

На правах рукописи



Деменов Анна Олеговна

**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ НОВОГО СОСТАВА
СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК
ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ГТД**

05.16.04 – Литейное производство

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2021

Работа выполнена на кафедре сварочных, литейных и аддитивных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа.

Научный доктор технических наук, доцент,
руководитель: **Павлинич Сергей Петрович**

Официальные **Мысик Раиса Константиновна,**
оппоненты: доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры литейного производства и упрочняющих технологий;

Илларионов Илья Егорович,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, заведующий кафедрой материаловедения и металлургические процессы;

Ведущая федеральное государственное бюджетное
организация: образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», г.Рыбинск, кафедра материаловедения, литья, сварки

Защита состоится «21» июня 2021 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.111.01 при ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <https://magtu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.212.111.01 доктор технических наук, профессор



Мезин И.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Рабочие лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) испытывают экстремальные температурно-силовые воздействия при работе и повышение их эксплуатационных характеристик является эффективным способом улучшения технико-экономических показателей современных ГТД. Изготовление лопаток для ГТД производится литьем по выплавляемым моделям (ЛВМ). Рабочие лопатки из жаропрочных сплавов изготавливаются полыми для прокачки холодного воздуха, чтобы сохранить их работоспособность в условиях высоких температур. Эффективность охлаждения зависит от конструкции внутренней полости лопатки, оформляемой с помощью керамического стержня, которая по мере увеличения температуры газов все более усложняется. Точность геометрических размеров стержня, комплекс его термомеханических характеристик (коэффициент термического расширения (КТР), линейное расширение, прочность) оказывают определяющее влияние на размерную точность полости в лопатке. Конструкция керамического стержня должна обеспечивать необходимую прочность в сыром состоянии до обжига для проведения таких технологических операций как съем с пресс-формы, рихтовка, укладка в короба и достаточную прочность после обжига для устойчивости стержня при заливке расплавом литейной формы. Кроме того, стержневая смесь должна быть химически инертной по отношению к заливаемому сплаву. Изготовление лопаток ГТД при массовом производстве требует стабильности технологии, исключающей брак отливок из-за человеческого фактора. Поэтому, на предприятиях авиационной промышленности внедряется современное автоматизированное оборудование. Внедрение пресс-автомата на ПАО «ОДК-УМПО» выявило проблему повышенного брака при изготовлении стержней с использованием серийной стержневой смеси. В связи с этим диссертационная работа, направленная на разработку и исследование стержневой смеси, отвечающей современным способам изготовления стержней на автоматизированном оборудовании, при литье охлаждаемых лопаток ГТД является актуальной.

Степень разработанности темы

К настоящему времени общепринятой стала технология изготовления стержней из термопластифицированных стержневых составов, представляющих собой суспензию из полифракционного огнеупорного наполнителя и пластификатора. Данные составы были разработаны Российскими и зарубежными учеными И.Д. Абрамсоном, Н.М. Павлушкиным, И.М. Демонисом., Ю.И. Фоломейкиным, М.И. Ландой и другими в 70-х, 80-х годах XX века под требования конструкторов и производства того времени. Несомненно, что требования к стержневым составам должны согласовываться с требованиями к стержням, которые, в

свою очередь, регламентируются индивидуально с учетом конструкции отливки и принятой технологии литья. Причем, многообразие и противоречивость, часто взаимоисключающих требований к стержням, затрудняет научно-обоснованный выбор химического и фракционного состава стержневой смеси. В каждом конкретном случае к решению данной проблемы обычно подходят эмпирически, исходя из соображений, основанных на закономерностях спекания керамики, производственного опыта, накопленного при изготовлении подобных отливок.

Цель работы

Разработка стержневой смеси для производства охлаждаемых лопаток ГТД, обладающей необходимой прочностью при высоких температурах и оптимальным коэффициентом термического расширения для обеспечения наименьшего брака по короблению стержней.

Задачи исследования:

- проведение выбора и оптимизации материалов, химического и фракционного состава вновь разрабатываемой стержневой смеси применительно к автоматизированному оборудованию;
- разработка критериев оценки пригодности стержневой смеси для применения на автоматизированном оборудовании;
- создание программного обеспечения для ЭВМ с целью построения теоретической кривой седиментации и оперативного сравнительного анализа;
- экспериментальное исследование физико-химических и механических свойств вновь разработанной стержневой смеси.

Научная новизна работы

1. На основании разработанной методики определен оптимальный зерновой состав стержневой смеси, обеспечивающий наименьшее коробление стержней для получения охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей при их изготовлении.

2. Получены математические зависимости коэффициента термического расширения и предела прочности при изгибе от процентного содержания компонентов стержневой смеси, позволяющие определить оптимальный состав с КТР $7,8-8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, обеспечивающий уменьшение брака на 20% по короблению стержней для охлаждаемых лопаток ГТД при их изготовлении.

