геометрії стрижня і підвищення температури лиття труднощі отримання стрижнів, що задовольняють технічним вимогам, зростають. Це, своєю чергою, посилює вимоги до технологічних властивостей стрижневих сумішей.

Стрижневі суміші повинні мати, насамперед, високу плинність і легко формуватися з отриманням стрижнів практично будь-якої конфігурації і з найменшими внутрішніми напруженнями. Як відомо, за наявності у твердому тілі локальних напружень вони, за умов механічного або будь-якого іншого впливу, активно сприяють руйнуванню тіла, наприклад, за різкої зміни температури.

При використанні електрокорунду в стрижнях у чистому вигляді необхідні високі температури його спікання. Наприклад, для порошку Al_2O_3 дисперсністю 1-2 мкм, зазначена температура перебуває у важкодосяжних межах 1700-1750 °С [2]. Тому в сучасній практиці лиття охолоджуваних лопаток з рівновісною структурою жароміцного сплаву електрокорунд зазвичай застосовується в поєднанні з різними добавками, що поліпшують технологічність одержуваного стрижневого складу. Це виражається передусім у зниженні температури його спікання за збереження необхідних характеристик міцності; зменшенні КТР, що сприяє підвищенню термостійкості стрижня тощо.

Як спеціальні добавки в електрокорундову шихту знайшли застосування карбід і оксид кремнію, діоксид титану (мінералізатори спікання), плавлений кварц, що має низький КТР, та інші речовини.

Введення плавленого кварцу в кількості до 20% за масою знижує термічне розширення стрижня і полегшує в подальшому його видалення з виливки.

Система Al_2O_3 - SiO_2 (рисунок 1.1) є фундаментальною для стрижневої технології. Ця діаграма інтерпретує фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час випалу різних алюмосилікатних систем, і дає розуміння явищ, що відбуваються під час взаємодії стрижневих сумішей на основі Al_2O_3 - SiO_2

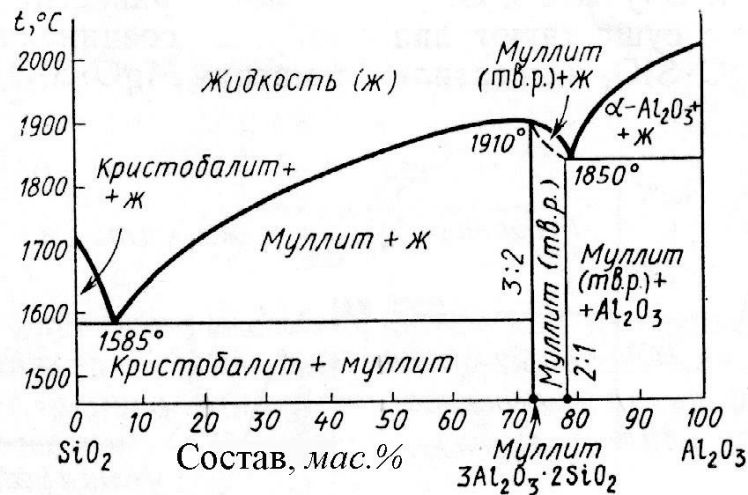


Рисунок 1.1 - Діаграма стану системи Al_2O_3 - SiO_2 [3].

Спикання матеріалів системи Al_2O_3 - SiO_2 у низькотемпературній області є твердофазним. Температура спікання залежить, як зазначалося, від дисперсності та активності вихідних порошків, умов спікання, виду та кількості добавок. Тут часто утворюються малостійкі сполуки, що розкладаються при підвищенні температури. Для них характерна складна стехіометрія, а також наявність областей гомогенності (твердих розчинів).

На діаграмі (рисунок 1.1) є один максимум, що відповідає температурі плавлення муліту, і дві евтектики, утворені цією сполукою з компонентами системи.

Власне, плавлений кварц характеризується дуже низьким КТР ($\sim 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) [4]. Відомо, що під час нагрівання до температур вище $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ у плавленому кварці з аморфною структурою з'являється кристалічна фаза - α -кристобаліт, схильний до поліморфних перетворень зі зміною об'єму. Зазначимо, що це може мати деякий негативний вплив на розмірну точність робочої порожнини лопатки. Водночас розтріскування α -кристобаліту внаслідок поліморфізму в процесі охолодження залитого у форму металу полегшує видалення стрижня обробкою в розплаві біфториду калію або вилуговуванням [5] із затверділого виливка.

У загальному випадку введення плавленого кварцу, що характеризується нижчою, порівняно з електрокорундом, температурою плавлення, зумовить

зниження вогнетривкості та термо-хімічної стійкості матеріалу стрижня до розплаву. Якщо така зміна властивостей стрижня з погляду взаємодії його з металом для пера лопатки, яке швидко твердне, не становить якоїсь небезпеки, то у більш масивних елементів це може стати причиною появи поверхневих дефектів.

Можна вважати, що зменшення вмісту плавленого кварцу в складі до 12-15 %, дасть змогу використовувати прийнятій для всієї номенклатури серійних стрижневих складів режим випалу з максимальною температурою 1350-1370°C, спростивши тим самим обслуговування нагрівального обладнання [5].

Для прискорення процесу спікання, збільшення температури початку деформації та зміцнення керміки в систему $Al_2O_3 - SiO_2$ вводиться карбід кремнію.. У роботах [6, 7] визначено необхідний вміст SiC у межах 1-2% для компенсації розуміцнення через процес кристобалітизації плавленого кварцу та відсутності газової пористості у виливках через його надлишкову кількість.

Для досягнення дрібнокристалічної волокнистої (голчастої) структури в стрижнях, що забезпечує ефект армування матеріалу і підвищення його термостійкості, а також зниження температури спікання, до складу стрижневої суміші додають діоксид титану в кількості 0,3-1,0 %. У роботах [2, 8] зазначено, що доцільно застосовувати більш реакційно-активну (порівняно з рутилом) модифікацію TiO_2 .

На підставі аналізу температурно-часових умов процесу лиття лопаток з рівноосьовою, спрямованою і монокристалічною структурами, а також багаторічного виробничого досвіду сформовано головні вимоги до керамічних матеріалів стрижня і оболонкової форми (таблиця 1.1) [1].

Також потрібно враховувати, що під час кристалізації сплаву керамічна форма і стрижень нагріваються до температур проведення процесу лиття, тому необхідно виконувати вимогу приблизної рівності їхніх КТР, що зменшує деформацію стрижня та знижує брак за різностінністю лопаток .

Таблиця 1.1 - Вимоги до керамічних стрижнів і оболонкових форм для лиття лопаток ГТД, отриманих різними методами [1].

Основні властивості матеріалу	Рівновісне лиття		Спрямована кристалізація		Монокристалічна технологія	
	Керамічний стрижень	Оболонкова форма	Керамічний стрижень	Оболонкова форма	Керамічний стрижень	Оболонкова форма
Вогнетривкість, °С	> 1600	> 1600	> 1650	> 1650	> 1700	> 1700
Стійкість до дії сплавів	Хімічна інертність до жароміцних сплавів					
Усадка під час випалу, %	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0,8	< 0,8
Відкрита пористість, %	38-42	34-37	33-38	29-30	33-38	28-29
Межа міцності при вигині, МПа при: 20°С	12-16	3-8	15-20	15-17	18-25	25-31
1400°С	2,5-4	1,5-4	8-10	-	-	-
1500°С	-	-	2,5-3	3-4	3-3,5	3,5-4
Температура початку деформації, °С (навантаження 0,2 МПа)	1450-1480	1350-1450	1550-1570	1550-1590	1580-1600	1590-1630
Коефіцієнт лінійного термічного розширення, 10 ⁻⁶ , °С ⁻¹ (t=20-1200°С)	4,5-8,5	6,5-8,5	8,5-8,7	8,5-8,7	9-10	9-10
Коефіцієнт теплопровідності Вт/мК (при 1200 °С)	-	1,7-2,1	-	2,2-2,5	-	2,4-3,0
Шорсткість поверхні Ra, мкм	2-5					
Точність геометричних розмірів, мм	±(0,1-0,15)					
Спосіб видалення керамічного матеріалу	У розчинах лугів (відкрита ванна або автоклав низького тиску) і ГДУ*	Механічне	У розчинах лугів (автоклав високого тиску) або розплавах фтористих солей і ГДУ*	Механічне	У розчинах лугів (автоклав високого тиску) або розплавах фтористих солей і ГДУ*	Механічне

*Гідродинамічна установка

1.2. Вибір матеріалів для керамічних стрижнів

У зв'язку з важкими умовами роботи форми під час лиття з тугоплавких металів до вогнетривких матеріалів висувають високі вимоги:

- 1) Висока вогнетривкість;
- 2) Висока хімічна стійкість;
- 3) Не повинні містити елементів, що переходять у розплав;
- 4) Мати мінімальні зміни розмірів при виготовленні, зберіганні та заливці;
- 5) Легко дегазуватися;
- 6) Недефіцитні;
- 7) Безпечні для працюючих;

Залежно від ступеня вогнетривкості ці матеріали поділяють на 3 категорії:

- 1) Вогнетривкі матеріали з вогнетривкістю від 1580 до 1770 °С;
- 2) Високовогнетривкі матеріали з вогнетривкістю від 1770 до 2000 °С;
- 3) Матеріали вищого ступеня вогнетривкості (>2000 °С);

До першої категорії належать вогнетриви на силікатній основі (кварц, силіманіт, форстерит тощо). Для вогнетривів цієї групи характерний високий вміст домішок, які знижують їхню вогнетривкість.

Нині як високовогнетривкі матеріали найширше застосовують оксиди: Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO ; рідше Cr_2O_3 , TiO_2 , CaO , BeO , а також складні оксиди $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ (циркон), $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (муллiт).

Як зазначається в низці робіт [2], дуже хорошими вогнетривкими матеріалами є карбіди ($t_{\text{пл}} \geq 3000 \text{ }^\circ\text{C}$)

Є дані про застосування деяких боридів тугоплавких металів як вогнетривкі матеріали. Бориди - хімічно міцніші сполуки, ніж карбіди. На даний момент найбільш повно досліджені ZrB , TiB , CrB .

Досліди із застосування нітридів не привели до позитивних результатів внаслідок високої крихкості та низької термостійкості.

Вельми перспективним вогнетривким матеріалом вважають тугоплавкі сульфіді. Незважаючи на схильність до окислення за високих температур, тугоплавкі сульфіді вирізняються з-поміж інших сполук винятковою стійкістю щодо розплавлених металів. Нині більшість тугоплавких сполук виробляють в обмеженому обсязі, і вартість їх дуже висока.

Попереднє випробування формувальних матеріалів, що застосовуються в ливарному виробництві, підтвердило, що стрижні, які виготовляються на їхній основі, не можуть бути застосовані для лиття пустотілих лопаток. Стрижні з цих формувальних матеріалів неминуче викликали брак виливків за значними відхиленнями деформації та зміщенням порожнини, за значними відхиленнями розмірів виливків від креслення. Крім того, спостерігався хімічний пригар і низка інших дефектів. Причому в більшості випадків на одному виливку виявлялося кілька видів браку.

Дослідження [9] показали, що вибір складу того чи іншого стрижня залежить від конфігурації виливків і від природи жароміцного металевого сплаву, застосовуваного під час точного лиття. У деяких випадках можуть бути застосовані стрижневі суміші на основі таких матеріалів, як стабілізований (шамотований) попередньо відмучений каолін, стабілізований кремнезем, а також на основі магнезиту, хромомагнезиту і деяких інших вогнетривів, зокрема, на корундовій і муллітокорундовій основі. В інших випадках вибір матеріалу для виготовлення стрижнів виявляється вельми обмеженим. Так, наприклад, для деяких жароміцних сплавів на нікелевій основі позитивні результати досягаються при застосуванні карборундових стрижнів (на основі SiC).

Вибір того чи іншого тугоплавкого оксиду має виходити з низки специфічних умов: наприклад, Al_2O_3 - у разі лиття під вакуумом, MgO - у разі необхідності високого коефіцієнта термічного розширення матеріалу стрижня, у деяких інших випадках виявляється стійким ZrO_2 [1, 4].

Для виготовлення найбільш теплопровідних стрижнів практичний інтерес представляє оксид берилію BeO . Однак слід мати на увазі, що ця сполука є токсичною і потребує спеціальних умов роботи.

Стрижневі суміші на основі тугоплавких порошків значно дорожчі за формувальні матеріали, які зазвичай застосовують у технології лиття. Але в технології точного лиття жароміцних сплавів застосування тугоплавких сипких матеріалів цілком виправдовується у всіх тих випадках, коли застосування дешевших формувальних матеріалів не забезпечує отримання якісних виливків.

У таблиці 1.2 наведено основні матеріали для виготовлення керамічних стрижнів та їхні фізико-хімічні властивості.

Таблиця 1.2 - Основні матеріали для виготовлення керамічних стрижнів та їхні фізико-хімічні властивості

Матеріал		Фізико-хімічні властивості			
		хімічні	$t_{пл}, C$	$\rho, кг/м^3$	Коефіцієнт лінійного розширення, с-1
Оксид алюмінію (Al_2O_3)		амфотерний	2050	3900	$8,6 \cdot 10^{-6}$
Оксид цирконію (Zr_2O_3)			2715	5700	$10 \cdot 10^{-6}$
Оксид берилію (BeO)			2530	3010	$(5,4-8,9) \cdot 10^{-6}$
Оксид ітрію (Y_2O_3)		-	2410	4840	$7 \cdot 10^{-6}$
Оксид магнію (MgO)		основний	2400	3870	$13,5 \cdot 10^{-6}$
Оксид кальцію (CaO)			2570	3370	$9 \cdot 10^{-6}$
Діоксид кремнію (SiO_2)	кристалічний	кислий	1713	2650	$13,7 \cdot 10^{-6}$
	плавлений	кислий	1713	2200	$0,5 \cdot 10^{-6}$

Важливого практичного значення в технології точного лиття набувають й інші, складніші системи на основі оксидів, зокрема шпінель ($MgO-Al_2O_3$) та високожаротривкі силікати - циркон (ZrO_2-SiO_2), мулліт ($3Al_2O_3-2SiO_2$), силіманіт

(Al_2O_3 - SiO_2) та деякі інші. Ці матеріали (за винятком циркону) зазвичай отримують плавленням.

Циркон знайшов застосування як формувальний матеріал під час точного лиття агресивних сплавів на основі заліза. За невисоких температур лиття лопаток на основі нікелевих сплавів (близько 1600°) стрижні можуть також виготовлятися зі стабілізованого кремнезему. Як уже сказано, найкращим формувальним матеріалом на основі SiO_2 в цьому сенсі є плавнений кварц у порошок. Крім перерахованих матеріалів для виготовлення стрижнів можуть бути також використані й деякі інші. Питання про застосування того чи іншого тугоплавкого формувального матеріалу слід вирішувати стосовно конкретного жароміцного сплаву і конфігурації виливків.

Усі розглянуті матеріали є високовогнетривкими, що володіють хімічною інертністю щодо розплавленого металу.

Оксид алюмінію у вигляді електрокорунду володіє: високими механічними властивостями і здатний не втрачати їх до 1600 - 1700°C ; гарним КТР, практично незалежним від температурних впливів; високою теплопровідністю; термічна стійкість залежить від щільності готового виробу, так щільніші володіють низькою термостійкістю, а з великою кристалізацією в 3-4 рази більшою термостійкістю [1]; здатний прореагувати з концентрованими розчинами кислот і з розплавами лугів за високих температур.

Плавнений діоксид кремнію має високі характеристики міцності, найнижчий коефіцієнт термічного розширення; має винятково високу термостійкість; володіє хімічною стійкістю проти кислот, а при підвищенні температури здатний реагувати з лугами. Основна складність у виробництві пов'язана тільки з процесом випалу.

Діоксид цирконію, оксид магнію й оксид кальцію не задовольняють у повному обсязі висунутих вимог.

Діоксид цирконію має високі механічні характеристики. Однак вироби з діоксиду цирконію менш термостійкі. З технологічної точки зору виникає необхідність додаткового стабілізаційного випалу і помелу після випалу. Щільність

діоксиду цирконію більша, ніж у електрокорунду і становить $5,56 \text{ г/см}^3$, що негативно позначиться на седиментаційній стійкості стрижневої суміші.

Оксид магнію має низькі механічні характеристики і низьку термічну стійкість порівняно з електрокорундом. Коефіцієнт термічного розширення досить високий і залежить від температури, і в інтервалі температур від 100 до 1000°C .

Керамічні вироби з оксиду кальцію мають низькі механічні характеристики і високу термодинамічну стійкість. Коефіцієнт термічного розширення досить високий і становить $(10,2-14,5) \cdot 10^{-6}$ в інтервалі температур від 20 до 1400°C . Здатний взаємодіяти з водою і кислотами.

Найперспективнішими з усіх розглянутих матеріалів для виготовлення ливарних керамічних стрижнів є оксид алюмінію (електрокорунд), оксид ітрію і плавлений діоксид кремнію. Недоліком оксиду ітрію є його дефіцитність і висока вартість.

Фізико-механічні властивості матеріалів

Розмірна характеристика зерен вогнетривких порошків. Гранулометричний склад порошків підбирається залежно від розмірів стрижнів і умов лиття.

На подрібнений електрокорунд поширюється ГОСТ 3647-59, що діє в промисловості на абразивні матеріали в зерні.

У ливарному виробництві для виготовлення стрижнів застосовують головним чином шліфпорошки, для виготовлення драйєрів - шліфпорошки і частково шліфувальне зерно, а для виготовлення оболонкових форм - мікропорошки (для першого шару, який контактує з металом) і суміші шліфпорошків зі шліфувальним зерном (для зовнішніх шарів). Для виготовлення тиглів застосовуються переважно шліфувальне зерно і шліфпорошки.

