

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Уфимский государственный авиационный технический
университет»

На правах рукописи



Деменок Анна Олеговна

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

05.16.04 – Литейное производство

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
Павлинич Сергей Петрович

Уфа – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	10
1.1 Общие и специальные требования к керамическим материалам стержня.	10
1.2 Выбор основных материалов для керамических стержней.....	16
1.3 Материалы технологической связки.....	25
1.4 Составы керамических смесей на основе электрокорунда.....	30
1.5 Составы керамических смесей на основе плавленного кварца.....	31
1.6 Методы упаковки полидисперсных частиц в композитных материалах...	33
1.7 Выводы по главе 1.....	38
1.8 Цели и задачи исследования.....	39
ГЛАВА 2 МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	40
2.1 Методика расчета оптимального гранулометрического состава стержневой смеси.....	40
2.2 Методика расчета седиментации дисперсных систем в поле действия сил гравитации.....	46
2.3 Методика определения предела прочности и прогиба при изгибе.....	50
2.4 Методика определения относительной усадки при обжиге.....	53
2.5 Методика определения кажущейся пористости.....	53
2.6 Методика определения шероховатости поверхности образцов.....	55
2.7 Методика определения термического расширения.....	56
2.8 Методика определения удельной теплоемкости.....	57
2.9 Методика определения фазового состава.....	58
2.10 Методика оценки седиментации стержневой смеси.....	61
2.11 Методика исключения грубых ошибок.....	62
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА НОВОГО СОСТАВА СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСИ.....	63
3.1 Оптимизация гранулометрического состава стержневой смеси.....	64
3.2 Разработка программы для построения теоретической кривой седиментации.....	75
3.3 Выводы по главе 3.....	77

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗРАБОТАННОЙ СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСИ.	78
4.1 Технология изготовления стержневой смеси.....	78
4.2 Исследования физико-химических и механических свойств образцов....	83
4.2.1 Исследование предельной прочности образцов при изгибе.....	85
4.2.2 Исследование относительной усадки.....	92
4.2.3 Исследование кажущейся пористости.....	92
4.2.4 Исследование шероховатости.....	93
4.2.5 Исследование коэффициента термического расширения.....	94
4.2.6 Определение химического состава	97
4.2.7 Исследование фазового состава	98
4.2.8 Исследование удельной теплоемкости.....	101
4.2.9 Сравнительный анализ седиментации стержневых смесей аналитическим методом.....	105
4.2.10 Сравнительный анализ седиментации стержневых смесей практическим методом.....	107
4.3 Моделирование процесса заполнения блока отливок при различных диаметрах дросселя в стояке.....	108
4.4 Выводы по главе 4.....	114
ГЛАВА 5 АПРОБАЦИЯ НОВОГО СОСТАВА СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ЛИТЬЕ ЛОПАТОК ГТД В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....	116
5.1 Выводы по главе 5.....	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	131
Приложение А.....	139
Приложение Б.....	144
Приложение В.....	151
Приложение Г.....	155

ВВЕДЕНИЕ

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 [1]. Проблема становится еще более актуальной в связи с тем, что вектор развития авиадвигателестроения направлен в сторону увеличения температуры газов перед турбиной [2].

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 [3].

В связи с этим диссертационная работа, направленная на разработку и исследование стержневой смеси, отвечающей современным способам изготовления стержней, 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 общих соображений, основанных на закономерностях керамической технологии, производственного опыта, накопленного при изготовлении подобных отливок.

Изготовление лопаток ГТД при серийном производстве требует стабильности технологии, исключающей брак отливок из-за человеческого фактора. Поэтому на предприятиях внедряются современные автоматизированные комплексы для производства пустотелых лопаток ГТД с большой долей автоматизации технологических операций, включая изготовление стержней, моделей и получение оболочковых форм.

В связи с этим диссертационная работа, направленная на разработку стержневой смеси для охлаждаемых лопаток ГТД, является актуальной.