3. На основании использования уравнений Навье-Стокса получены аналитические зависимости седиментационной устойчивости стержневой смеси, позволяющие оценить ее применимость для изготовления стержней на автоматизированном оборудовании с помощью разработанной программы для ЭВМ.

Практическая значимость работы

1. Разработан состав стержневой смеси, физико-химические свойства которой превышают показатели базовой стержневой смеси, что позволило снизить брак по короблению стержней на 20%.

2. Разработано программное обеспечение ЭВМ для построения теоретической кривой седиментации и оперативного сравнительного анализа.

3. На базе ПАО «ОДК-УМПО» произведена апробация разработанной смеси для изготовления стержней в условиях серийного производства. Полученный стержневой состав внедрен в производственный процесс с использованием автоматизированного оборудования.

Методология и методы исследования

Основными методиками для исследования являются законы распределения плотности упаковки несжимаемых частиц, седиментационная модель Навье-Стокса, термодинамические характеристики устойчивости соединений в стержневой смеси.

Использованы методы физического моделирования и математического планирования эксперимента, а также компьютерные программы для обработки экспериментальных данных. Освоены лабораторные установки для изучения физико-механических свойств разрабатываемой стержневой смеси.

Применены современные физико-химические методы: энергодисперсионный микрохиманализ (OxfordIncaX – act), фазовый анализ (RigakuUltimaIV), электронная растровая микроскопия (JEOLISM-6490 LV), оптический дилатометрический анализ (MISURA® ODLT), колориметрия (NETZSCHDSC 404 F3 PEGASUS).

Степень достоверности результатов

Подтверждается сходимостью полученных теоретических и прикладных результатов исследований. Подтверждается воспроизводимость результатов, при проведении их физико-химическими методами. Результаты, полученные при исследовании свойств стержневой смеси, подтверждены в ходе промышленных испытаний на ПАО «ОДК-УМПО».

Апробация исследования

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на конференциях:

1. Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД: Всероссийская научно-техническая конференция, ФГУП ВИАМ, Москва, 2017 г.;

2. Инновации в машиностроении. IX Международная научно-практическая конференция, ФГБОУ ВО АлтГТУ, г. Барнаул, 2018 г.;

3. Мавлютовские чтения: XIII Всероссийская молодежная научная конференция, ФГБОУ ВО УГАТУ, г. Уфа, 2019.

Личный вклад соискателя

Разработана методика определения оптимального зернового состава стержневой смеси и определена зависимость КТР и предела прочности при изгибе от процентного содержания компонентов стержневой смеси. Анализ

и обобщение полученных в результате исследований данных. Личное участие в лабораторных и промышленных испытаниях. Подготовка научных публикаций.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ; получено 2 патента РФ на изобретение, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 86 наименований и 4 приложений, изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков, 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее основная цель и задачи, приведены основные научные положения, выносимые на защиту, а также показана практическая значимость результатов работы.

В *первой главе* рассмотрены составы стержневых смесей, которые представляют интерес для авиационной и аэрокосмической отрасли.

Свойства керамических стержней определяются их химико-минералогическим и фракционным составом. Стержни для пустотелых лопаток ГТД должны удовлетворять следующим требованиям: обладать высокой механической прочностью (15–30 МПа при изгибе); стойкостью к термическим ударам; химической инертностью по отношению к жаропрочным сплавам; малым коэффициентом термического расширения (КТР) ($7,8-8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); высокой точностью геометрических размеров. Стержень должен легко удаляться из полости отливки и процесс удаления должен быть экологичным.

Исходя из вышеизложенного были сформулированы требования к керамическим стержневым составам которые должны согласовываться с требованиями к стержням: быть жидкоподвижными на этапе формования; обладать высокой седиментационной устойчивостью; иметь низкую плотность компонентов смеси, при этом они должны быть высокоогнеупорными и обладать низким КТР, а также подвергаться твердофазному спеканию при температурах не выше 1400°C .

Анализ имеющейся информации, касающейся составов и свойств стержневых смесей, позволил сформулировать цель работы и основные задачи исследования.

Во *второй главе* приведены методики исследований, используемых при проведении лабораторных и промышленных экспериментов.

Подробно описаны методики определения гранулометрического состава, определения седиментационных характеристик, физико-механических свойств, коэффициентов термического расширения, удельной теплоемкости. Приведена методика математической обработки результатов эксперимента.