Норми гранулометричного складу вогнетривких порошків. Для практичних цілей необхідно враховувати не тільки номери зернистості порошків, а й коливання їхнього гранулометричного складу.

Оскільки розміри зерен мікропорошків за стандартом можна визначати двома методами (мікроскопічним і фотоелектричним), то і норми вмісту окремих фракцій для цих порошків регламентуються відповідно до застосовуваних методів аналізу.

Питома поверхня вогнетривких порошків. Під час виготовлення керамічних стрижнів слід враховувати не тільки розмір фракцій порошків, але також і їхню питому поверхню. У таблиці 1.3 наводиться порівняння розрахункової та вимірної питомої поверхні електрокорунду кількох номерів зернистості [4].

Як видно, питома поверхня, розрахована за даними гранулометричного складу, що допускається стандартом, коливається для окремих порошків у тим більших межах, чим дрібніший порошок.

Таблиця 1.3 - Питома поверхня в $см^2 / г$ електрокорунду різної зернистості .

Зернистість	Розрахункова	Виміряна
16	71 - 95	79
12	106 - 135	128
10	120 - 164	153
8	138 - 225	224
6	205 - 309	368
3	741 - 1552	1632

Для точного визначення питомої поверхні використовуваних фракцій порошків для стрижневого складу необхідно проводити аналізи проб з кожної новоприбулої партії.

Розподіл сполучної речовини на одиницю поверхні сипучого матеріалу може бути розрахований за формулою [4]:

$$P = \frac{c}{S_0(100-c)} \Gamma/M^2,$$

де С - кількість сполучного в шихті у %; S_0 - питома поверхня електрокорундового порошку в $м^2 / г$.

Характер розподілу сполучної речовини за одного й того самого відсотка вмісту в стрижневій суміші залежно від питомої поверхні останньої наочно видно на рисунку 1.2 [4].

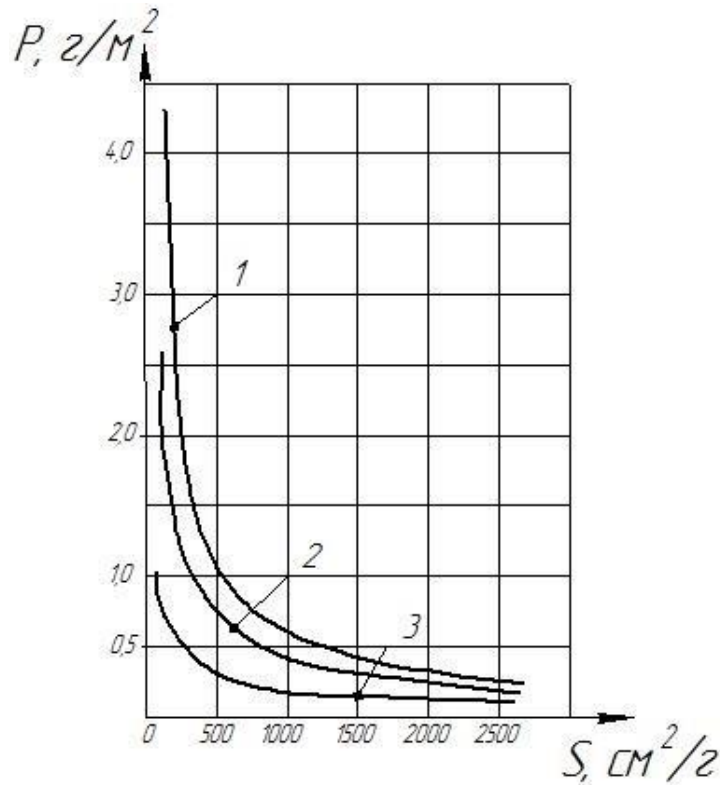


Рисунок 1.2 - Розподіл сполучної речовини на одиницю поверхні сипучого матеріалу різного гранулометричного складу

1 - вміст сполучного 5 %; 2 - те саме, 3 %; 3 - те саме, 1 %.

Дія сполучної речовини найактивніше проявляється в місцях контакту зерен, і роль розподілу зв'язки на одиницю поверхні стрижневої суміші тим значніша, чим більша поверхня контакту зерен або чим вища дисперсність вихідної суміші

Характер розподілу сполучного безпосередньо впливає на міцнісні та інші властивості стрижнів. Тому необхідно крім інших чинників постійно враховувати також і кількість сполучного матеріалу, що припадає на одиницю поверхні стрижневої суміші. При цьому розподіл сполучного матеріалу залежить від способу його введення в суміш порошків, умов змішування та інших технологічних факторів [4].

1.3. Вибір матеріалів технологічної зв'язки

Усі вогнетривкі матеріали, які були розглянуті вище, не мають пластичності. Для формування з порошків непластичних матеріалів їм надають зв'язності шляхом введення технологічних зв'язок. Найбільшого поширення набули технологічні зв'язки органічного складу, що дають змогу зберегти вихідну чистоту кераміки

Параметрами, що характеризують фізичні властивості технологічних зв'язок, є температура плавлення, в'язкість, питома вага, об'ємна усадка, теплоємність, теплопровідність.

За своєю природою і властивостями технологічні зв'язки бувають водорозчинними, розчинними в органічних рідинах, бувають твердими або рідкими, мають природне і синтетичне походження. Як пластифікатор можна використовувати тверді органічні зв'язки, такі як парафін, воски (наприклад, бджолиний віск), церезин, стеарин [4].

Найбільшого поширення у вітчизняному виробництві як пластифікатор набув парафін.

Парафін - речовина білого кольору, що являє собою воскоподібну суміш із твердих вуглеводнів (алканів). Температура плавлення парафіну перебуває в інтервалі від 45 до 65 °С, густина - 808-915 кг/м³. У розплавленому стані має малу в'язкість. Парафін хімічно інертний до більшості хімічних реагентів. Окислюється азотною кислотою і киснем повітря (при 140 °С і вище). Перевагою парафіну є його недефіцитність і низька вартість. До недоліків парафіну можна зарахувати: низьку міцність; температуру розм'якшення - 30 °С; схильність до спінювання в розплавленому стані та до утворення усадочних раковин під час затвердіння. Хімічний склад і властивості парафіну регламентуються ГОСТом 23683-89.

Бджолиний віск являє собою багатокомпонентну речовину від білого до жовто-бурого кольору з медовим запахом. Температура плавлення бджолиного воску становить 62-68 °С. Пластичних властивостей набуває за температури 35°С. Щільність становить 0,955-975 г/см³ за ГОСТом 21179-2000 на бджолиний віск

встановлюється марки та технічні умови. Перевагою бджолиного воску є його натуральність та безпечність, але також має низьку температуру за якої набуває пластичності.

Церезин являє собою воскоподібну речовину, що складається з суміші твердих вуглеводнів, з температурою плавлення 65-88 °С, його густина дорівнює 0,88-0,92 г/см³. У церезину великий коефіцієнт лінійного розширення, так, під час його нагрівання від 20 до 80 °С, об'єм збільшиться на 8-10 %, а залежність від температури не підпорядковується лінійному закону. Церезин не розчиняється у воді, стійкий до впливу лугів і кислот, розчиняється в бензолі. Переваги церезину: має високу температуру розм'якшення і менш схильний до деформації порівняно з парафіном. До недоліків церезину належать: невисока міцність і твердість; низька пластичність і велика лінійна усадка. ГОСТ 2488-79 залежно від температури каплепадіння встановлює такі марки: 65, 70, 75, 80.

Стеарин являє собою тверду напівпрозору речовину з температурою плавлення від 53-65 °С і густиною 0,92 г/см³. Основним недоліком стеарину є його дефіцитність і висока вартість. Марка і технічні умови стеарину (стеаринової кислоти) встановлюються ГОСТом 6484-96.

Залежність зміни в'язкості розглянутих матеріалів зі зміною температури наведено на рисунку 1.3.

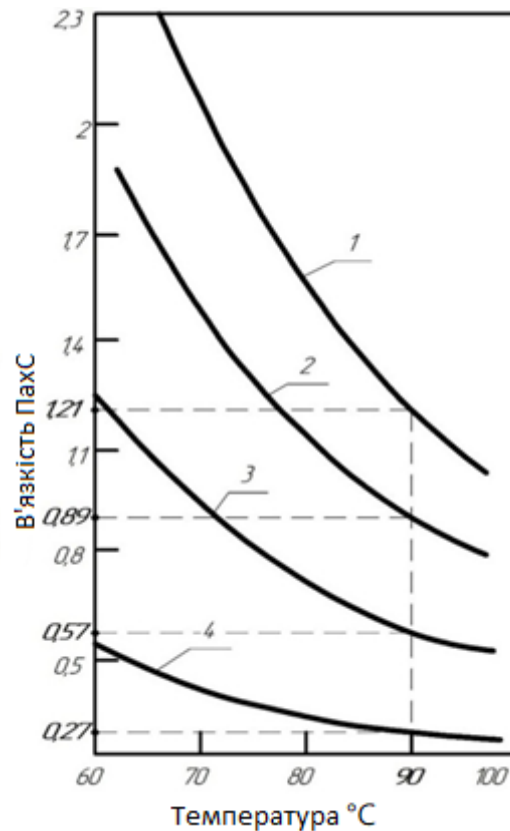


Рисунок 1.3 - Зміна в'язкості термопластичної тимчасової зв'язки від температури:
1-бджолиний віск, 2-цезин, 3-стеарин, 4-парафін

На рисунку 1.4 - представлено залежності зміни в'язкості, ливарної здатності та схильність до розшаровування термопластифікованої стрижневої суміші від вмісту пластифікатора.

Також варто приділити увагу синтетичним модельним масам без наповнювача. Синтетичні модельні маси відрізняються стабілізованими властивостями, наприклад, температурний інтервал затвердіння вузкий, стабільний коефіцієнт термічного розширення, низька усадка, стабільна залежність в'язкості від температури.

Для прикладу розглянемо синтетично модельний склад Remet GTR. За заявою виробника Remet GTR є ненаповненим модельним воском з низькою в'язкістю і відносно низькою температурою плавлення 60-70°C. Відносна густина 0,95 г/см³. Не розчиняється у воді. Умови, яких слід дотримуватися: уникати прямого попадання сонячного світла, температура зберігання нижче 30°C.

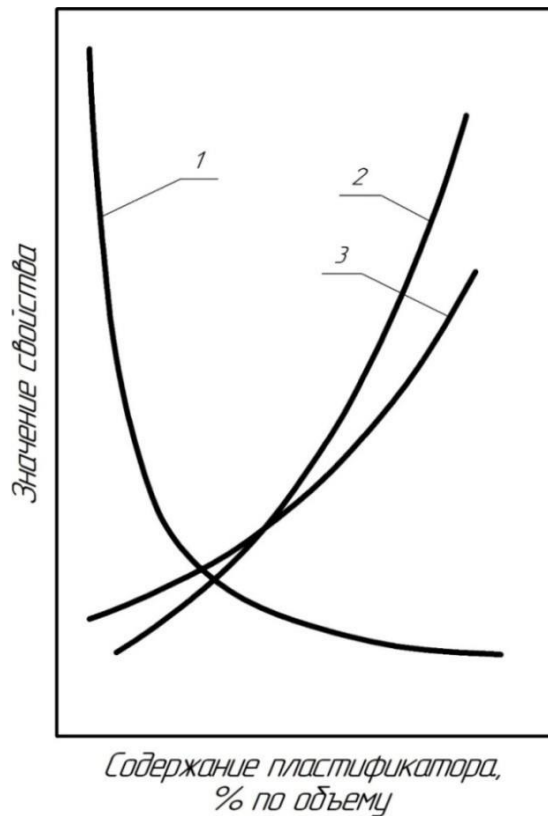


Рисунок 1.4 - Зміна властивостей термопластифікованої стрижневої суміші залежно від вмісту пластифікатора: 1 - в'язкість, 2 - ливарна здатність, 3 - схильність до розшаровування [4].

Для стабілізації та поліпшення деяких властивостей, таких, як в'язкість, ливарна здатність, седиментаційна стійкість стрижневої суміші в розплавленому стані, до складу додатково вводять поверхнево активні речовини (ПАР).

ПАР підвищують поверхневу енергію частинок твердих тіл, унаслідок чого поліпшується їхнє змочування органічними речовинами. У технології технічної кераміки найпоширенішою є олеїнова кислота. Це густа маслоподібна рідина зі щільністю $0,898 \text{ г/см}^3$ і температурою плавлення $16 \text{ }^\circ\text{C}$. Також хорошу поверхневу активність має віск. Іноді його застосовують у суміші з олеїновою кислотою і рідше самостійно. Дозування ПАР зазвичай знаходиться в межах $0,5 \%$ маси керамічного порошку [4].

Парафін, церезин і стеарин мають приблизно однакову густину, а густина бджолиного воску не набагато більша. Відповідно до малюнка 3, найнижчу в'язкість має парафін, трохи більшу за нього стеарин, церезин, а бджолиний віск є найбільш

в'язким. Висока щільність і в'язкість позитивно впливають на седиментаційну стійкість термопластифікованої суміші. Однак висока в'язкість негативно позначається на ливарних здібностях стрижневої суміші. Низька в'язкість також дає змогу знизити відсотковий вміст термопластифікатора в стрижневій суміші, що позитивно позначиться на чистоті керамічного стрижня від домішок, які вносяться через термопластифікатор.

За температурою розм'якшення церезин і бджолиний віск (35 °С) мають кращі характеристики, ніж парафін (30 °С).

Температури плавлення у всіх матеріалів приблизно однакові. Усі матеріали мають крихкість, низьку міцність.

У результаті проведеного аналізу виявили, що парафін, церезин і бджолиний віск є найпридатнішими для застосування як термопластифікатор, але тільки не в чистому вигляді, а з додатковими добавками, які стабілізували б їхні властивості.

Стеарин як термопластифікуючий матеріал не придатний через те, що є дефіцитним матеріалом.

Окремої уваги потребують синтетичні модельні маси без наповнювача. Вони мають вузький інтервал кристалізації та низьку в'язкість, низьку усадку і хороші механічні властивості. Вони потребують ретельного вивчення і є перспективними у використанні.

1.4. Аналіз складів керамічних сумішей

Склади керамічних стрижнів на основі електрокорунду набули широкого застосування. На підприємствах здебільшого використовують корундові керамічні стрижні, які вирізняються високою міцністю, геометричною точністю, термхімічною стійкістю під час високотемпературного заливання у вакуумі виливків із жароміцних сплавів, зокрема турбінних лопаток.

Однак істотними недоліками таких стрижнів є:

- високий коефіцієнт термічного розширення;

- підвищена трудомісткість;
- шкідливі умови праці при видаленні їх з порожнин виливків механічним способом або в агресивних середовищах: плавиковій кислоті, розплаві біфториду калію.

У роботі [10] розглянуто суміш для виготовлення керамічних стрижнів з електрокорундом, меленим пиловидним кварцом, зі збільшеним вмістом кристобаліту 40-50 мас. % і пластифікатора на основі парафіну. Видалення стрижневої суміші здійснювалося методом вилуговування. Цей метод менш трудомісткий, ніж механічне видалення і більш екологічно безпечний, ніж розчинення керамічних стрижнів у біфториді калію або інших агресивних середовищах.

Ця стрижнева суміш має такі недоліки: через вміст β -кварцу не менше 50% стрижні мають недостатню міцність і на етапі випалу, і в період заливки форм металом, оскільки утворюється сітка мікротріщин, бо під час нагрівання дана модифікація кварцу зазнає низки поліморфних перетворень; через високу дисперсність (не менше 19 мас. %) та підвищену питому поверхню (500-600 м² /кг) пиловидного кварцу відбувається велика витрата пластифікатора. Дисперсність призводить до зменшення площі контактів між частинками вогнетривкого наповнювача і, отже, недостатньої міцності в процесі випалювання стрижнів після твердофазного спікання і, як наслідок, поломки стрижнів; високий відсоток дефектних лопаток за різностінністю через невідповідність геометричних розмірів і конфігурації внутрішньої порожнини внаслідок недостатньої термостійкості та об'ємного розширення стрижнів; висока трудомісткість підготовки пилоподібного кварцу, яка полягає в необхідності попереднього прожарювання його до 1300-1350° С протягом 16-24 год.

Стрижні з плавеного кварцу (SiO_2) мають низький коефіцієнт температурного та лінійного розширення, стійкі до впливу металевих розплавів і відносно легко видаляються.

Кераміка на основі плавеного SiO_2 для виготовлення стрижнів формує порожнину лопаток ГТД з жароміцних сплавів. Показано, що в керамічній суміші

може бути присутнім до 40 мас. % спікальних добавок з ряду більш тугоплавких оксидів: $ZrSiO_4$, ZrO_2 , Al_2O_3 .

Деякі стрижні з плавленого кварцу також мають недоліки, пов'язані з низькою міцністю (межа міцності під час вигину зазвичай становить 10,0-12,0 МПа) і мають нестабільні фази основного компонента. Під час високотемпературного спікання плавлений аморфний кварц частково розстеклюється з утворенням α -кristобаліту. При охолодженні α -кristобаліт переходить у β -кristобаліт зі зміною питомого об'єму. Це призводить до утворення макротріщин, різкого зниження міцності і втрати необхідної геометричної конфігурації (викривлення) стрижня. Прийнятні властивості міцності зберігаються за максимального вмісту кристалічної фази, що не перевищує 15-30 об %.