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.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод определения оптимального зернового состава стержневой смеси, обеспечивающего наименьшее коробление стержней для получения полых литых лопаток газотурбинных двигателей при их изготовлении.

2. Геометрический расчет плотности упаковки частиц смеси, позволяющий обеспечить получение стержней с требуемым уровнем технологических свойств.

3. Основные закономерности протекания процесса седиментации дисперсных систем, используемых при производстве стержневых смесей.

4. Уравнения для построения теоретической кривой седиментации и программа, позволяющая создавать дисперсные системы из имеющихся материалов в базе данных программы.

5. Зависимости седиментационной устойчивости стержневой смеси, позволяющий прогнозировать ее применимость для изготовления стержней на автоматизированных комплексах.

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: 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.; Инновации в машиностроении. IX Международная научно-практическая конференция, ФГБОУ ВО АлтГТУ, г. Барнаул, 2018 г.; 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 и 18 таблиц.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Общие и специальные требования к керамическим материалам стержня

Требования к стержневым составам формируются на основе требований, предъявляемых к стержням, которые оформляют внутреннюю полость лопаток ГТД.

К керамическим стержням предъявляются требования по качеству поверхности (шероховатость $R_a < 0,5$ мкм); точности геометрических размеров ($\pm 0,15$ мм от номинальных); прочности при изгибе (15–30 МПа), пористости (не менее 30 %) и стойкости к термическим ударам до температур 1250–1300°C [4]. Стержни должны выдерживать температурно-силовые нагрузки при заливке формы металлом с минимально допустимой, или вообще без деформации. Температура начала деформации 0,4 МПа должна быть выше 1450°C и соответствовать условиям заливки металлом. Коэффициент термического расширения (КТР) стержня должен быть минимальным и по возможности ближе к КТР формы, что снижает уровень термических напряжений в этих элементах. Стержень должен иметь высокую термохимическую стойкость к заливаемому расплаву и легко удаляться из затвердевшей отливки. И, наконец, желательно, чтобы материалы для изготовления стержней были недефицитными и недорогими [4].

Разработка стержневой смеси усложняется противоречивостью перечисленных выше взаимоисключающих требований, предъявляемых к стержням. Так они должны обладать высокими прочностными характеристиками и одновременно иметь высокую пористость для облегчения их удаления из отливки. Стержни должны хорошо спекаться при относительно низких температурах, что в свою очередь предполагает, что они хуже будут сопротивляться высокотемпературным воздействиям при заливке, деформируясь и ухудшая размерную точность отливки. Для обеспечения хорошего качества

поверхности необходимо применять шихту с мелкофракционной основой, но это приводит к повышению усадки стержня при обжиге.

По мере усложнения геометрии стержня и повышения температуры литья трудности получения стержней, удовлетворяющих техническим требованиям, возрастают. Это, в свою очередь, ужесточает требования к технологическим свойствам стержневых смесей.

Стержневые смеси должны обладать, прежде всего, высокой текучестью и легко формоваться с получением стержней практически любой конфигурации и с наименьшими внутренними напряжениями. Как известно, при наличии в твердом теле локальных напряжений последние при механическом или другом каком-либо воздействии, например, при резком изменении температуры, активно способствуют разрушению тела.

В настоящее время электрокорунд благодаря своей высокой огнеупорности и термохимической инертности к расплаву имеет наибольшее применение в жаропрочном литье. При этом существенным моментом, требующим особого внимания, является химическая чистота исходного электрокорунда. Известно, что электрокорунд в связи с особенностями его производства из бокситов неизбежно оказывается загрязненным некоторым количеством вредных примесей-оксидов щелочных металлов, которые при нагреве взаимодействуют с электрокорундом и другими добавками с образованием легкоплавких фаз, снижающих огнеупорность стержневого материала. Поэтому желательны тщательный контроль поставляемого электрокорунда на содержание вредных включений и, при необходимости, нейтрализация упомянутых оксидов в данном огнеупоре перед его применением.