Изготовление стержней и образцов для испытаний производилось на автоматизированной шприц-машине «CLEVELAND СТМ-25». Испытания на прочность при изгибе проводили на универсальной разрывной машине «Instron 5982», оборудованной высокотемпературной печью сопротивления. Параметры шероховатости поверхности образцов определяли на профилографе АБРИС-ПМ7. Термическое расширение определяли на горизонтальном оптическом дилатометре MISURA® ODLT. Теплоемкость стержневых составов определяли на высокоточном дифференциальном сканирующем калориметре NETZSCHDSC 404 F3 PEGASUS. Химический состав элементов определяли на растровом электронном микроскопе JEOLISM-6490 LV (увеличение до 20000) с приставкой для проведения энергодисперсионного микрохиманализа Oxford Inca X – act. Качественный и количественный фазовый анализ, съемка рентгенограмм проводилась на дифрактометре Rigaku Ultima IV. Исследование микроструктуры проводили с использованием светового микроскопа Nilcon Eclipse MA 100 (увеличение до 1000).

В *третьей главе* описывается решение задачи составления плотной упаковки и геометрической размерной последовательности формирования фракционного состава порошков для стержневой смеси.

Для этого решалась геометрическая задача размещения различных фракций внутри некоторой области пространства при дополнительном условии, что они не должны быть сжимаемы и имеют шарообразную форму.

В результате геометрических расчетов и оптимизации построили объемно-математическую модель представленную на рисунке 1. Расчетные параметры свели в таблицу 1.

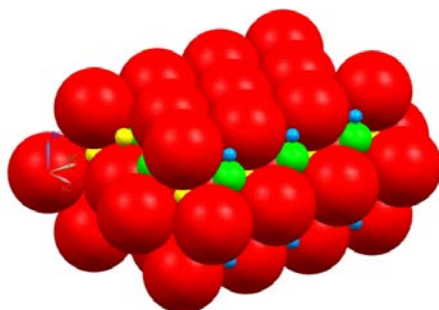


Рисунок 1 – Объемно-математическая модель упаковки шаров

Сравнение размеров частиц порошков и пор позволило определить размерный гранулометрический состав стержневой смеси. При формировании стержневой смеси каркасообразующими фракциями 120 мкм

и 100 мкм образуются поры с максимальным размером 49,7 мкм и 41,5 мкм соответственно. Следовательно, порошки с размерами частиц 75, 63 и 50 мкм не смогут заполнить данные поры. Использование данных фракций будет способствовать формированию неоднородной каркасной гранулометрической структуры стержня и неравномерной ее усадке, что приведет к короблению стержня. Поэтому данные фракции исключены из опытной стержневой смеси.

Плотность упаковки при данном расчете составляет $0,76 \pm 0,01$. При изготовлении смеси сверх материалов основы добавляется пластификатор на основе парафина и полиэтилена (ПП7) в расчетном количестве 10-16 %.

Таблица 1 – Расчетные параметры пор, образованные порошками фракций опытного стержневого состава и размеры частиц порошков стержневых составов

Размер пор стержня, мкм	Максимальный диаметр пор, мкм	Размер порошков стержневой смеси, 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	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Исходя из полученных данных оптимальная плотность упаковки после прокаливания составит 0,6–0,65.

Оптимизация гранулометрического состава выбранных фракций проводилась с использованием программы Excel. В качестве параметров оптимизации при составлении матрицы планирования экспериментов были выбраны: предел прочности при изгибе и КТР.

Для первой серии опытов была составлена матрица планирования типа 2^{4-1} . В качестве варьируемых факторов были выбраны x_1 – Al_2O_3 , x_2 – SiO_2 , x_3 – SiC , x_4 – TiO_2 . Матрица планирования удовлетворяла всем требованиям дробного факторного эксперимента.

Для предела прочности при изгибе получили уравнение регрессии:

$$y = 24,75 + 3,98x_1 - 0,5x_2 + 2,8x_3 + 0,87x_4$$

Уравнение регрессии для КТР:

$$y = 7,66 \cdot 10^{-6} + 0,4 \cdot 10^{-6} x_1 - 1,5 \cdot 10^{-6} x_2 - 0,1 \cdot 10^{-6} x_3 - 0,01 \cdot 10^{-6} x_4$$

Так как целью работы являлось получение стержневой смеси с оптимальным КТР ($7,8-8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), то крутое восхождение проводили исходя из уравнения регрессии для КТР.

В таблице 2 приведен состав предлагаемой стержневой смеси, оптимизированный синхронно по химическому составу и фракциям.

Таблица 2 – Состав предложенной стержневой смеси, оптимизированный синхронно по химическому составу и фракциям.

Компоненты	Фракционный состав	Содержание фракций, %
Al_2O_3	120 мкм	11,5
	100 мкм	25,5
	40 мкм	12
	30 мкм	36
SiO_2	120 мкм	2,5
	100 мкм	6,8
	5 мкм	1,4
	3 мкм	1,8
SiC	10 мкм	1,0
	7 мкм	1,0
TiO_2	3 мкм	0,5

В гранулометрическом составе серийной стержневой смеси процентное содержание каркасообразующих фракций (120 и 100) мкм составило 21 %, средних фракций (40–30) мкм 76,5 % и мелких фракций (10–7, 5–3) 2,5 %.