Зниження температури спікання до 1100°C для зменшення або повної відсутності процесу розсклеювання вимагає ускладнення технології їх отримання: просочення колоїдними розчинами оксидів для інтенсивності спікання і зміцнення матеріалу необхідна, а також повторний випал. Крім того, ступінь розсклеювання плавленого аморфного кварцу залежить від домішок, і особливо від лужних або лужноземельних елементів, що активують цей процес.

Також дослідниками отримано стрижневий склад на основі плавленого діоксиду кремнію, до 35 мас. % добавки $ZrSiO_4$, до 5 мас. % ультрадисперсного порошку діоксиду кремнію і від 1,5 до 6,5 мас. % термічно стабільних керамічних волокон. Випал проводився при температурі $1150-1370^\circ\text{C}$. Даний склад дає змогу знизити дефектність керамічних стрижнів при високотемпературному випалюванні завдяки тому, що ультрадисперсний порошок кремнію (0,007-0,014 мкм) активує спікання, а термічно стабільні керамічні волокна знижують усадку і утворення макротріщин при випалюванні. Недоліком суміші є застосування високотоксичних речовин. Ультрадисперсні порошки та керамічні волокна спричиняють професійні, зокрема онкологічні, захворювання органів дихання.

Технічним результатом винаходу [11] є розробка стрижневої суміші для виготовлення керамічних стрижнів, що мають високу міцність, низьку лінійну усадку у процесі випалу, інертність до жароміцних сплавів, гарну розчинність у

водних розчинах лугів. Як спікальну добавку використано порошок зі сполук із ряду сіалонів $Si-Al-O-N$, а також $La_2 O_3$, LaB_6 . Також суміш містить від 5 до 30 мас.% $Cr_2 O_3$ та/або $Al_2 O_3$, що збільшує кінетичну стабільність аморфного кварцу щодо фазоподілу і розклеювання, підвищує його вогнетривкість і опір повзучості. При випалюванні суміші утворюються кристобаліт, муліт і $\alpha-Al_2O_3$, які зв'язують частинки твердого розчину на основі плавленого кварцу і сприяють отриманню стрижнів точної форми з високим виходом придатного. Проте, недоліком даної стрижневої суміші також є недостатня міцність.

Висновки до розділу

1. Розглянуто та проаналізовано різні склади стрижневих сумішей і основних матеріалів, що застосовуються як базовий наповнювач, показано, що для складнопрофільних і тонкостінних лопаток ГТД, які отримують із жароміцних нікелевих сплавів, перевагу слід віддати вогнетривким наповнювачам з електрокорунду і плавленого кварцу.
2. Розглянуто вплив матеріалів на властивості стрижневої суміші, зокрема зниження температури спікання при збереженні міцності та геометричних показників.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методика визначення межі міцності та прогину під час вигину

Межу міцності (σ_H) і стрілу прогину (f) зразків зі стрижневих матеріалів визначали випробуванням зразків-пластин розмірами 70x20x4 мм під час зхточкового статичного вигину згідно з ГОСТ Р 50523-93. У процесі експерименту навантажувальне зусилля F прикладали перпендикулярно до поверхні прямокутного зразка (рисунок 2.1), розташованого на двох призматичних опорах з відстанню між ними 60 мм (рисунок 2.2).



Рисунок 2.1 - Зовнішній вигляд зразка для термомеханічних випробувань

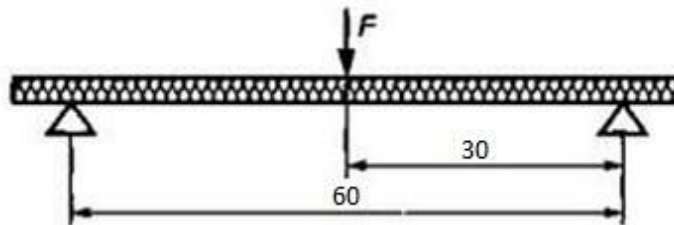


Рисунок 2.2 - Схема випробування зразка під час вигину

Межу міцності σ з використанням отриманих експериментальних даних розраховували за формулою:

$$\sigma_x = \frac{M}{W_x}, \text{ МПа,}$$

де M - згинальний момент, МН-м; W_x - осьовий момент опору перерізу, м³.

Величини згинального моменту M і осьового моменту опору W_x за заданих значень згинального навантаження F , відстані між опорами L , ширини b і товщини h зразка визначали за відомими формулами.

Зразки піддавали випалу за температур 1250 і 1360°C протягом 5 год.

Випробування термомеханічних властивостей стрижневих матеріалів проводили на установці INSTRON 5982 (рисунок 2.3), що дає змогу визначати межу міцності і прогин під час 3-х точкового вигину зразків в інтервалі 20-1200°C із реєстрацією швидкостей навантаження і деформації зразків на самописних електронних приладах.

Визначення термомеханічних властивостей зразків проводили за температур 20, 800, 1000 і 1200°C.

Зазначимо, що для зниження впливу термоудару, завантаження зразка в піч здійснювали при температурі в ній не більше 600°C. Подальше нагрівання зразка до більш високих температур випробування (понад 600°C) здійснювали вже безпосередньо з піччю.



Рисунок 2.3 - Зовнішній вигляд установки для дослідження термомеханічних властивостей

Після витримки в заданих умовах протягом 30 хв з метою вирівнювання температури за перерізом зразка його при піднятому навантажувальному стрижні поміщали на призми опори. Потім стрижень акуратно опускали вниз до зіткнення його клиноподібного наконечника з поверхнею зразка, після чого здійснювали навантаження зразка зі швидкістю 5 Н/с.

Деформацію зразка при вигині в часі визначали електронним індикатором, що виводить дані на електронний носій.

Розміри зразків, що використовуються під час розрахунків, вимірювали за допомогою мікрометра з похибкою, що не перевищує 0,01 мм.

Розкид даних окремих випробувань не перевищував 5-10 % від середнього.

2.2 Методика визначення відносної усадки під час випалювання

Величину відносної усадки (в %) при випалюванні визначали з виразу:

$$v\% = \frac{l_n}{l_k} \cdot 100\%$$

де l_n і l_k - відповідно початкова і кінцева величина деякої розмірної характеристики зразка: довжини (Д) і ширини (Ш).

Для вимірювання розмірів зразка використовували вимірювальний інструмент з абсолютною похибкою не більше 0,01 мм.

2.3 Методика визначення уявної пористості

Визначення уявної густини і відкритої пористості стрижневих матеріалів проводили методом гідростатичного зважування відповідно до ГОСТ 2409-2014.

Для досліджень використовували зразки, вирізані з пластин для механічних випробувань.

Відповідно до методики експерименту необхідно:

-висушити зразок протягом 2 год за температури 110°C-135°C до постійної маси;

- охолодити зразок до кімнатної температури;
- визначити масу сухого зразка на аналітичних вагах з абсолютною похибкою не більш як $\pm 0,01$ г;
- завантажити зразок у вакуумну шафу і вакуумувати його протягом 15 хвилин;
- витягти зразок із шафи, помістити його в склянку, залити склянку дистильованою водою так, щоб рівень рідини над зразком був не менше 20 мм;
- встановити склянку зі зразком на електричну плиту і нагріти воду до кипіння. Витримати зразок у киплячій воді протягом 30-40 хвилин;
- перенести зразок у холодну дистильовану воду і витримати протягом 5 хвилин;
- витягти зразок зі склянки і виконати його зважування в стані, коли він повністю занурений у дистильовану воду (гідростатичне зважування відповідно до схеми, показаної на рисунку 2.4;
- витягти зразок із води, осушити його поверхню фільтрувальним папером і зважити на аналітичних вагах із точністю 0,01 г.

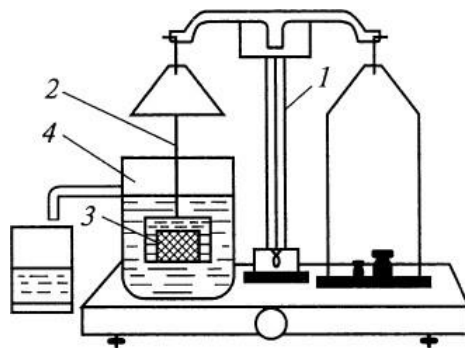


Рисунок 2.4 - Гідростатичні ваги для визначення водопоглинання, уявної густини та відкритої пористості: 1 - ваги; 2 - підвіски; 3 - випробовуваний об'єкт; 4 - склянка зі зливною трубкою

Величину уявної (відкритої) пористості визначали з використанням отриманих даних із виразів:

$$\Pi_{\kappa} = \frac{m_1 - m_0}{m_1 - m_2} \cdot 100\%$$

де m_0 - маса сухого зразка, кг; m_1 - маса зразка, насиченого водою, кг; m_2 -

маса зразка у воді (отримана гідростатичним зважуванням), кг.

Уявну густину визначали за формулою:

$$\rho_{\text{вж}} = \frac{m_0}{m_1 - m_2} \cdot \rho_{\text{в}}$$

Густина дистильованої води за 20°C була, відповідно до [11], була прийнята такою, що дорівнює 998 кг/м³.

Загальну пористість визначали за формулою

$$\Pi_0 = \frac{\rho - \rho_{\text{вжж}}}{\rho} \cdot 100\%$$

Істинну густину матеріалу розраховували за формулою:

$$\rho = \frac{m_0}{m_2 + m_0 - m_1} \rho_{\text{ж}}$$

Тоді закрыта пористість легко знаходиться з виразу:

$$\Pi_3 = \Pi_0 - \Pi_{\text{к}} .$$

2.4. Методика визначення шорсткості поверхні зразків

Параметри шорсткості поверхні зразків можна визначати за стандартною методикою на профілографі (рисунок 2.5). Базова довжина вимірювання, з урахуванням передбачуваної якості поверхні зразків дорівнює 2,5 мм.



Рисунок 2.5 - профілограф АБРІС-ПМ7

Зразок встановлюється в затиск профілографа. На нього встановлювали датчик і проводили вимірювання з точністю до 0,1 мм.

2.5. Методика визначення термічного розширення

Експериментальне визначення термічного розширення проводилося на горизонтальному оптичному дилатометрі (рисунок 2.6). Для досліджень застосовували зразки розмірами 5x3-5x20 мм, вирізані зі зразків для термомеханічних випробувань.



Рисунок 2.6 - Зовнішній вигляд оптичного дилатометра MISURA® ODLT термічного розширення

Зразок у печі розміщували горизонтально при кімнатній температурі та здійснювали нагрівання до 1500°C зі швидкістю 30 °C/хв. При цьому зразки освітлювали двома паралельними пучками блакитного світла з довжиною хвилі 478 нм (рисунок 2.7). Дві довгофокусні цифрові камери реєстрували зображення зразка з кожного боку з точністю до кількох сотень часток мікрона. Одночасне вимірювання з двох боків зразка двома світловими пучками без контакту зі зразком забезпечувало абсолютне вимірювання довжини.

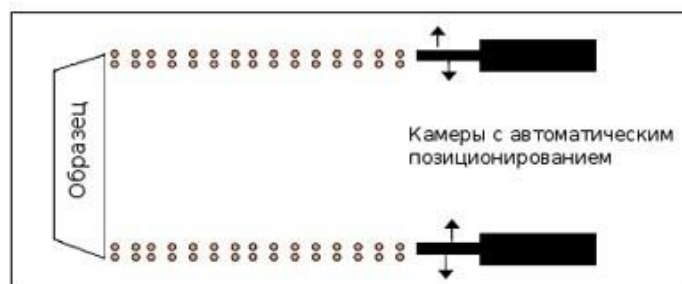


Рисунок 2.7 - Принципова схема цифрової камери дилатометра, що реєструє зображення зразка

2,6. Методика виготовлення суміші та зразків для дослідження

Порошки електрокорунду 50-120 мм просушували при температурі 350-450°C не менше 3 годин. Після чого електрокорунд просівали через сито 0,16-1,0.

Свіжий глинозем перед використанням обробляли розчином соляної кислоти: заливали розчином соляної кислоти з водою (з розрахунку 150 мл кислоти густиною 1180-1190 кг/м³ на 10 літрів води); витримували до повного змочування глинозему не менше 2 годин.

Оброблений глинозем розкладали в керамічні коробки та прожарювали при температурі 1330-1400°C у печі протягом 10-12 годин. Далі його просіювали через сито 0,6-1,0.

В якості пластифікатора застосовували парафін - 90-93% та поліетилен - 7-10%.

Процентне співвідношення парафіну, поліетилену брали за масою в грамах. Завантажували в конвертор парафін (рисунок 2.8) з алундовими кулями у співвідношенні 3:1 (маса парафіну до алундових куль), вмикали обігрів і обертання конвертора. При досягненні температури парафіну до 110-130°C у розплавленій парафін вводили невеликими порціями поліетилен. Після чого піднімали температуру розплаву до 140-160°C і витримували при цій температурі протягом 1-1,5 годин до повного розчинення поліетилену. Після чого пластифікатор зливали через сито і зберігали у вигляді шматків у закритій тарі.



Рисунок 2.8 - Конвертор для приготування пластифікатора

Для приготування стрижневої суміші в конвертор з кулями завантажували суміш порошків першого та другого порядку у співвідношенні 1:2 (маса куль до маси порошків відповідно). Вмикали обігрів конвертора і перемішували порошки за температури 95-100°C протягом 1 години.

Паралельно в інший конвертор завантажували задану кількість пластифікатора, нагрівали до температури 110-120°C; потім додавали задану кількість порошку третього і четвертого порядку, перемішували протягом 5-10 хвилин.

Після підвищували температуру до 110-130°C, завантажували совком суміш підігрітих порошків і перемішували протягом 45-60 хвилин до отримання однорідної маси (співвідношення ваги куль до ваги стрижневої маси 1:1).

Готову масу зливали на водоохолоджуваний стіл через сито 2,0-5,0, розрізали на шматки розміром 50x50 і висотою 15-20 мм.

Заготовки зразків для досліджень виготовляли у пресформах (рисунок 2.9) на гідравлічному пресі за тиском 1,5 МПа з температурою 75-90°C. Після чого зразки зачищали.

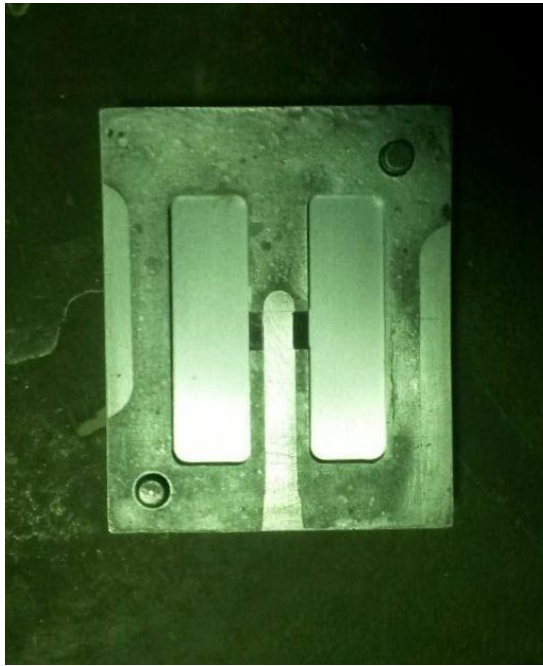


Рисунок 2.9 - Зовнішній вигляд пресформи для виготовлення зразків

У вогнетривкий короб насипали шар порошку обпаленого глинозему завтовшки близько 30 мм, після чого його встановлюють на вібратор. Включався вібратор і проводилося ущільнення глинозему протягом 1-2 хв при частоті коливань 70-100 Гц і амплітуді 2-3 мм. Потім зразки (рисунок 2.10) не допускаючи деформації, бо він є сирими, занурювали в порошок глинозему із подальшою його обсіпкою шаром 30-50 мм. Після цього ущільнювали вібрацією на вібростолі протягом 1,5-2 хв і відправляли короб із зразками на випал.

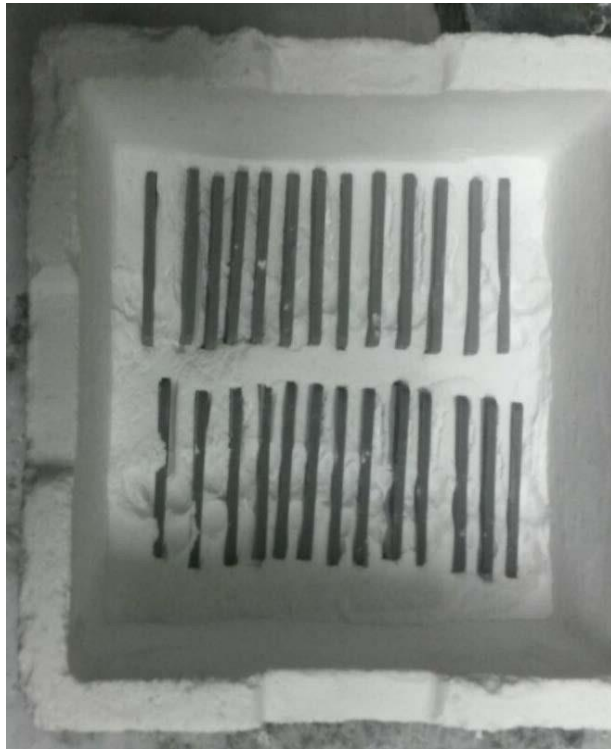


Рисунок 2.10 - Зразки, укладені в короб, перед випалюванням

Випал проводили за температурою 1350-1370°C та 1240-1260°C.

Після охолодження до кімнатної температури зразки витягували з коробів і обдували стисненим повітрям з метою очищення від залишків глинозему.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ СУМІШІ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТРИЖНІВ

3.1. Обґрунтування складу стрижневої суміші

Поряд з хімічним складом, фізико-хімічні властивості стрижня істотно залежать і від фракційного складу стрижневої суміші. Незважаючи на значний прогрес у технології та засобах виробництва литих лопаток ГТД, брак у ливарних цехах все ще значний. Під час лиття охолоджуваних робочих лопаток турбіни він досягає 30-50 %. Брак з'являється через викривлення стрижня, зсув і поломку в процесі прожарювання форми і заливки її сплавом.

Однією з причин викривлення стрижня є неоптимальне співвідношення фракційного складу стрижневої суміші, розподіл тонкої та грубої фракцій у порожнині прес-форми після запресовування, що, своєю чергою, також призводить до підвищеної пористості та низьких механічних властивостей.

Відмінною особливістю фракційного складу стрижнів є наявність каркасоутворювальних фракцій. Крім того, під час формування фракційного складу стрижнів не стоїть завдання забезпечення максимальної щільності, а необхідно забезпечити геометричну розмірну точність і стабільність, мінімальну усадку і стійкість до викривлення.

Каркасоутворювальними фракціями в стрижні є порошки F 120 (120 мкм) і F100 (100 мкм). Вони формують конструкцію стрижня, безпосередньо стикаючись один з одним у геометрично правильному порядку, причому деформація частинок порошків не відбувається. Від цих фракцій залежить розмірна стабільність, схильність до усадки і викривлення стрижня, максимально можлива об'ємна частка дисперсної фази.

Друга група фракцій заповнює пори, що утворилися порошками 120 мкм і 100 мкм, і надає стійкості цій конструкції. Для підвищення стійкості цієї конструкції необхідно заповнити ці пори не тільки дрібними фракціями, а й фракціями різних розмірів.

Призначення третьої групи дрібної фракції полягає в тому, щоб заповнити дрібні пори, утворені другою групою фракції, і забезпечити необхідну шорсткість поверхні.

Зі сказаного випливає важливість розгляду послідовності формування фракційного складу порошків для стрижневої суміші.

У таблиці 3.1 наведено результати змін розраханкового об'єму пор під час формування стрижня залежно від щільності пакування та розміру частинок порошків, що застосовуються для стрижневих сумішей. Порівняння розмірів порошків і пор дає змогу визначити розмірний гранулометричний склад стрижневої суміші.

Таблиця 3.1 - Параметри пор, утворених порошками фракцій дослідного стрижневого складу, і розміри частинок порошоків стрижневих складів.

Розмір поршків стрижня, мкм	Максимальний діаметр пор, мкм	Розмір порошоків стрижневої суміші, мкм								
		75	63	50	40	30	20	14	5	3
120	49,7	-	-	-	+	+	+	+	+	+
	26,96	-	-	-	+	+	+	+	+	+
	18,564	-	-	-	-	-	+	+	+	+
100	41,47	-	-	-	-	-	+	+	+	+
	22,47	-	-	-	-	-	-	+	+	+
	15,47	-	-	-	-	-	-	+	+	+
40	16,56	-	-	-	-	-	-	+	+	+
	8,96	-	-	-	-	-	-	-	+	+
	7,06	-	-	-	-	-	-	-	+	+
30	12,42	-	-	-	-	-	-	-	+	+
	6,72	-	-	-	-	-	-	-	+	+
	5,29	-	-	-	-	-	-	-	+	+
10	8,28	-	-	-	-	-	-	-	+	+
	4,48	-	-	-	-	-	-	-	+	+
	3,533	-	-	-	-	-	-	-	-	+
7	5,796	-	-	-	-	-	-	-	-	+
	3,136	-	-	-	-	-	-	-	-	+
	2,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	2,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1,242	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,672	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,529	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Під час формування стрижневої суміші каркасоутворювальними фракціями 120 і 100 мкм утворюються пори з максимальним розміром 49,7 мкм і 41,47 мкм відповідно. Отже, порошки з розмірами частинок 75, 63 і 50 мкм (таблиця 3.1) не зможуть заповнити ці пори. Використання цих фракцій сприятиме формуванню

неоднорідної каркасної гранулометричної структури стрижня та нерівномірній її усадці, що сприятиме викривленню стрижня. Тому ці фракції виключені із дослідної стрижневої суміші [12].

Досліджено три варіанти гранулометричного складу для стрижневої суміші, що відповідають мінімальній частці кристалічної структури пакування (неущільнена суміш) - варіант 1, малій частці кристалічної структури пакування (гексагональна плотноупакована та гранецентрована кубічна упаковка ГПУ+ГЦК ~ 20 %) - варіант 2, максимально можливій частці кристалічної структури пакування (ГПУ+ГЦК понад 80 %) - варіант 3 (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Первинні варіанти фракційного складу стрижневої суміші за [1].

	Фракційний склад порошків, мкм	Масовий вміст фракцій, %		
		вар.1	вар.2	вар.3
велика фракція	120	66.36%	68.70%	73.62%
	100			
середня ГЦК	40	12.28%	11,68%	10.31%
	30			
середня ГПУ	10	12.28%	11,68%	10.31%
тонка фракція, що переміщається	7	9.08%	7.94%	5.77%
	5			
	3			

З таблиці 3.2 впливає певна закономірність: з підвищенням щільності пакування підвищується відсоткова частка крупної каркасоутворювальної фракції з 66 % до 74 % і зменшується частка середньої та дрібної фракції відповідно з 12,3 % до 10,3 % і з 9,1 % до 5,8 %.

Оптимізація гранулометричного складу з обраними фракціями проводилася з використанням програми Excel. Параметрами оптимізації під час складання матриці планування експериментів було обрано: межу міцності під час вигину і КТР.

Для першої серії дослідів було складено матрицю планування типу 2^{4-1} (Таблиця 3.3). Як варійовані фактори були обрані Al_2O_3 , SiO_2 , SiC, TiO_2 .

Таблиця 3.3 - Матриця планування дробового факторного експерименту

Фактори	Al_2O_3	SiO_2	SiC	TiO_2	σ_B	КТР
Основний рівень	80	16	1,5	1		
Інтервали варіювання	+5 -5	+2,5 -2,5	+0,5 -0,5	+0,5 -0,5		
№ дослідів	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
1	1	1	-1	-1	18,30	8,40
2	-1	-1	-1	-1	19,10	9,00
3	1	-1	-1	1	28,20	9,10
4	-1	1	-1	1	23,50	8,30
5	1	1	1	1	38,10	8,30
6	-1	-1	1	1	23,40	8,50
7	1	-1	1	-1	31,60	8,70
8	-1	1	1	-1	18,40	7,80

Порівнюючи вихідний гранулометричний склад стрижневої суміші (таблиця 3.4) та оптимізований (таблиця 3.5), впливає, що у вихідному гранулометричному складі відсотковий вміст каркасоутворювальних фракцій (120 і 100) мкм становить 25 %, середніх фракцій (40-30) мкм - 62,5 % і дрібних фракцій (10-7, 5-3) - 5 % [13].

Таблиця 3.4 - Початковий гранулометричний склад

Початковий гранулометричний склад m %					Об'ємний зміст
	Al O ₂₃	SiO ₂	SiC	TiO ₂	(m) %
120	11.25	1.25			12.5
100	11.25	1.25			12.5
40	31.25	3,75			31.25
30	31.25	3,75			31.25
10			1		1
7			1		1
5		1.25			1.25
3		1.25		0.5	1.75
Хім. склад	85%	12,5%	2%	0,5%	100%

Таблиця 3.5 - Оптиміальний гранулометричний склад

№	D, мкм	V%	M% Al ₃ O ₂	M% SiO ₂	M% SiC	M% TiO ₂	Об'ємний вміст m,%
1	120	7.2604519	11,5%	2,5%	0.0%	0.0%	14%
2	100	15.399485	25,5%	6,8%	0.0%	0.0%	32,3%
3	40	8.1029834	12%	0.0%	0.0%	0.0%	12%
4	30	21.097742	36 %	0.0%	0.0%	0.0%	36%
5	10	5.3403148	0.0%	0.0%	1%	0.0%	1%
6	7	4.4290232	0.0%	0.0%	1%	0.0%	1%
7	5	6.202866	0.0%	1.4%	0.0%	0.0%	1.4%
8	3	8.279603	0.0%	1,8%	0.0%	0.5%	2.3%
хім. склад:		76.11232	85%	12,5%	2%	0.5%	100.0%

В оптимізованому гранулометричному складі вміст цих фракцій відповідно становить 46,3 %, 48 %, 5,7 %. З порівняння даних вихідного та оптимізованого

складів впливає, що відбулося відсоткове підвищення каркасоутворювальних фракцій на 21,3 %, зменшення кількості середніх фракцій на 14,5 % і незначне підвищення дрібних фракцій з 5 % до 5,74 %. За рахунок цих змін підвищилася щільність структури дослідного стрижня і склала 76 ± 1 %. Обсяг пор становить 24 ± 1 %.

Оптимальне співвідношення фракційного та компонентного складів стрижневої суміші дало змогу знизити порожнистість каркасоутворювальних фракцій стрижня, що позитивно вплинуло на структуру, підвищення фізико-механічних властивостей, зменшило усадку і викривлення та підвищило стабільність розмірів.

Виходячи з результатів проведеного теоретичного аналізу, запропоновано новий стрижневий склад: $\text{SiO}_2 = 11-13$ %; $\text{SiC} = 1-2$ %, $\text{TiO}_2 = 0,5-1$ %, решта Al O_{23} і легкоплавкий пластифікатор на основі парафіну з поліетиленом 10-16 % понад 100 % [13]. За вирахуванням відсоткового співвідношення пластифікатора, який вигорає під час прожарювання, оптимальна щільність пакування становитиме 60-65 % або 0,6-0,65.

В оптимізованому гранулометричному складі вміст каркасоутворювальних фракцій відповідно становить 46.3 %. Друга група фракцій, яка заповнює пори, сформовані порошками 120 мкм і 100 мкм, і надає стійкості конструкції стрижня (порошки 30-40 мкм) - 48 %. Третя група фракцій, яка має заповнити дрібні пори, утворені другою групою фракцій, і забезпечити необхідну шорсткість поверхні стрижня (порошки 3-10 мкм) - 5,7 %. За рахунок оптимізації фракційного складу підвищується щільність структури і геометрична стабільність стрижня.

Коефіцієнт термічного розширення оптимізованої стрижневої суміші становив $7,8-8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Показниками для порівняння із серійною сумішшю слугували: міцність зразків під час вигину, усадка розмірів зразків від номінальних, що характеризують геометричну точність стрижнів, коефіцієнт термічного розширення і глибина взаємодії з жароміцним сплавом ЖС6У.

3.2 Дослідження фізико-хімічних і механічних властивостей суміші

У попередньому розділі, розглянувши оптимальні хімічні та гранулометричні склади, теоретично виявили шість основних складів, які, ймовірно, мають задовольняти вимоги, що висуваються до розроблюваних нових стрижневих сумішей (таблиця 3.6).

Перші чотири суміші підбирали з умови теоретичної відповідності хімічному складу, для отримання необхідних властивостей. Наступні два склади були скориговані з урахуванням вимог до фракційного і хіміко-мінералогічного складу. З цих сумішей було виготовлено зразки, які досліджували на міцність при вигині, пористість, шорсткість, лінійну усадку, коефіцієнт термічного розширення, фазовий склад.

Таблиця 3.6 - Склади стрижневих сумішей

№№ п/п складів	№№ п/п зразків	Матеріали основи, у % за масою											Пластифікатор, понад 100%		Режим випалу			
		Електрокорунд (фракції)						Кварц плавлений					SiC	Інші добавки	ПП7	ПП10	температура, °С	Час витримки, год
		F1200 3-5 МКМ	F500 1420 МКМ	F280 3040 МКМ	F240 4050 МКМ	F220 6375 МКМ	F120 100120 МКМ	F280 3040 МКМ	F120 100120 МКМ	F230 4563 МКМ	F1200 3-5 МКМ	F800 7-10 МКМ						
1	1				52,5	24	21					2,5			15-17	1350-1370	8-10	
2	2	5	25	40			25						АСД-4 5	15		1350-1370	8-10	
3	3	5	40	25					25		4	1		18		1350-1370	8-10	
	4	5	40	25					25		4	1		18		1240-1260	5	
4	5			75				20				5		20		1350-1370	8-10	
	6			75				20				5		20		1240-1260	5	
5	7a			47,5			37		9,5		3,5	2	TiO2 - 0.5	16		1240-1260	5	
	7б			47,5			37		9,5		3,5	2	TiO2 - 0.5	16		1350-1370	8-10	
6	8a			50			30	5		15				15		1240-1260	5	
	8б			50			30	5		15				15		1350-1370	8-10	

3.2.1 Дослідження граничної міцності зразків під час вигину

Дослідні дані щодо температурних залежностей межі міцності та прогину під час вигину зразків перших 4 досліджуваних матеріалів показано на рисунках 4.5-4.8.

Виявлено, що електрокорундові зразки з мінералізаторами (SiC, АСД-4), прожарених за 1350°C (номери зразків 1 і 2, таблиця 3.6, рисунок 3.1), мають необхідні для забезпечення заданої розмірної точності лопаток міцнісні характеристики, тобто не менше, ніж 15 МПа (150 кгс/см²). Аналогічний висновок може бути зроблено і щодо зразків, що містять 20-25% плавленого кварцу, прожарених за 1250°C (зразки 4,6, рисунок 3.2).

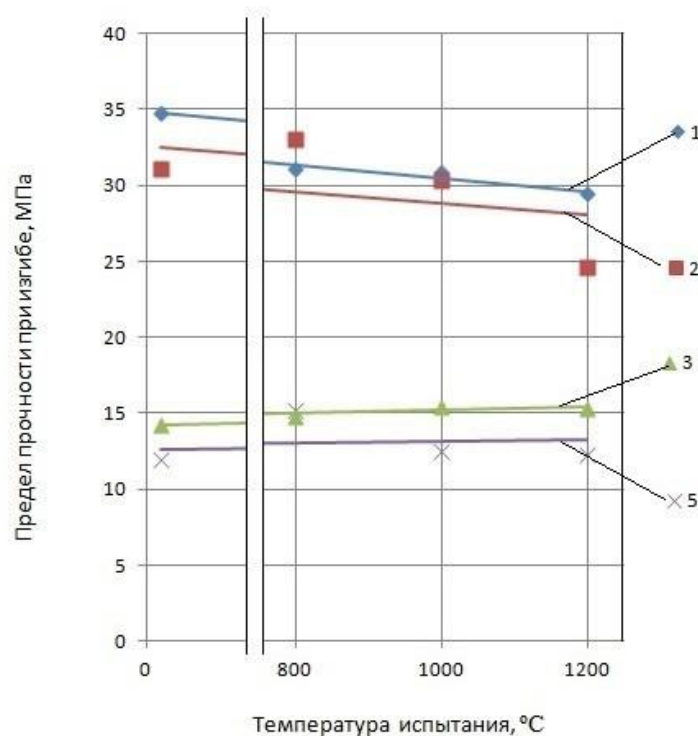


Рисунок 3.1 - Межа міцності при вигині зразків (випал за 1380°C): цифри біля кривих - номери складів за таблицею 3.6

Водночас підвищення температури прожарювання останніх до 1350°C (зразки 3,5, рисунок 3.1) призводить до їх різкого знеміцнення. Це можна пояснити тим, що в плавленому кварці в інтервалі температур 1200-1350°C інтенсифікуються процеси розсклеювання (кристалізації). Кристалічна фаза, що з'явилася за високих температур, за подальшого охолодження зазнає

низки поліморфних перетворень із великими об'ємними змінами, що призводить до розтріскування зразка, яке супроводжується втратою міцності.

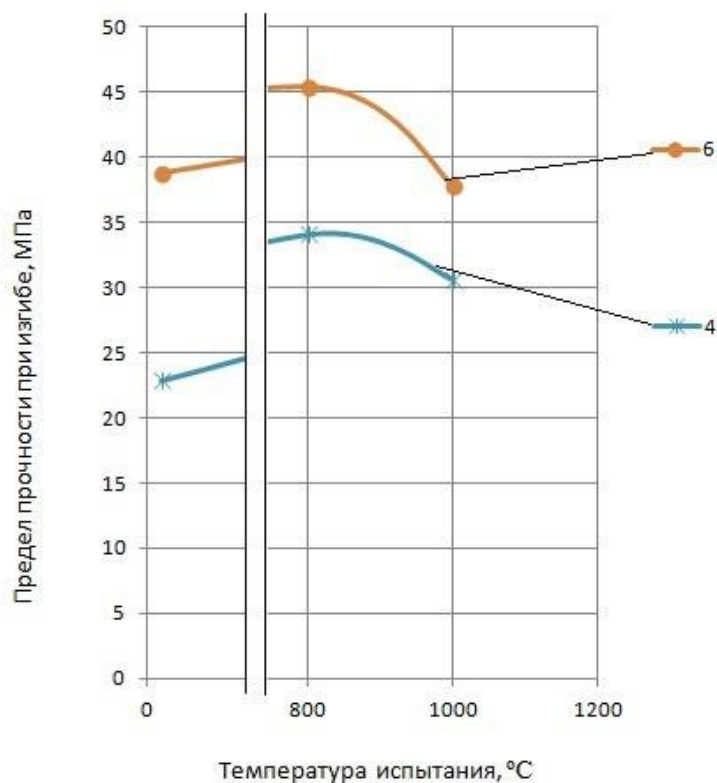


Рисунок 3.2 - Межа міцності при вигині зразків (випал при 1250°C): цифри - номери складів за таблицею 3.6

Прогин усіх досліджуваних матеріалів до температур випробування 1000°C не перевищує 0,2-0,25 мм (рисунок 3.3). Зі збільшенням температури випробування до 1200°C деформація зразків зі складів 2,3,5 незначно зростає (до 0,4-0,9 мм) і найбільш помітна у зразка зі складу 1 (до 3,3 мм).