В оптимизированном гранулометрическом составе содержание каркасообразующих фракций соответственно составляет 46,3%. Содержание второй группы фракций (порошки фракцией 30–40 мкм), которые заполняют поры, сформированные порошками фракции 120 мкм и 100 мкм, придает устойчивость конструкции стержня, составляет 48%.

Содержание третьей группы фракций (порошки 3–10 мкм), которые должны заполнить мелкие поры, образованные второй группой фракций, и обеспечить необходимую шероховатость поверхности стержня, составляет 5,7%. За счет оптимизации фракционного состава повышается плотность структуры и геометрическую стабильность стержня.

В *четвертой главе* представлены результаты сравнительных испытаний керамических образцов-пластин размерами 70x20x4мм при 3х-точечном статическом изгибе согласно ГОСТ Р 50523-93 из серийной (1) и предложенной (2) стержневых смесей. Состав серийной и предложенной стержневой смеси представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Составы исследуемых стержневых смесей

Стержневая масса	Материалы основы, в % по массе								Пластификатор сверх 100%	
	Al ₂ O ₃ (фракции)				SiO ₂ (фракции)		SiC	TiO ₂		
	F280 30-40 мкм	F240 40-50 мкм	F220 63- 75 мкм	F120 100- 120 мкм	F1200 3-5 мкм	F120 100- 120 мкм	F800 7-10 мкм	F1200 3-5 мкм	ПП7	ПП10
1		52,5	24	21			2,5			15-17
2	47,5			37	3,5	9,5	2	0,5	16	

Проведены испытания образцов на изгибную прочность при различных температурах (рисунок 2), которые показали, что образец 1 имеет более высокие показатели прочности при комнатной температуре, чем образец 2, что впоследствии негативно отражается на выбиваемости стержня из полости отливки.

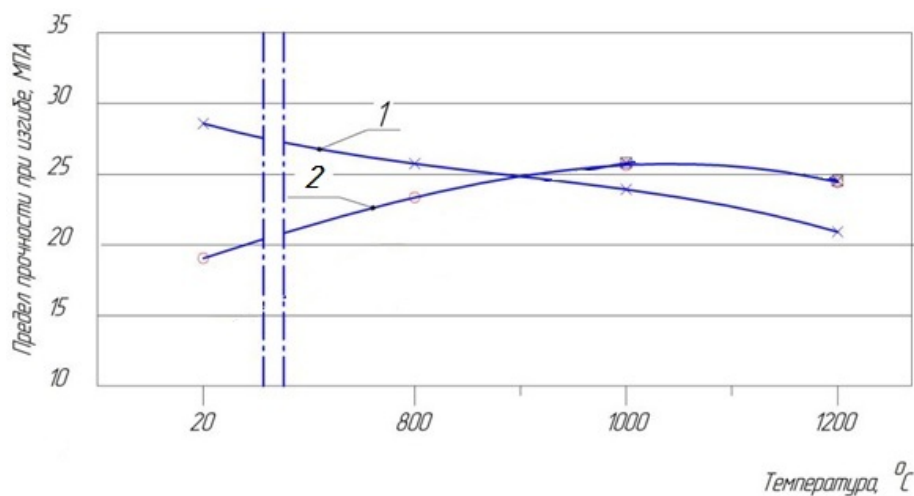


Рисунок 2 – Предел прочности образцов при изгибе:
1 – серийная смесь; 2 – разрабатываемая смесь

Выявлено, что в интервале 20–1000°С предел прочности при изгибе у образца 2 возрастает с 19 до 26 МПа, это обуславливается допрокаливанием частиц смеси при высоких температурах и увеличением более прочного и стабильного муллита в фазовом составе образца (таблица 4).

Таблица 4 – Фазовый состав стержневых смесей

Смесь	Фазовый состав, %			
	Корунд	Кварц	Муллит	Кристобалит
	Al_2O_3	SiO_2	$Al_6Si_2O_{13}$	SiO_2
1	99,5	0,54	-	-
2	77.2	3.6	17.4	1.74

При достижении температуры 1200°С увеличивается пластичность образца и снижается способность сопротивляться действующим нагрузкам.

При исследовании усадки выявлено, что значения относительной усадки образцов 1 и 2 близки к требуемой величине и составляют не более 0,4%.

Результаты исследования пористости (рисунок 3) показали: образец 1 обладает пористостью 42,3%, а образец 2 – 40,1%, что соответствует расчетной плотности упаковки 0,6 и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к стержневым составам, используемым при изготовлении стержней охлаждаемых лопаток ГТД.