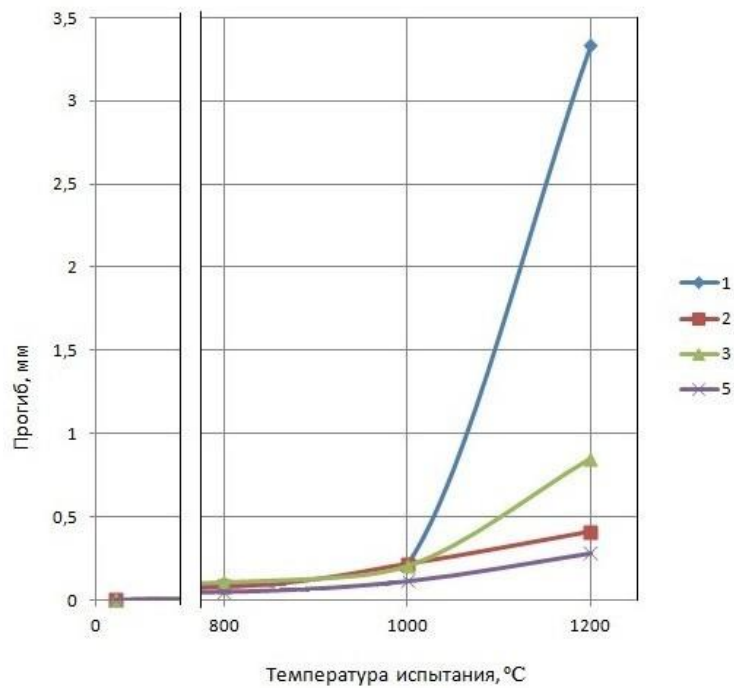


Рисунок 3.3 - Прогин зразків (випал при 1380°C)

Зазначимо, що зразки 4 і 6, які містять у складі 25 і 20 % за масою плавленого кварцу, також мають до 1000°C вельми малу деформацію (0,2-0,25 мм) до руйнування (рисунок 3.4). Підвищення температури випробування цих зразків до 1200°C призводить до втрати ними здатності чинити опір діючим навантаженням, і вони пластично деформуються без руйнації. Тому на температурних залежностях прогинів не відображені точки, які стосуються 1200°C.

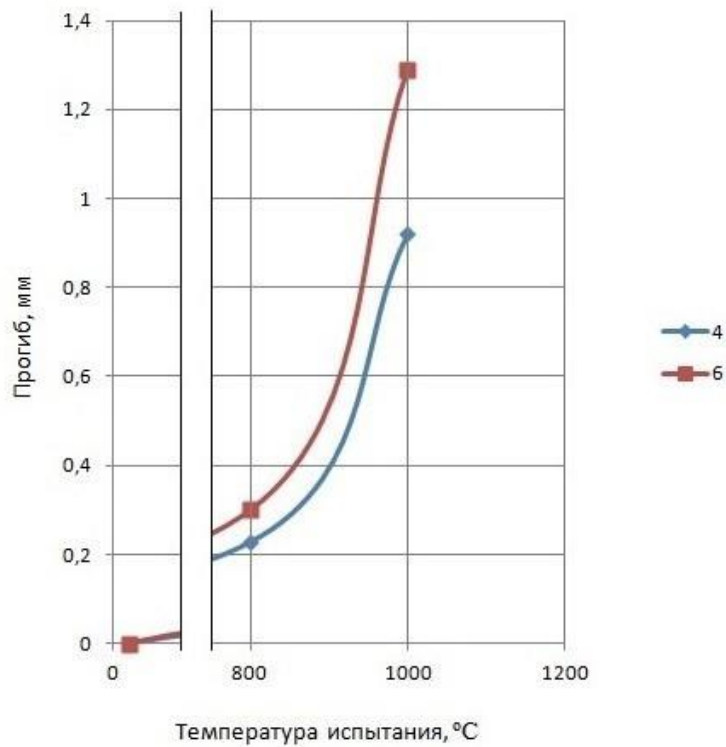
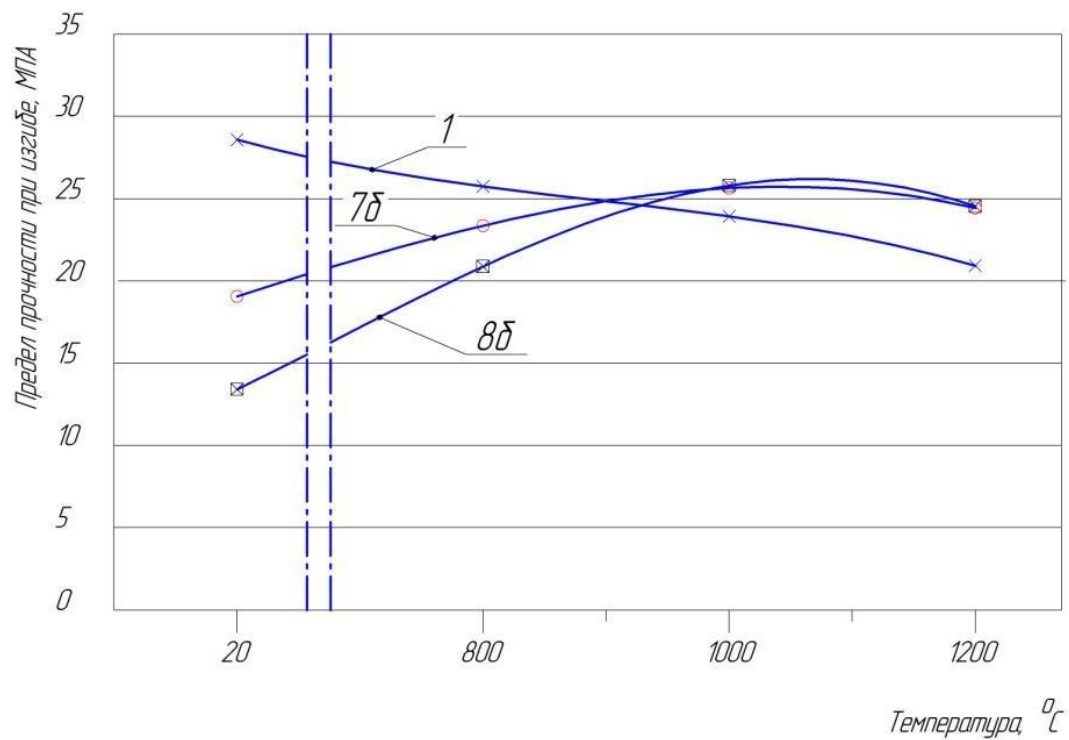


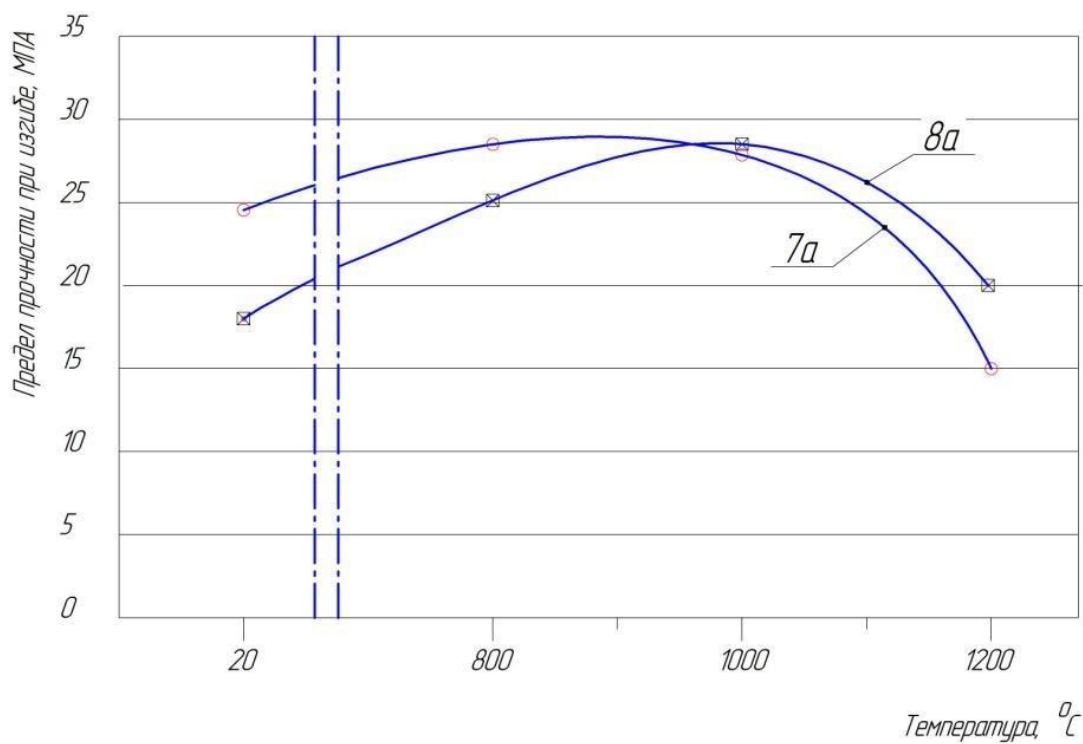
Рисунок 3.4 - Прогин зразків (випал при 1250°C)

Можливою причиною такої податливості зразків є поява в матеріалі за температур вище 1050-1100°C відносно легкоплавких алюмосилікатів лужних металів, що можуть бути наявні, хоча й у невеликих кількостях, у компонентах оболонкової форми, а саме, в обсіпному матеріалі - електрокорунді та у сполучному - кремнезолі, з огляду на особливості технології їх виробництва. При збільшенні температури до зазначених значень вони активно взаємодіють з Al_2O_3 і SiO_2 з утворенням плавнів.

Дослідні дані щодо температурних залежностей межі міцності та прогину під час вигину зразків наступних двох досліджуваних матеріалів показано на рисунках 3.5-3.6.



а



б

Рисунок 3.5 - Температурні залежності межі міцності при вигині:
 температура випалу зразків: а - 1380°C; б - 1250°C; цифри біля кривих -
 номери складів за
 таблицею 3.6

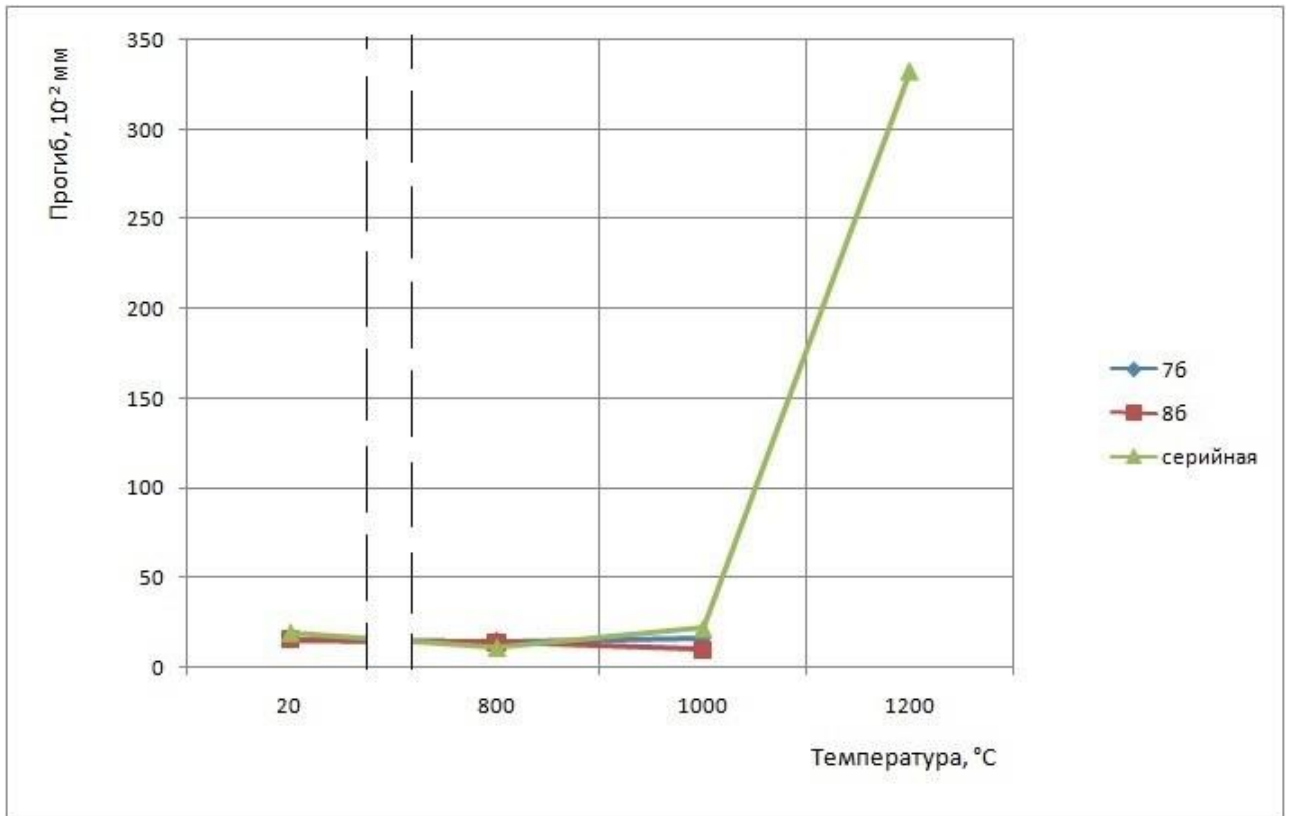


Рисунок 3.6 - Температурні залежності прогину при температурі випалу зразків 1360°C

При розгляді наведених даних виявляється, що закономірності температурної зміни міцнісних властивостей у дослідних складів 7 і 8 з різним вмістом плавненого кварцу практично ідентичні (рисунок 3.5). Причому, випробуваннями зразків 7б і 8б, прожарених за 1360°C, виявлено, що в інтервалі 20-1000°C межа міцності під час вигину в них зростає з 14-19 до 21-22 МПа, а подальше нагрівання до 1200°C призводить до зниження цього показника до 18-19 МПа (рисунок 3.5а), тобто він усе ще продовжує залишатися на рівні, який помітно перевищує мінімально допустимі для стрижнів значення (щонайменше 15 МПа).

У зразків, прожарених за меншої температури 1250°C (зразки 7а і 8а) знеміцнення йде помітно слабкіше, що й зумовлює їхні вищі міцнісні характеристики (рисунок 3.5 б).

Зразки з досліджуваних матеріалів за відносно низьких температур випробування (до 1000°C) мають прогин під час навантаження не більше ніж 0,2-0,3 мм (рисунок 3.6), тобто, в цьому разі, зразки ламаються крихко, переважно

пружно деформуючись аж до руйнування. Подальше нагрівання до 1200°C обумовлює вже появу значної пластичної деформації зразків під навантаженням. Наприклад, встановлено, що прогин під час випробування за 1200°C у складу 1 досягає 3.3-3.5 мм [14].

Підвищеній податливості зразка зі складу 1 сприяє наявність у ньому деякої кількості мінералізаторів SiC і TiO₂, а також домішок оксидів лужних металів в електрокорунді, здатних утворювати з ним легкоплавкі сполуки. Очевидно, що нагрівання вище 1200°C має зумовити продовження дифузійних процесів у матеріалі, і як наслідок, збільшення його пластичності.

Слід зазначити, що описана вище поведінка стрижневих матеріалів із плавленим кварцом під час нагрівання через деформацію стрижня може створити складнощі під час розв'язання проблеми точності, насамперед, масивних виливків. Стосовно ж тонкостінних лопаток ГТД із жароміцних сплавів можна сказати, що завдяки швидкому, упродовж кількох секунд, затвердінню металу в стінці стрижень, не встигає прогрітися до небезпечних температур і тому зберігає вихідні розмірні характеристики. Це підтверджується даними успішного використання стрижнів, частково або повністю виготовлених із плавленого кварцу під час лиття пустотілих лопаток ГТД.

3.2.2 Дослідження відносної усадки

Дані щодо усадки до і після прожарювання зразків наведено у таблиці 3.7. З наведених результатів видно, що на величину усадки істотно впливають вміст пластифікатора в складі (див. таблицю 3.6) і температура прожарювання.

Таблиця 3.7 - Результати контролю лінійної усадки зразків

№ складів	Лінійна усадка, %
1	0,21±0,01
2	0,7±0,07
4	0,44±0,06
6	0,9±0,08

7a	0,39±0,05
7б	0,31±0,03
8a	0,67±0,07

Під час аналізу даних виявляється, що значення відносних усадок зразків дослідного стрижневого матеріалу, підданих випалюванню за температур 1250°C (зразок 7a) і 1360°C (зразки 1, 2, 7б) близькі до потрібної величини (не більше ніж 0,4%), у той час як у зразків 4,6 і 8a спостерігається більш ніж двократне перевищення цієї характеристики, що є суттєвим недоліком цього матеріалу. Тому для скорочення обсягу трудомістких досліджень доцільно стрижневі склади 2, 4, 6 і 8 виключити з подальшого розгляду.

3.2.3 Дослідження уявної пористості

Дані щодо уявної пористості наведено у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 - Результати визначення значень уявної пористості

номер зразка	Маса зразка, г			Уявна пористість, %	
	сухого, m ₀	Насиченого водою, m ₁	При гідростатичному зважуванні, m ₂	зразка	середнє
1	5,67	4,2	6,72	41,7	42,3±0,8
	5,17	3,95	6,11	43,5	
	5,46	4,15	6,4	41,8	
7a	6.4	4.72	7.45	38.5	40,3±1,7
	5.7	4.21	6.72	40.6	
	6.1	4.54	7.22	48	
7б	5.75	4.23	6.8	40.6	40,1±0,5
	5.72	4.25	6.71	40.2	

	6.55	4.8	7.7	39.7
--	------	-----	-----	------

Результати дослідження засвідчили, що всі зразки мають високу пористість і задовольняють вимогам, що висуваються до стрижневих складів, які використовують під час виготовлення стрижнів охолоджуваних лопаток ГТД.

3.2.4 Дослідження шорсткості

Результати визначення основних показників якості поверхні зразків R_z і R_a проводилися на 4-5 зразках, і усереднені дані наведені в таблиці 3.9

Таблиця 3.9 - Величина шорсткості поверхні зразків

Стрижневий склад	Показники шорсткості, мкм	
	R_z	R_a
1	14,50±0,32	3,022±0,053
7a	10,32±0,45	2,139±0,086
7б	10,26±0,21	2,137±0,042

Дослідження демонструють прямий зв'язок шорсткості поверхні зразків і фракційного складу стрижневих сумішей. Використання дрібних фракцій у стрижневих сумішах знижує шорсткість. Згідно з даними таблиці 3.9, якість поверхні зразків із дослідної суміші 7б помітно краща, ніж у зразків інших складів, і задовольняє вимогам виробництва виливків лопаток ($R_z \leq 25$ мкм).

3.2.5 Дослідження коефіцієнта термічного розширення

Для отримання порівняльних даних було досліджено термічне розширення зразка керамічної форми на кремнезольному сполучному.

Результати експериментів свідчать про вельми істотне збільшення КТР у всіх досліджуваних матеріалів під час нагрівання. Можна помітити, що зміна цього параметра припадає переважно на початок прогрівання зразків, до 300-

350°C, після чого він стабілізується на певному рівні. Виявлені закономірності температурного розширення визначаються як властивостями основного компонента складів - електрокорунду, так і перетвореннями (зі збільшенням об'єму) в кристобаліті, деяка кількість якого з'являється в плавленому кварці під час прожарювання зразків зі складів 6, 7б.

Значення КТР серійного електрокорундового стрижневого складу 1 для температурної області вище 500°C становить $8,0-9,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, що узгоджується з відомими даними для електрокорунду.

У оболонкових форм, прожарених за температур 950 і 1050°C, величина КТР за 1000°C не перевищує $7,8-8,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, що істотно нижче, ніж у серійного стрижневого матеріалу.

Виявлено, що найбільшою мірою з оболонковою формою узгоджується за термічним розширенням дослідний стрижневий склад 7б, коефіцієнт термічного розширення якого за температур 900-1300°C перебуває в межах $7,8-8,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [15].

Водночас подовження під час нагрівання у зразків зі складу 7б так само, як і у форми, відбувається рівномірно і практично однаково, завдяки чому надалі можна очікувати зниження напружень і небезпеки викривлення стрижня у формі, зумовлених різницею термічних розширень цих елементів.

3.3. Моделювання процесу заповнення блоку виливків

Аналіз процесу лиття охолоджуваних лопаток в оболонковій формі за трьома варіантами ЛПС (залівка "зверху", "сифоном" і комбінована) показав, що величина викривлення стрижнів і розташування ділянок з максимальною різностінністю виливка залежать як від схеми роззазорювання знаків керамічного стрижня, так і від величини градієнта температури, який виникає в процесі лиття, за довжиною стрижня.

Навантаження, що діють на стрижень у цих умовах, пов'язані з нерівномірним його прогріванням за довжиною і перерізом у процесі заповнення ливарної форми металом.

Характер розподілу температури по висоті стрижня показано на рисунку 3.7 . Під час заливання зверху стрижень омивається рідким металом по всій довжині за час заповнення робочої порожнини форми (близько 1 с). Термічні напруження, що виникають при цьому, та їхні впливи на стрижень, істотно менші, ніж під час заливання "сифоном". Під час заливання "сифоном" прогрівання стрижня відбувається одночасно з рівнем рідкого металу, що піднімається, і час дії на стрижень максимальних термічних напруг можна порівняти з часом заповнення ливарної форми. Зі зростанням цього часу збільшується деформація стрижня.

Зниження деформації стрижня спостерігається в разі розсазорювання знаків поблизу ділянок, що піддаються впливу максимальних термічних напружень. Під час заливання "сифоном" і за комбінованою ливниковою системою найбільшого ефекту досягають у разі розсазорювання нижнього знака, а під час заливання "зверху" - верхнього знака.

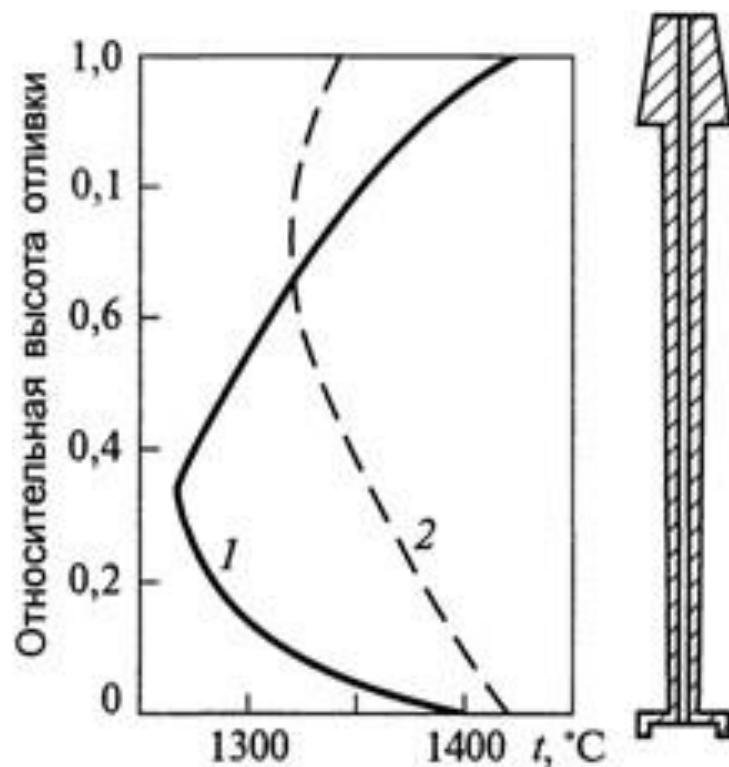


Рисунок 3.7 - Розподіл температури по висоті стрижня за комбінованого способу підведення металу. Швидкість заливки металу, кг/с:

1 - 1,5-2; 2 - 0,5-0,7

Роззазорювання знаків стрижня здійснюється двома способами: або наклеюванням по периметру його знакової частини плівки на полімерній основі завтовшки 0,05-0,10 мм, або просоченням розчинами полімерних з'єднань з одночасним парафінованим торцем знакової частини не менше ніж 2 мм. Вплив способу роззазорювання керамічного стрижня на розмірну точність литих лопаток показав (рисунок 3.8), що обидва способи за ефективністю рівнозначні.

Необхідно зазначити, що розглянута методика роззорування виключає виникнення термічних напружень у стрижні, пов'язаних із різним тепловим розширенням стрижня і ливарної форми як у процесі прожарювання, так і під час заливання металом.

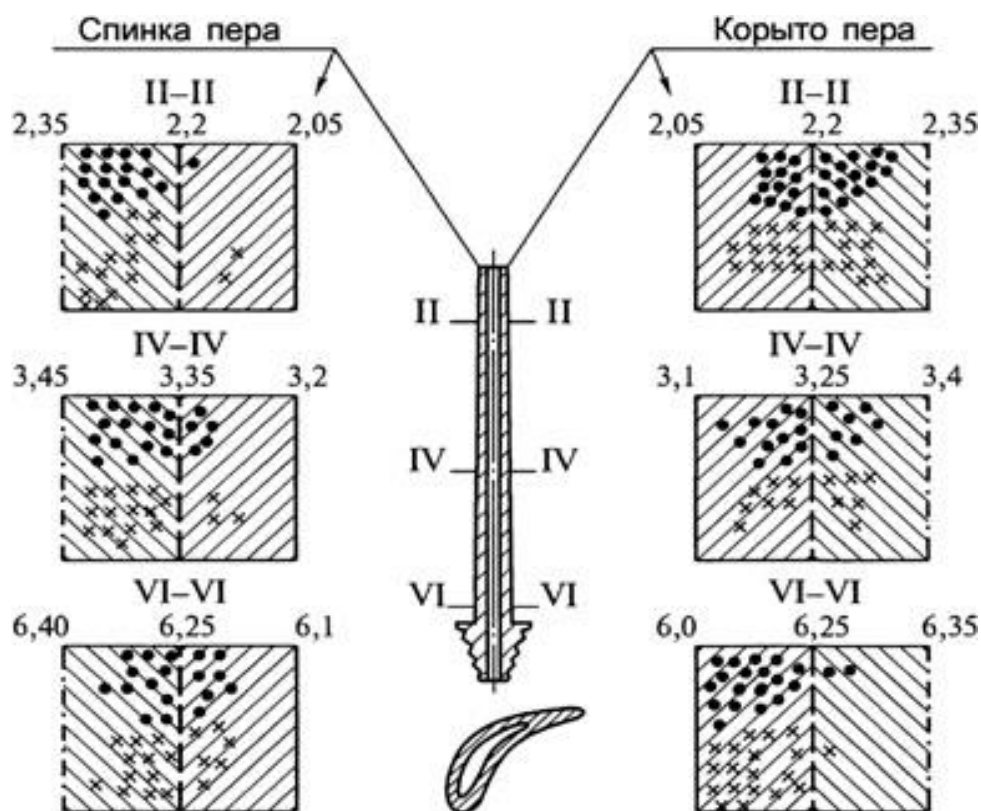


Рисунок 3.8 - Вплив способу роззорування керамічного стрижня на розмірну точність литих лопаток :

- - допустима мінімальна товщина стінки пера за кресленням;
- - - - допустима максимальна товщина стінки пера за кресленням;
- · - · - ливарний допуск;
- - товщини стінок лопаток, відлитих із наклеюванням на знаки стрижня полімерної плівки;
- x - те саме, з просоченням знаків стрижня розчинами полімерних сполучних

З вищевикладеного випливає, що необхідно забезпечити переважно верхнє заповнення лопаток, із сифонним підживленням.

Для розв'язання цього завдання необхідно .

Це завдання розв'язували шляхом моделювання заливки блоку лопаток із різними перетинами дроселя (рисунок 3.9) у системі ProCast і порівнювали з деякими практичними даними.

Моделювання проводилося за такими параметрами:

- температура сплаву, що заливається, - 1520°C;
- температура блоку - 1000°C;
- діаметр дроселя в розрахунках був змінним параметром і приймався рівним 11, 12, 14, 15,5 і 18 мм.



Рисунок 3.9 - Зображення дроселя на стояку

Моделювання заливок блоків лопаток із діаметрами дроселя 11, 12, 14, 15,5 і 18 мм відповідно (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 - Моделювання заливки блоків лопаток із діаметрами дроселя 11, 12, 14, 15,5 і 18 мм відповідно.

Порівняльний аналіз початку заповнення блоків показав, що блоки з діаметрами дроселя 12, 14 і 18 мм заповнюються аналогічно один одному, а саме переважно знизу. Блок із діаметром дроселя 11 мм, заповнюється зверху, і блок із діаметром дроселя 15,5 мм, заповнюється як зверху, так і сифонним способом.

На рисунку 3.11 показано місце злиття потоків сплаву в блоках залежно від діаметра дроселя.



Рисунок 3.11 - Злиття потоків у блоках із діаметрами дроселя 11, 12, 14, 15,5 і 18 мм відповідно

Блок із діаметром дроселя 11 мм, заповнюється переважно зверху. Злиття потоків відбувається біля основи бандажної полиці.

Блок з діаметром дроселя 12 мм, заповнюється аналогічно блоку з діаметром дроселя 14 мм - переважно знизу. Злиття потоків відбувається в пері лопатки біля замкової частини.

Блок із діаметром дроселя 15,5 мм заповнюється як зверху, так і знизу. Злиття потоків відбувається в середній частині пера лопатки.

Блок із діаметром дроселя 18 мм заповнюється сифонним способом. Злиття потоків відбувається в замковій частині лопатки.

Блоки заповнилися за час: 1,51 с, 3,0 с, 2,3 с, 1,63 с і 2,4 с - відповідно. Таким чином, блок із діаметром дроселя 11 мм має найменший час заповнення - 1,51 с.

Загалом виконано моделювання заливки 5 моделей з діаметром дроселя - 11, 12, 14, 15,5 і 18 мм. Показано, що змінюючи діаметр дроселя, можна

керувати часом заповнення блоку і місцями злиття потоків знизу і зверху. Виходячи з теоретичних передумов і результатів моделювання, найоптимальнішим є заливка блоку з діаметром дроселя 11 мм, оскільки заливка відбувається зверху, за мінімальний час, що дорівнює 1,51 с, що сприяє рівномірному прогріванню стрижня по всій довжині, а, отже, зниженню часу дії термічних напружень на стрижень.

Аналіз моделі заливки блоку з діаметром дроселя 18 мм, показує, що заповнення форми відбувається переважно сифонним способом, і керамічний стрижень піддається нерівномірному прогріванню по довжині. На стрижень чиниться триваліший вплив термічних навантажень, що, своєю чергою, впливає на його викривлення і може призводити до підвищеного браку за геометрією, а також до пористості в замковій частині.

Порівняльний аналіз якості виливків із дроселями 12 і 15,5 мм показує, що збільшення діаметра дроселя до 15,5 мм призводить до зниження якості отриманих лопаток за всіма наведеними показниками

Моделювання заливки блоку з діаметром дроселя 14 мм показало, що заповнення відбувається аналогічно блоку, який виготовляють за серійною технологією (з діаметром дроселя 12 мм), але значно скорочує час заливки блоку (на 0,7-0,5 с) і знижує нерівномірність прогріву стрижня.

3.4. Дослідження якості стрижнів з рекомендованої суміші та виливків

У бак-термостат прес-автомата заливали встановлену кількість стрижневої суміші, виготовленої за технологією, описаною в розділі 2. У баку автоматично підтримувалася температура суміші 85-90°C. Стрижневу суміш безперервно перемішували мішалкою, що обертається зі швидкістю 30 об/хв.

Зібрану прес-форму (рисунок 3.12) встановлювали на стіл автомата і навантажували тиском у 250 МПа. Встановлювали необхідний тиск пресування (8 МПа) і температуру стрижневої суміші 85-90°C.

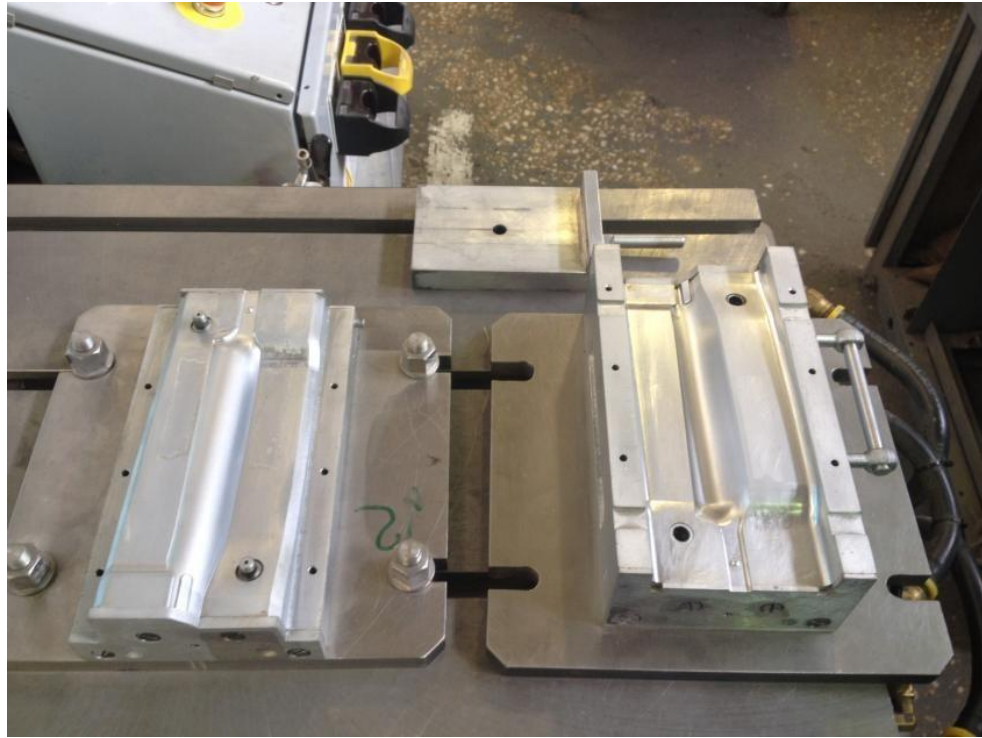


Рисунок 3.12 - Зовнішній вигляд розібраної прес-форми стрижня (нижня половина прес-форми стаціонарно закріплена на столі преса)

Стрижень-сирець витримувався в прес-формі 25 секунд.

Після закінчення циклу запресовування стіл із прес-формою повертався у вихідне положення, після чого проводилося розбирання прес-форми. Знятий стрижень із прес-форми обдували струменем стисненого повітря. Залишки стрижневої суміші від попереднього запресовування ретельно видувалися стисненим повітрям.

На сирих стрижнях безпосередньо після запресовування виявляли дефекти типу утяжини (рисунок 3.13а), нерівностей на вихідній кромці (рисунок 5.3б) і зломів (рисунок 3.13в).



a



б



в

Рисунок 3.13 - Види браку стрижнів під час запресовування: *a* - утяжина;
б - нерівності на вихідній кромці; *в* - злам кромки

Облой по роз'єму напівформи, сліди на поверхні стрижня від вставок у напівформі не повинні бути більше 0,1 мм.