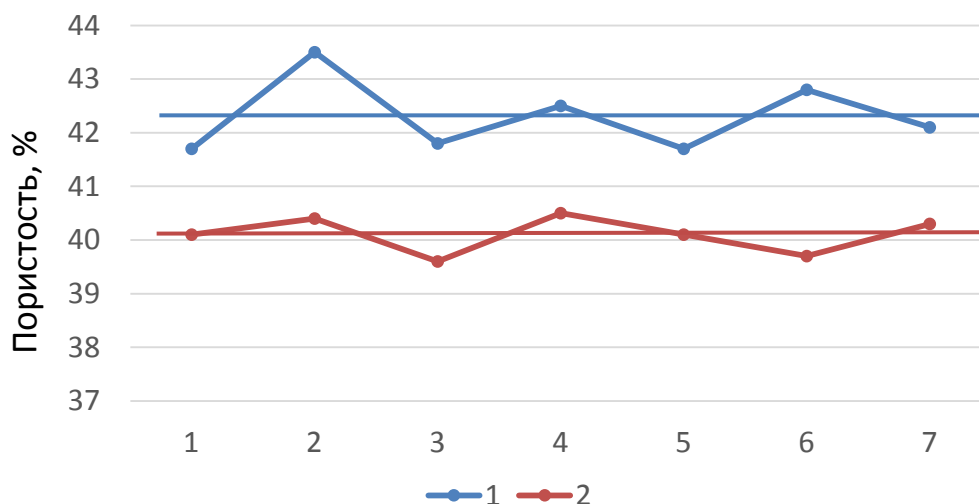


Рисунок 3 – Пористость образцов из серийной и опытной стержневой смеси

Согласно исследованию шероховатости поверхности образцов из предложенной стержневой смеси ее значение составляет 2,137Ra, что на 30% ниже, чем у стержня из смеси серийного состава за счет увеличения мелких фракций. Уменьшение шероховатости улучшает качество внутренней поверхности отливок.

Коэффициент термического расширения опытного стержневого состава 2 при температурах 900–1300°C составил $7,8-8,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что на 5% отличается от термического расширения оболочковой формы. При этом выполняется требование примерного равенства коэффициентов термического расширения материалов керамической формы и стержня для уменьшения деформации последнего и снижения брака по разностенности лопаток. Следует также отметить, что удлинение при нагреве у образцов из состава 2 так же, как и формы, происходит равномерно и практически одинаково, благодаря чему снижаются напряжения и опасность коробления стержня в форме, обусловленные разностью термических расширений этих элементов.

Исследование химического состава образцов выполнено на растровом электронном микроскопе JEOL ISM-6490 LV. Показано, что уменьшение содержания Al и увеличение содержания Si в опытном составе связано с добавками плавленного кварца. Наличие Ti в опытной смеси объясняется его введением в смесь в виде оксида с целью снижения температуры спекания при изготовлении стержней. Следы K, Na и Fe свидетельствуют о наличии данных элементов в исходном Al_2O_3 и их содержание не выходит за рамки ТУ398807500224450-99 (таблица 5).

Таблица 5 – Элементный состав образцов» (масс. %)

Образец	O	Na	Al	Si	K	Ti	Fe	Сумма
1	48.82	0.38	36.57	8.90	0.10	-	-	100.00
2	50.23	0.38	35.93	12.23	0.13	0.78	0.19	100.00

Анализ рентгенограмм, полученных на дифрактометре Rigaku Ultima IV (рисунок 4) показал, что при охлаждении образцов α -кристобалит в области температур 180-270 °C претерпевает полиморфное превращение в β -кристобалит с объемным сжатием ~5,6%. Данное превращение обратимо, происходит достаточно быстро и сопровождается увеличением микротрещиноватости образца, и как следствие, некоторой потерей его прочности. Этот эффект используется для улучшения удаляемости стержня из отливки.