Зачищали облой стрижня і встановлювали еталон першого придатного стрижня.

Виготовлені стрижні-сирці в кількості по 60 штук з дослідної та серійної стрижневої суміші (рисунок 3.14) піддавали випалу в прохідній газовій печі ПГ-30 у спеціальних електрокорундових коробах у засипці глиноземом.

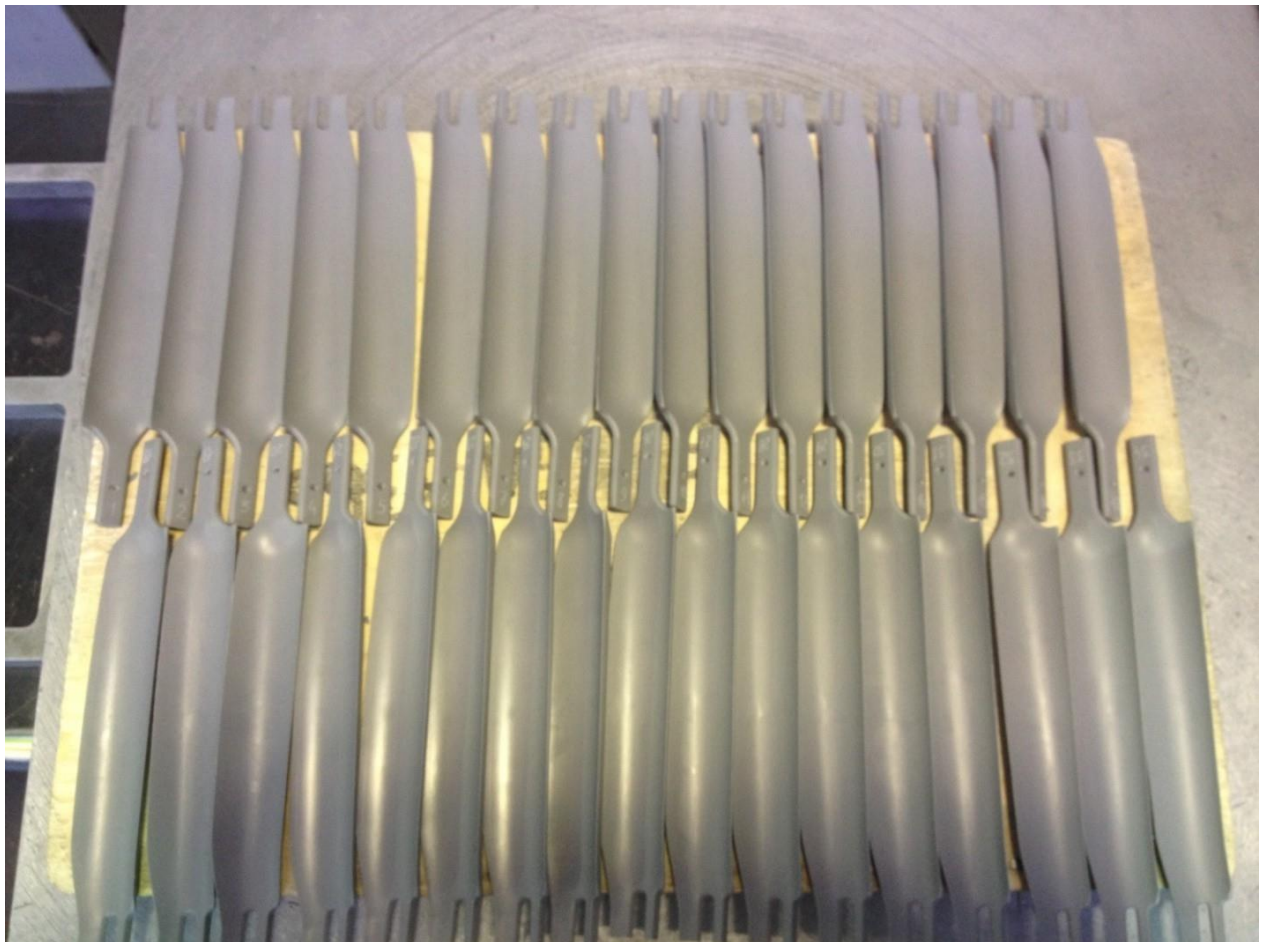


Рисунок 3.14 - Зображення стрижнів-сирців

Керамічні стрижні обережно, не допускаючи їхньої деформації, укладали вертикально масивнішим торцем донизу в короб відповідно до вимог технологічної карти.

Завантажували короби в піч. Відстань між коробами була не менше 50 мм. Відстань від бічних нагрівачів не менше 120 мм. Початкова температура в печі була не вище 50 °С.

Витримували короби зі стрижнями за температури 1320-1380 °С протягом 10-12 год. Відключали піч і охолоджували її до температури 500-700 °С. Вивантажували короби з печі, дотримуючись заходів безпечної роботи.

Розбирали короби зі стрижнями і записували в супровідній карті номер партії випалу, кількість вивантажених стрижнів, дату розборів коробів, кількість відбракованих стрижнів після розбору коробів.

Зачищали стрижні згідно з еталоном, відокремивши попередньо стрижні з остаточним браком (Таблиця 3.10).

Таблиця 3.10 - Результати контролю стрижнів після випалу

Стрижневий склад	Кількість запресованих стрижнів	Брак за різними дефектами, у %
1	60	30
7 (зразок 7б)	60	6

Більшість дефектів стрижнів, що виявляються після випалу (рисунок 3.15), виявляються ще на стадії підготовки і запресовування суміші, а їх причиною є порушення режимів термообробки (перевищення швидкості підйому температури, кінцевих значень у печі тощо).

Після зачистки гладко замазували допустимі дефекти і подряпини замазкою на основі кремнійорганічної смоли К-10

Просочення керамічних стрижнів у розчині смоли проводили один раз на вимогу технологічної карти. Після кожного просочення стрижні (рисунок 3.16) сушили на повітрі щонайменше 30 хв або в термошафі за температури 150-200°C протягом 5-10 хв.

Стрижні, що відповідають еталону, передавали на остаточний контроль.



a

б



в

Рисунок 3.15 - Дефекти стрижнів при випалюванні: *а* - розтріскування кромки;

б - спучування; *в* - нерівності на вихідній кромці [16].



Рисунок 3.16 - Зовнішній вигляд просочених стрижнів

Моделі виливків лопаток (деталь №100-04-1503) виготовляли на пресавтоматі (рисунок 3.17) з модельної маси KINDT-COLLINS. Перед початком роботи брикети модельної маси завантажували в бак-термостат пресавтомата, де відбувалося її розплавлення і нагрівання до заданої температури. На цьому обладнанні встановлення стрижня на нижню половину прес-форми, збирання-розбирання прес-форми і знімання моделі з неї, підготовка половин прес-форми до реалізації наступного циклу запресовування

здійснювалася оператором. Підтримка температури модельної маси при безперервному її перемішуванні і сам процес запресовування моделі здійснювався автоматично, з контролем технологічних параметрів на екрані дисплея преса. Зазначимо, що перед запресовуванням моделі, стрижні і половини прес-форми підігрівалися в сушильній печі до температури 35-40°C.

Параметри запресовування модельної маси:

-тиск - 2,9 МПа;

-температура - 75-80°C;

-час витримки моделі в прес-формі - 45 с.



Рисунок 3.17 - Зовнішній вигляд прес-автомата STM-50

Руйнування стрижня під час запресовування моделей зумовлене здебільшого неакуратністю поводження з ними під час установлення стрижня в пресформу моделі (рисунок 3.18) або вилучення з неї вже запресованої моделі зі стрижнем. Характерний дефект такого роду - злам хвостовика стрижня (рисунок 3.19).



Рисунок 3.18 - Встановлення стрижня в прес-форму



Рисунок 3.19 - Зображення моделі лопатки зі зламом хвостовика стрижня

Чотири моделі лопаток зі стрижнями збирали в блок за методикою, прийнятою в серійному виробництві (рисунок 3.20, а). Таким чином виготовляли 3 блоки, у кожному з яких по 2 стрижні із серійної суміші та 2 стрижні з дослідної суміші, щоб лопатки перебували в рівних умовах під час заливання.

Готовий блок лопаток (рисунок 3.20, б), розміщували в контейнері перед передачею його на операцію заливки..



а



б

Рисунок 3.20 - Зображення блоку лопаток (а) і керамічної оболонки (б)

Після відбивання кераміки і відрізки ливниково-живильної системи з виливки видаляли стрижень за новою технологією за допомогою гідродинамічної установки (рисунок 3.21) [16].



Рисунок 3.21 - Гідродинамічна установка для видалення стрижнів

Контроль показав повне видалення стрижнів. Усі дослідні виливки були піддані контролю за геометричною точністю. Під час перевірки візуальним оглядом виявляли зовнішні дефекти, здійснювали контроль товщини стінок по перу і кориту за трьома перерізами (Рисунок 3.22), а також точності конфігурації профілю лопаток.

Візуальний огляд лопаток, отриманих із застосуванням стрижнів із дослідної суміші, не виявив на них перерахованих поверхневих дефектів. Водночас дві лопатки з шести, отримані із серійними стрижнями, забраковано під час візуального контролю, решту чотири визнано придатними.

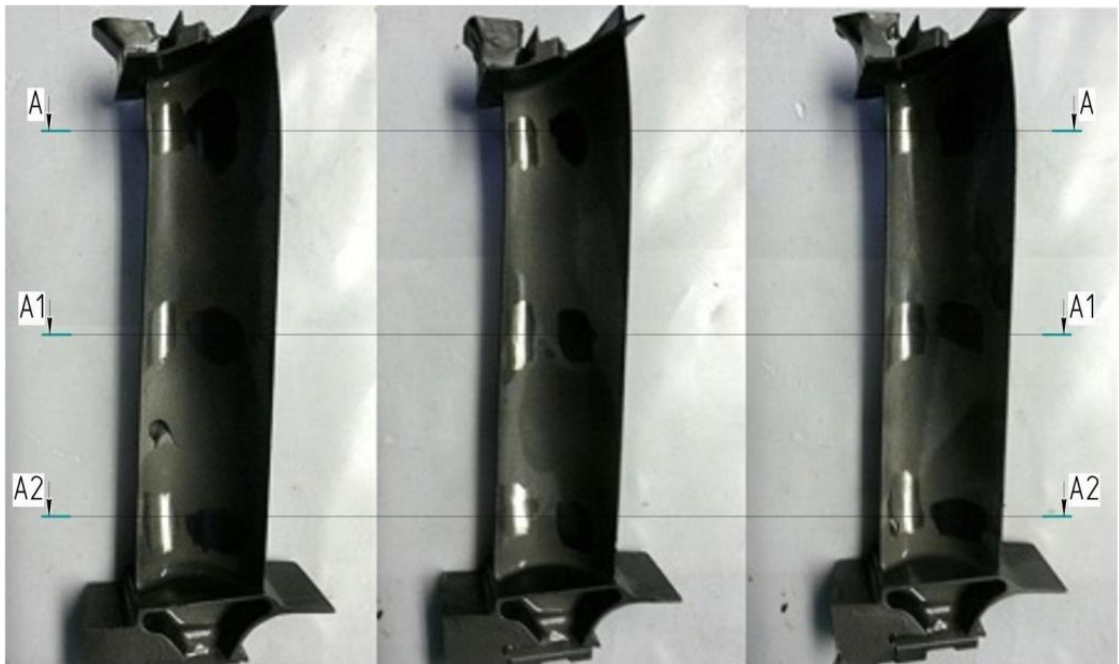


Рисунок 3.22 - Розташування перерізів, за якими здійснювався контроль стінок лопатки

Загалом із шести лопаток із дослідними стрижнями забраковано дві, а із шести лопаток із серійними стрижнями забраковано три. Можна зробити висновок, що виливки з дослідними стрижнями за якістю не поступаються і на 17% збільшили вихід придатних лопаток, ніж виливки з серійними стрижнями.

Проведений порівняльний аналіз якості виливків із трьох блоків наведено в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 - Результати контролю якості виливків

Використовувана стрижнева суміш	Брак, у %, виявлений під час:	
	візуального контролю	вимірюванні товщини стінки пера лопатки
Серійна	33	50
Дослідна	0	33

Аналіз положення стрижня в моделі показує, що стрижень здебільшого розташовується в середині моделі та відповідає вимогам конструктора.

Аналіз точності лопаток, отриманих зі стрижнями з розробленої стрижневої суміші, показав, що виливки за якістю не поступаються і на 17% збільшили вихід придатних лопаток, ніж виливки із серійними стрижнями. Розроблена суміш може бути рекомендована до впровадження у виробництво.

Висновки до розділу

1. Дослідження на міцність при вигині зразків із шести різних стрижневих складів показало, що електрокорундові зразки з мінералізаторами (SiC, АСД-4), прожарених за 1350°C (номери зразків 1 і 2), мають необхідні для забезпечення необхідної розмірної точності лопаток характеристики міцності, тобто не менше ніж 15 МПа (150 кгс/см²). Аналогічний висновок може бути зроблений і щодо зразків, що містять 20-25% плавленого кварцу, прожарених за 1250°C. Водночас підвищення температури прожарювання до 1350°C призводить до їх різкого знеміцнення.

Під час випробування зразків 7б і 8б, прожарених за 1360°C, виявлено, що в інтервалі 20-1000°C межа міцності під час вигину в них зростає з 14-19 до 21-22 МПа, а подальше нагрівання до 1200°C призводить до зниження цього показника до 18-19 Мпа.

2. Аналіз даних лінійної усадки показав, що значення відносної усадки зразків дослідного стрижневого матеріалу, підданих випалюванню за температур 1250°C (зразок 7а) і 1360°C (зразки 1, 2, 7б), близькі до потрібної величини (не більш ніж 0,4%), у той час як у зразків 4, 6 і 8а спостерігається більш ніж двократне перевищення цієї характеристики, що є істотним недоліком.

3. Результати дослідження уявної пористості засвідчили, що всі досліджувані зразки мають високу пористість (приблизно 40%) і задовольняють вимогам, що висуваються до стрижневих складів.

4. Виявлено, що найбільшою мірою за термічним розширенням з оболонковою формою узгоджується дослідний стрижневий склад 7б, коефіцієнт

термічного розширення якого за температур 900-1300°C перебуває в межах 7,8-8,0 10⁻¹ °C.⁻¹

5. Моделювання заливки п'яти моделей з діаметром дроселя - 11, 12, 14, 15,5 і 18 мм показало, що змінюючи діаметр дроселя стояка, можна керувати часом заповнення блоку і місцями злиття потоків знизу і зверху. Виходячи з теоретичних передумов і результатів моделювання, найоптимальнішим є заливка блоку з діаметром дроселя 11 мм, оскільки заливка відбувається згори за мінімальний час, що дорівнює 1,51 с, що сприяє рівномірному прогріванню стрижня по всій довжині, а, отже, зниженню часу дії термічних напружень на стрижень.

6. Брак з виготовлення стрижнів "сирців" із серійної суміші становив понад 50%, із дослідної суміші - 10%. Брак після випалу стрижнів із дослідної суміші становив лише 6%, тоді як на серійній суміші - 30%.

7. Аналіз точності лопаток, отриманих зі стрижнями з розробленої стрижневої суміші, показав, що якісні виливки на 17% збільшили вихід придатних лопаток, ніж виливки із серійними стрижнями.

4 ЕКОНОМІКА ВИКОРИСТАННЯ ОПТИМІЗОВАНИХ СКЛАДІВ СТРИЖНЕВИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ЛИТТЯ ПО ВИТОПЛЮВАНИМ МОДЕЛЯМ

Для визначення економічної вигоди від використання стрижневої суміші певного складу в процесі виготовлення лиття по витоплювальним моделям необхідне порівняння декількох з них. В попередніх розділах даної роботи вибір оптимального складу стрижневої суміші фокусувався на встановленні впливу фракційного та хіміко-мінералогічного складу її компонентів. Основним результативним показником вибору на користь одного із запропонованих складів суміші є можливість отримання додаткового прибутку ($\Delta\Pi$) від виробництва і реалізації лиття виготовленого по витоплювальним моделям:

$$\Delta\Pi = \Pi_{\text{проп}} - \Pi_{\text{баз}}, \text{ грн.} \quad (4.1)$$

де $\Pi_{\text{проп}}$ – прибуток отриманий при використанні оптимального із запропонованих складів стрижневої суміші, грн.;

$\Pi_{\text{баз}}$ – прибуток отриманий від використанні базового складу стрижневої суміші при традиційній технології виготовлення лиття, грн.

Для визначення показника $\Delta\Pi$ необхідні конкретні параметри обсягу випуску і реалізації лиття, ціна продажу та собівартість виготовлення. Також необхідно мати на увазі, що використання обраного на основі технологічного дослідження складу стрижневої суміші у випадку її використання способом витоплювальних моделей значно зменшує брак. А значить збільшує рівень виходу придатного лиття.

Як вже зазначалося перевагами лиття по витоплювальним моделям є його точність та універсальність, але при цьому спосіб забезпечує екологічну стійкість. Тому сподіваємося на отримання позитивного результату і в царині економічної ефективності.