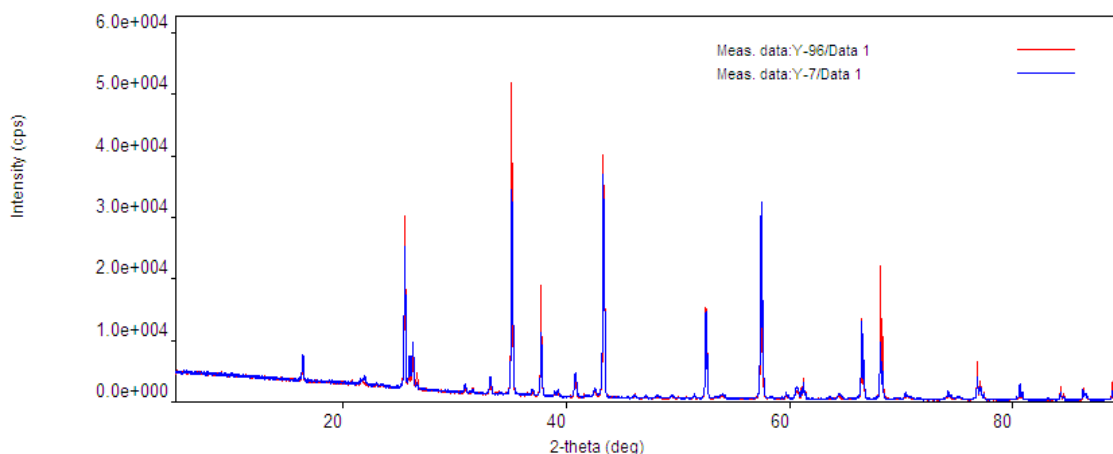


Рисунок 4 – Совмещенные рентгенограммы образцов 1 и 2

Проведен теоретический расчет, выведены уравнения массы осаждения фракций из уравнения Навье-Стокса для анализа и сравнения седиментационных свойств стержневых смесей:

$$m_i(\tau) = \frac{2 \cdot g}{H \cdot 9 \cdot \eta} \cdot M_i^f \cdot (\rho_i - \rho_0) \cdot r_i^2 \cdot \tau,$$

где M_i^f – масса i -го компонента дисперсной фазы, H – высота столба дисперсной системы в рассматриваемой емкости η – вязкость ρ_i – плотность i -го компонента дисперсной фазы ρ_0 – плотность среды, r_i – размер частицы i -го компонента дисперсной фазы τ – время, g – сила тяжести.

Разработана программа для построения кривых седиментации (рисунок 5). Выявлено, что рассматриваемые стержневые смеси подвержены расслоению, но седиментационная устойчивость опытного состава выше, чем серийного.

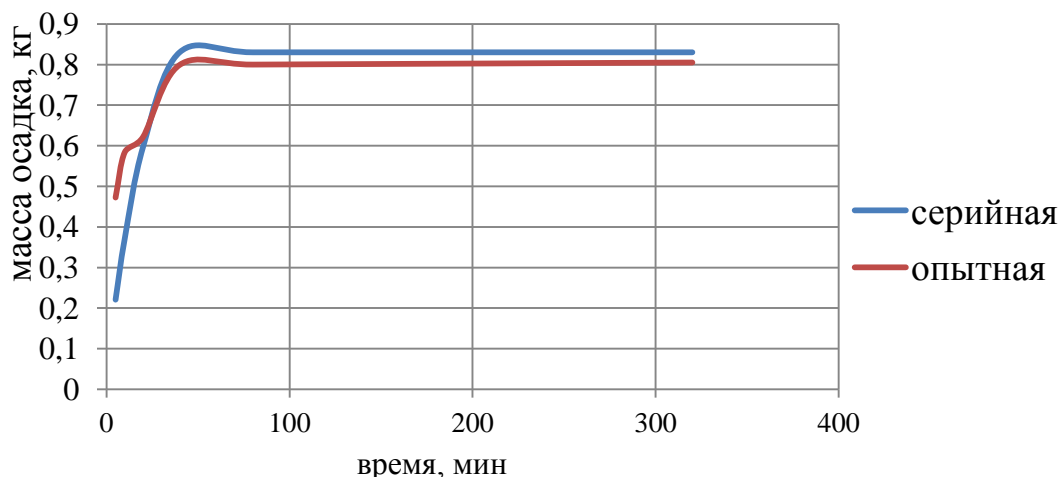


Рисунок 5 – График кривых седиментации

Анализ и практические испытания получения стержней на пресс-автомате выявили необходимость понижения вязкости пластификатора, что достигается применением пластификатора ПП7 с пониженным содержанием полиэтилена. Масса осадка крупной фракции F120 серийной стержневой

смеси на 32% больше массы осадка опытной стержневой смеси за первые 30 минут, что подтверждает теоретическую седиментационную устойчивость разработанной смеси.

В *пятой главе* представлены результаты опытно-промышленных испытаний керамических стержней, используемых для изготовления охлаждаемых лопаток ГТД.

На пресс-автомате CLEVELAND СТМ-25 были запрессованы партии стержней из разработанной и серийной стержневых смесей.

Стержни «сырцы» (рисунок 6, а) подвергались обжигу в проходной газовой печи ПГ-30 в электрокорундовых коробах в засыпке глиноземом. После прокаливания в течение 6 часов при температуре 1360°C (рисунок 6, б) стержни зачищались и проводился визуальный и геометрический контроль. В результате первичного контроля было выявлено, что брак стержней из серийной стержневой смеси составил 30%, а стержней из опытной стержневой смеси – 6%.



а



б

Рисунок 6 – Изображение стержня лопатки ГТД:
а – стержень «сырец»; б – стержень после обжига

Модели отливок лопаток (рисунок 7, а) изготавливались на пресс-автомате СТМ-50 из модельной массы KINDT-COLLINS. Четыре модели лопаток со стержнями собирались в блок по методике, принятой в серийном производстве (рисунок 7, б).

Таким образом изготавливалось 3 блока, в каждом из которых по 2 стержня из серийной массы и 2 стержня из опытной массы, чтобы лопатки находились в равных условиях при заливке.

Изготовление оболочковых форм лопаток по выплавляемым моделям на водном кремнезольном связующем производилось в полуавтоматическом режиме на роботизированном облицовочном комплексе Shell-O-Matic. Удаление модельной массы из блоков производилось на бойлерклаве LBBC Technology BC1220. Прокалку блоков производили при температуре 1050°C в камерной печи сопротивления.

Заливку форм (рисунок 7, в) жаропрочным сплавом ЖС6-У производили на вакуумной плавильной установке УППФ-3М. На рисунке 8 изображена отливка лопатки после удаления керамической оболочки. Стержень из отливки удалялся по водно-абразивной технологии с помощью гидродинамической установки.



Рисунок 7 – Технологическая цепочка изготовления формы:
а – модель лопатки; б – блок лопаток; в – керамическая форма

Визуальный и рентгеновский контроль показал полное удаление керамики из полости отливки. В ходе проверки визуальным осмотром выявлялись внешние дефекты, осуществлялся контроль толщины стенок по перу и корыту по трем сечениям, а также точности конфигурации профиля лопаток.



Рисунок 8 – Залитая лопатка ГТД

Подготавливались шлифы из годных по геометрии лопаток, изготовленных со стержнями из опытной и разработанной стержневой смеси. После травления шлифов исследовали микроструктуру кромок внутренней полости отливки на световом микроскопе Nilcon Eclipse MA 100 (рисунок 9).

Анализ микроструктуры показал, что на границе раздела «металл-стержень» не происходит взаимодействия в отливках, изготовленных с использованием стержней из серийной и опытной смеси.

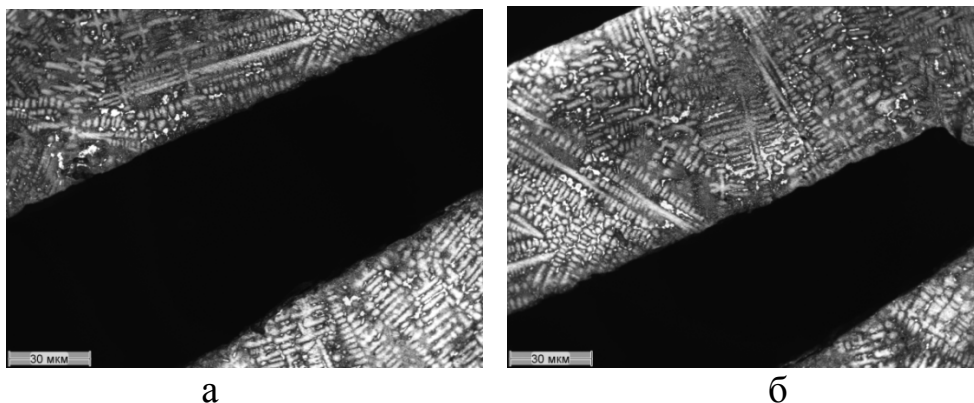


Рисунок 9 – Микроструктура отливок лопаток на границе раздела «металл-стержень», увеличение $\times 100$:

а – со стержнем из серийной массы; б – со стержнем из опытной массы

Производственные испытания показали, что разработанная стержневая смесь полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к стержневым смесям, используемым в настоящее время при серийном производстве.

По результатам апробации разработанной стержневой смеси было выдано заключение о внедрении ее в производство с использованием автоматизированных установок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сформулированы требования, предъявляемые к керамическим стержневым составам, рассмотрены и проанализированы различные составы стержневых смесей. Выявлено, что для сложнопрофильных и тонкостенных лопаток ГТД, получаемых из жаропрочных никелевых сплавов, необходимы новые соотношения фракционного и компонентного состава стержневой смеси.

2. Решена задача составления плотной упаковки и геометрической размерной последовательности формирования фракционного состава порошков для стержневой смеси. Определен оптимальный состав стержневой смеси с учетом плотности упаковки 0,6-0,65.

3. Подобран пластификатор ПП7, позволяющий использовать автоматизированную установку для получения стержней. Анализ опытного определения седиментации показал, что расслоение и осаждение фракций разработанной стержневой смеси происходит медленнее на 32% относительно серийной смеси, что подтверждают теоретические расчеты седиментационной устойчивости смеси.

4. Разработан алгоритм и создана программа для ЭВМ, которая позволила построить теоретические кривые седиментации стержневых смесей для оперативного сравнительного анализа. На программу для ЭВМ выдано свидетельство №2019662797.