Очікуємо, що на економічну ефективність процесу виготовлення лиття з жаростійких сплавів способом витоплювальних моделей можуть впливати наступні процеси:

- отримання якісної поверхні відливка, що виключає операції шліфування чи полірування – позитивно впливає на ціну, зменшує трудомісткість робіт та вартість виготовлення;
- ефективність витрат за рахунок повторного використання форм та мінімальної або навіть відсутності механічної обробки – зменшує собівартість виготовлення одиниці ливарної продукції;
- можливість розширення асортименту продукції різної складності та геометрії – позитивно впливає на статус підприємства на ринку ливарної продукції, збільшує кількість потенційних замовників та відповідно доход від реалізації і прибуток;
- зменшення відходів виробництва та впливу на навколишнє середовище – зменшує екологічні платежі підприємства, дає можливість повторного використання суміші і відповідно економії на придбанні нових обсягів її компонентів, знижує витрати на утилізацію відпрацьованих сумішей.

При визначенні вартості виготовлення лиття по витоплювальним моделям враховували яким чином окремі її складові можна оптимізувати та що на це впливає:

- матеріальні витрати визначаються переліком обраних матеріалів, кількістю їх використання та вартістю на ринку. Наприклад, такі сплави як нержавіюча сталь, алюміній чи титан, які найчастіше застосовуються при технології за витоплювальними моделями, відрізняються за вартістю;
- витрати праці визначаються трудомісткістю робіт за технологією та необхідністю високої кваліфікації працівників, особливо при виготовленні воскових моделей, корпусів форм та ін. Тому витрати на оплату праці працівників займає значну частину вартості виготовлення такого лиття;
- обладнання та інструменти – хоча технологія лиття по витоплювальним моделям в деяких випадках виключає необхідність в складному оснащенні, але

вартість спеціалізованого устаткування (наприклад, машини для лиття воску, відповідні сплавам плавильні печі) могут зростати;

- складність відливка та рівень допусків на відхилення від геометрії впливають на вартість – більш складні виливки вимагають складних форм та збільшують трудомісткість виготовлення, що збільшує вартість їх виготовлення;
- обсяг виготовлення лиття – чим він більший, тим нижча собівартість одиниці продукції. Проте важливим є узгодження обсягів виробництва і продажів для недопущення надлишків продукції та безповоротних втрат.

Таким чином, розуміння вартості лиття по витоплювальним моделям з урахуванням зазначених факторів дає можливість обґрунтувати технологічне рішення (з вибору оптимальної рецептури стрижневої суміші також), яке б збалансувало якість та бюджет виробництва.

Вже зазначали, що лиття по витоплювальних моделях досить універсальне щодо вибору матеріалу. Це можуть бути нержавіючі сталі, алюмінієві сплави, а також продуктивні за експлуатаційними характеристиками матеріали. До останніх можна віднести, наприклад, сплави титану чи кобальту. Тобто використання способу лиття по витоплювальним моделям дозволяє обробляти досить широкий спектр матеріалів.

Ми для визначення економічної ефективності використання стрижневих сумішей при виготовленні за витоплювальними моделями розглянемо для прикладу виробництво литих лопаток з сталі ЧС104-ВІ.

Як встановили при дослідження, результати яких представлено в попередньому розділі, що геометрична точність лопаток, отриманих зі стрижнями з запропонованої стрижневої суміші вища порівняно з традиційним складом суміші. Це дало можливість встановити, що вихід придатних лопаток збільшиться на 17% (до рівня 78%) порівняно з виготовленням лопаток із застосуванням традиційних складів суміші.

На підставі технологічних даних, виробничої програми ливарного цеху та розрахунку шихти складена відомість балансу основних шихтових матеріалів (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Відомість балансу основних шихтових матеріалів

Склад шихти	ЧС104-ВІ	Вихід	ЧС104-ВІ
Лом (лопатки використані)	50	Придатні відливання	78
Повернення	20	Відходи (ливникова система)	20
Заготовка	30	Разом рідкого металу	98
		Вигар і безповоротні втрати	2
Металозавалка	100	Металозавалка	100

Відповідно до відомості балансу металу й шихти придатні виливки за технологією становлять 78%, витратний коефіцієнт – 1,28. Виходячи з цього, розраховуємо кількість шихти на 1 тонну придатного лиття.

$$\text{Кількість заготовок} \quad \frac{1,28 \cdot 30}{100} = 0,38 \text{ т}$$

$$\text{Кількість лому} \quad \frac{1,28 \cdot 50}{100} = 0,64 \text{ т}$$

$$\text{Кількість ливників} \quad \frac{1,28 \cdot 20}{100} = 0,26 \text{ т}$$

$$\text{Кількість відходів} \quad \frac{1,28 \cdot 20}{100} = 0,26 \text{ т}$$

$$\text{Кількість вигару та безповоротних втрат} \quad \frac{1,28 \cdot 2}{100} = 0,026 \text{ т}$$

На основі розрахованих параметрів склали матеріальний баланс плавки (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку вартості необхідних матеріалів за даними матеріального балансу плавки 1т сплаву ЧС-104ВІ

Види матеріалів		Кількість витрачання	Ціна, грн.	Сума, грн.
За метало завалкою	Заготовка, т	0,38	250000	95000
	Лом, т	0,64	70000	44800
	Ливники, т	0,26	100000	26000
	Разом	1,28		165800
Відходи і вигар	Відходи, т	0,26	100000	26000
	Угар, т	0,026		
	Всього відходів і угару	0,28		26000
	Разом задано без відходів і вигару	1		139800
Добавки	Вапно	0,08	110	8,8
	Магnezитовий порошок	0,0133	290	3,9
	Плавиковий шпат	0,00051	1200	0,6
	Вогнетривкі матеріали, т	0,0102	1000	10,2
	Разом флюсів і додаткових матеріалів	0,1086		23,5
Електроенергія, кВт-год		525	8,5	4463
Формувальні та стрижневі матеріали, т		0,76	550	418
Заробітна плата виробничих робітників				3590
Відрахування на соціальне страхування				790
Витрати на підготовку виробництва				5113
Утримання і ремонт технологічного обладнання				42749
Цехові витрати				1828
Інші витрати				395

Разом виробнича собівартість			199169
------------------------------	--	--	--------

Найбільшу питому вагу має металозавалка

$$ПВ_{МЗ} = \frac{139800}{199169} \times 100 = 70,2 \%$$

З металозавалки вираховували втрати матеріалів по причині наявності технологічно обґрунтованих відходів, наявності браку (в кількості 20%) і вигорання та додали витрати на виробництво, оплату праці, витрати на підготовку виробництва та інші витрати. Таким чином отримали собівартість виробництва при використанні запропонованого складу стрижневої суміші на рівні 199169 грн./т.

Згідно з матеріально-технічними даними за традиційною технологією брак відливань лопатки 10B59040245, яка є частиною ГТД-10В, становив 25%. Згідно з цим для витоплювальних моделей необхідна також розробка ефективної конструкцію ливниково-живильної системи. За даними фахівців при зміні конструкції такої системи повинна враховуватися її металомісткість, для того щоб не збільшити металомісткість всієї продукції і не отримати збільшення собівартості на тонну лиття. Це в свою чергу може забезпечити зменшення браку відливок в середньому на 8%.

За даними табл. 4.1 при використанні технології виготовлення лопаток із запропонованим нами оптимальним складом стрижневої суміші вихід придатного 78%. Тому при традиційному підході до виготовлення лопаток цей показник ставив 70%. Брак же стрижнів також відрізнявся на користь запропонованого варіанту – із розробленої стрижневої суміші після випалу становив всього 6%, а із традиційної – аж 30%.

У відповідності зі зростанням виходу придатного з 70 до 78% розраховували приріст (8%) на кожну 1т (за традиційним варіантом) продукції, що відображено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати порівняння техніко-економічних показників виробництва лопаток по витоплювальним моделям

Показник	Технологія з використанням стрижневих сумішей		Відхилення, %
	традиційна	запропонована	
Вихід придатного, %	70	78	+11,4
Обсяг виготовлення лопаток, тис. т	1	1,08	+8,0
Собівартість, грн./т	225000	199169	-11,5
Ціна, грн./т	240000		-
Доход, тис. грн.	240	259,2	+8,0
Собівартість прийнятого обсягу виготовлення лопаток, тис. грн.	225	215,1	-4,4
Прибуток після сплати податків (18%), тис. грн.	12,3	36,2	+194,3
Рентабельність виробництва, %	5,47	16,8	+207,1

Висновки:

1) При виборі технології лиття виливків із жаростійких сплавів по витоплювальним моделям шляхом використання оптимальних стрижневих сумішей з точки зору економічної ефективності пропонується користуватися показником додаткового прибутку.

2) На вартість виготовлення лиття по витоплювальним моделям впливають витрати матеріальні, на оплату праці, на обладнання, а також складність відливка та рівень допусків на відхилення від геометрії й обсяг виготовлення лиття. Так як, лиття по витоплювальних моделях досить універсальне щодо вибору матеріалу, ми визначали економічну ефективність запропонованого нами складу стрижневої суміші на прикладі виробництва литих лопаток з сплаву ЧС104-ВІ. Собівартість сплаву становитиме більше 199 тис. грн./т.

3) При використанні запропонованої рецептури стрижневої суміші обсяги виробництва можна збільшити на 8%, собівартість виготовлення 1 т лиття зменшити на 11,5%, а рентабельність виробництва збільшити з 5,4 до

16,8%. Приріст прибутку складе 23,9 тис. грн. на кожну 1 тис. т лиття, що повністю підтверджує ефективність наших пропозицій.

5. ОЦІНКА СТАНУ УМОВ ПРАЦІ І БЕЗПЕКИ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ПІСЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Робота з матеріалами, що використовуються для виготовлення та формування моделей характеризується наявністю шкідливих і небезпечних виробничих чинників, які здатні впливати на організм працівника і підвищувати ризик професійних отруень чи захворювань.

Забезпечити безпеку праці у разі застосування матеріалів можна, лише маючи знання про санітарно-гігієнічні та пожежонебезпечні властивості цих речовин і вживаючи адекватні профілактичні заходи і застосовуючи індивідуальні засоби захисту від шкідливих хімічних дій.

Дослідження, проведені в роботі щодо розроблення стрижневої суміші для виробництва охолоджуваних лопаток ГТД показали, що для виготовлення ливарних керамічних стрижнів використовуються вогнетривкі наповнювачі. В якості вогнетривких наповнювачів найчастіше застосовують кварцові піски, магнезит, циркон, олівін, графіт, хромистий залізняк, шамот, тальк та ін. Технологічні процеси з використанням вогнетривких наповнювачів супроводжуються інтенсивним виділенням пилу, особливо на ділянках сумішоприготувального, формувального відділень, а також на ділянках вибивання і очищення відливків.

Основною складовою кварцових пісків є мінерал кварц (кремнезем) у вигляді хімічної сполуки SiO_2 . Окрім кварцу до складу кварцового піску можуть входити польовий шпат, слюда, окисли заліза, гідрати окислів заліза, карбонати, а також глина. Масова частка SiO_2 у кварцових пісках сягає 90-97%. Через особливу агресивність кварцового пилу, гранично допустима концентрація в повітрі робочих зон не повинна перевищувати 1 мг/м³.

Найбільшу небезпеку для здоров'я людини становить глибоке проникнення у легені кварцового пилу, де він контактує із легеневою тканиною, бронхіолами і альвеолами.

Цирконовий пісок містить 78-79% циркону. Циркон (Zr) є радіаційно небезпечним елементом, тому при застосування цирконових наповнювачів

необхідно контролювати вміст пилу в повітрі робочих зон, який не повинен перевищувати гранично допустиму концентрацію 1 мг/м³.

Олівін ($MgO \cdot FeO \cdot SiO_2$) відноситься до магнезійних залізних силікатів і є породоутворюючим мінералом. Як правило, силікати практично не чинять загальну токсичну дію, і при відкладенні їх пилових часток в органах дихання людини розвиваються місцеві зміни по типу пневмоконіозу і хронічного пилового бронхіту з властивими цим захворюванням загальними (системними) порушеннями.

Найбільш перспективним з усіх розглянутих матеріалів є оксид алюмінію (електрокорунд). Цей продукт не містить добавок, які становлять небезпеку для здоров'я або навколишнього середовища. Не є респіраторним сенсibilізатором. Продукт, ймовірно, не викликає сенсibilізації шкіри. Тривалий контакт зі шкірою може викликати тимчасове подразнення. Безпосереднє попадання у вічі може викликати тимчасове подразнення. Разом з цим пил електрокорунду є аерозолем фіброгенної дії. ГДК середньозмінна 6 мг/м³ за 8 годин роботи.

Присутність пилу оксиду алюмінію може становити ризик для здоров'я, особливо коли ці частинки вдихаються і можуть викликати респіраторні проблеми, такі як подразнення дихальних шляхів, кашель, утруднене дихання і захворювання легенів. Ці частинки також можуть викликати подразнення шкіри та алергію у деяких чутливих людей.

Основною проблемою в пилової патології є ураження легеневої тканини і загальна дія пилу на організм. При тривалому вдиханні виникає професійне захворювання пневмоконіоз, що характеризується розростанням сполучної тканини в легенях і зменшенням їх дихальної поверхні.

Найбільш небезпечною формою пневмоконіозу, прогресуючої і після усунення контакту з пилом, є силікоз. Він найчастіше спостерігається у робітників гірничорудної, кам'яновугільної, машинобудівної, скляної, фарфоро-фаянсової промисловості та інше.

Виробничий пил може призвести до розвитку професійних бронхітів, пневмоній, алергічних ринітів, бронхіальної астми, пилових захворювань очей та шкіри і т. ін.

Пилові бронхіти виникають при вдиханні помірно агресивного змішаного пилу грубої дисперсності. Розповсюдження і строки захворювання залежать від концентрації і хімічного складу пилу (8-10 років).

Пил може чинити вплив на органи зору, спричиняти запальні процеси (кон'юнктивіти), професійні катаракти, викликати сильну сенсibiliзуючу дію на слизову оболонку і роговицю ока.

Забруднюючи шкіряні покриви, пил різного складу чинить подразнюючу, сенсibiliзуючу і фотодермічну дію (дерматити, алергічні дерматити і екземи, фотодерматити відкритих ділянок шкіри). Проникнення пилу в сальні потові залози викликає порушення потовиділенні функції шкіри. Пил може проявляти чисто механічну дію – гострими краями порушувати цілісність слизової оболонки верхніх дихальних шляхів, очей і т. ін.

Основою виконання заходів по боротьбі з пилом є гігієнічне нормування, яке здійснюється відповідно «Гігієнічних регламентів хімічних речовин у повітрі робочої зони» затвердженого наказом МОЗ України від 14.07.2020 року № 1596 та ГОСТу 12.1.005-88.

Боротьба за зниження рівня запиленості і профілактика захворювань має бути комплексною і включати заходи технологічного, санітарно-технічного та лікувально-профілактичного характеру

Технологічні заходи спрямовані на попередження утворення пилу на робочих місцях, шляхом вдосконалення технологічних процесів. До них відносять: впровадження безвідходних технологій та технологій замкнутого циклу; механізацію та автоматизацію виробничих процесів; впровадження дистанційного управління трудовим процесом; заміна сухих процесів “мокрими”; заміна порошкових продуктів брикетами, гранулами або пастами.

Санітарно-технічні заходи спрямовані на забезпечення герметизації пилонебезпечного обладнання, встановлення потужної вентиляційної системи, проведення пневматичного прибирання в приміщеннях.

Індивідуальні засоби захисту – протипилові респіратори, захисні окуляри, протипилові костюми.

Лікувально-профілактичні заходи – працівники підлягають попередньому та періодичним медичним оглядам згідно наказу МОЗ України №246 від 21.05.2007 року «Про затвердження Порядку проведення медичних оглядів працівників певних категорій». Основне завдання медичних оглядів – своєчасне виявлення ранніх стадій захворювання та попередження розвитку пневмоконіозу, встановлення професійної придатності та проведення ефективних лікувально-профілактичних заходів.

Як пластифікатор можна використовувати тверді органічні в'язучі, такі як парафін, віск (наприклад, бджолиний віск), церезин, стеарин. Дослідження, проведені в роботі показали переваги парафіну в якості пластифікатора.

Всі сорти воску безпечні, нетоксичні і не канцерогенні. Знання пожежовибухонебезпечних властивостей речовин є основою інженерних методів забезпечення безпеки технологічних процесів і обладнання, безпеки людей. Ці дані необхідні для розробки заходів запобігання виникненню пожеж і вибухів, а також для оцінки умов їх розвитку і придушення.

Парафін очищений. Пожежонебезпечні властивості: Горюча рідина. Температура спалаху: 98°C (в закритому тиглі), 107 °C (у відкритому тиглі); температура займання 112°C; температура самозаймання 200 °C; температурні межі розподілу полум'я: нижня 96 °C, верхня 145 °C. Засоби гасіння: повітряно-механічна піна.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У роботі розглянуто та проаналізовано різні склади стрижневих сумішей. Виявлено, що для складнопрофільних і тонкостінних лопаток ГТД, одержуваних із жароміцних нікелевих сплавів, необхідні нові співвідношення фракційного та хімічного складу стрижневої суміші.
2. Показано, що необхідно правильно вибрати розмірну послідовність фракційного складу порошків і дотриматись синхронності між хімічним і фракційним складами стрижневої суміші.
3. Розроблено стрижневу суміш з поліпшеними фізико-хімічними та механічними властивостями. Згинальна міцність розробленої стрижневої суміші становила 19 МПа за кімнатної температури та 24,7 МПа за 1200 °С. Коефіцієнт термічного розширення становив $7,8-8,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, що оптимально поєднується з КТР форми. Лінійна усадка склала 0,31 %.
4. Брак стрижнів із розробленої стрижневої маси після випалу становив 6%, а із серійної стрижневої маси - 30%.

СПИСОК ВИКОРСИТАНИХ ДЖЕРЕЛ