5. Разработана стержневая смесь с улучшенными физико-химическими и механическими свойствами. Изгибная прочность которой составила 19 МПа при комнатной температуре и 24,7 МПа при 1200 °С. Коэффициент термического расширения составил $7,8-8,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что оптимально сочетается с КТР формы. Рентгенограмма стержневого состава показала наличие β -кристабалита в фазовом составе, что будет способствовать разупрочнению и лучшему удалению стержня из отливки. Линейная усадка составила 0,31%. На состав смеси для изготовления охлаждаемых лопаток ГТД получен патент №2662514.

6. В производственных условиях ПАО «ОДК-УМПО» были изготовлены стержни для охлаждаемых лопаток ГТД. Брак стержней из разработанной стержневой массы после обжига составил 6%, а из серийной стержневой массы – 30%. Проведена опытная заливка лопаток ГТД с использованием стержней, изготовленных из разработанной стержневой смеси. Отлитые лопатки успешно прошли все виды контроля, предусмотренные в серийном производстве. Брак по короблению стержней в лопатках уменьшился на 20%.

7. Разработанный стержневой состав рекомендован к внедрению в серийное производство ПАО «ОДК-УМПО» с использованием автоматизированного оборудования для получения рабочих охлаждаемых лопаток ГТД с равноосной структурой.

Направления дальнейшей разработки темы исследования

1. Исследование влияния химического взаимодействия компонентов стержневой смеси на механическую прочность.

2. Исследование влияния различных видов пластификаторов на жидко-подвижное состояние стержневой смеси.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в российских рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Деменок А.О. Выбор и оптимизация химического и фракционного состава стержней для пустотелых лопаток / А.А. Ганеев, О.Б. Деменок, Р.Ф. Мамлеев, С.П. Павлинич, А.О. Деменок, Б.А. Кулаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 54-63 (0,62 п.л. / 0,3 п.л.).

2. Деменок А.О. Расчет и определение седиментационных свойств стержневых составов применяемых при литье лопаток ГТД / Е.С. Гайнцева, А.С. Горюхин, А.О. Деменок, Р.Р. Ганиев, Б.А. Кулаков / Литейщик России. – 2020. – №3. – С. 21-26 (0,37 п.л. / 0,1 п.л.).

3. Деменок А.О. Смесь для получения стержней при изготовлении лопаток ГТД из жаропрочных сплавов / А.О. Деменок, С.П. Павлинич, О.Б. Деменок / Литейщик России. – 2021. – №2. – С. 5-8 (0,31 п.л. / 0,11 п.л.).

Патенты и свидетельства:

4. Пат. №2662514 Российская Федерация МПК В22С9/10. Смесь для изготовления литейных керамических стержней полых лопаток из жаропрочных сплавов литьем по выплавляемым моделям. Деменок О.Б., Ганеев А.А., Мамлеев Р.Ф., Павлинич С.П., Аликин П.В., Деменок А.О.; заявка №2017128281/02; заявл. 07.08.2017; опубл 26.07.2018, Бюл. №21 (0,88 п.л. / 0,3 п.л.).

5. Пат. №2691435 Российская Федерация МПК С22С1/12. Смесь для изготовления литейных керамических стержней полых лопаток из жаропрочных сплавов литьем по выплавляемым моделям. Ганеев А.А., Деменок О.Б., Кулаков Б.А., Павлинич С.П., Деменок А.О., Гайнцева Е.С.; заявка № 2018127147/02; заявл. 23.07.2018; опубл. 13.06.2019, Бюл. №17 (0,88 п.л. / 0,3 п.л.).

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019662797 Российская Федерация. Расчет седиментационных свойств дисперсных систем и построение теоретической кривой седиментации в литейном производстве / А.О. Деменок, З.И. Харисова. – заявл. 16.09.2019 ;опубл 02.10.2019. – 1 с (336 Кб)..

Публикации в других изданиях:

7. Деменок А.О. Исследование седиментационных свойств стержневых смесей для литья охлаждаемых лопаток ГТД /А.О. Деменок, А.С. Горюхин, О.Б. Деменок, Е.С. Гайнцева/ В сборнике: Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2017. – С. 139-149 (0,63 п.л. / 0,2 п.л.).

8. Деменок А.О. Стержневой материал для равноосного литья охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) из жаропрочных сплавов/ А.О. Деменок, С.П. Павлинич, Деменок О.Б., Ганеев А.А., Гайнцева Е.С., Хайруллин Т.А. / В сборнике: Инновации в машиностроении сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. Под редакцией А.М. Маркова, А.В. Балашова, М.В. Доц., 2018. – С. 40-45 (0,31 п.л. / 0,05 п.л.).

9. Деменок А.О. Расчет оптимального гранулометрического состава стержневой смеси / Мавлютовские чтения: XIII Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. в 6 т. Том 2 / УГАТУ – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – С. 302-307 (0,44 п.л. / 0,44 п.л.).