При использовании электрокорунда в стержнях в чистом виде необходимы высокие температуры его спекания. Например, для порошка Al_2O_3 дисперсностью 1–2 мкм, указанная температура находится в труднодостижимых пределах 1700–1750 °С [5]. Поэтому в современной практике литья охлаждаемых лопаток с равноосной структурой жаропрочного сплава электрокорунд обычно применяется в сочетании с различными добавками, улучшающими технологичность

получаемого стержневого состава. Это выражается, в первую очередь, в снижении температуры его спекания при сохранении необходимых прочностных характеристик; уменьшении КТР, что способствует повышению термостойкости стержня и т.п.

В качестве специальных добавок в электрокорундовую шихту нашли применение карбид и оксид кремния, диоксид титана (минерализаторы спекания), плавленый кварц, обладающий низким КТР, и другие вещества [6].

Введение плавленого кварца в количестве до 20% по массе снижает термическое расширение стержня и облегчает в последующем его удаление из отливки.

Система $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (рисунок 1.1) является фундаментальной для стержневой технологии. Данная диаграмма интерпретирует физико-химические процессы, происходящие при обжиге различных алюмосиликатных систем, и дает понимание явлений, происходящих при взаимодействии стержневых смесей на основе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

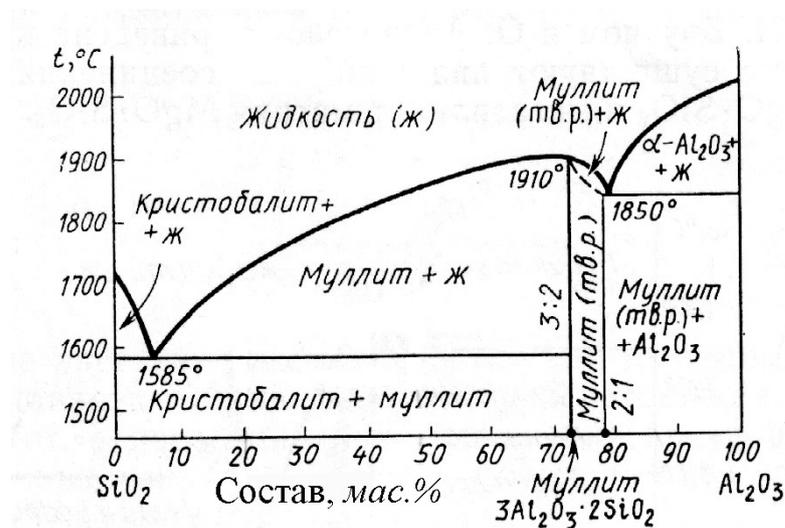


Рисунок 1.1 – Диаграмма состояния системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ [7]

Спекание материалов системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ в низкотемпературной области является твердофазным. Температура спекания зависит, как отмечалось, от дисперсности и активности исходных порошков, условий спекания, вида и количества добавок. Здесь часто образуются малоустойчивые соединения,

разлагающиеся при повышении температуры. Для них характерна сложная стехиометрия, а также наличие областей гомогенности (твердых растворов).

На диаграмме (рисунок 1.1) имеется один максимум, соответствующий температуре плавления муллита, и две эвтектики, образуемые этим соединением с компонентами системы.

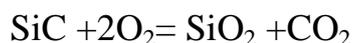
Собственно, плавленый кварц характеризуется очень низким КТР ($\sim 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) [8]. Известно, что при нагреве до температур выше $1150 \text{ } ^\circ\text{C}$ в плавленом кварце с аморфной структурой появляется кристаллическая фаза- α -кристобалит, склонный к полиморфным превращениям с изменением объема. Отметим, что это может оказать некоторое отрицательное влияние на размерную точность рабочей полости лопатки. В то же время растрескивание α -кристобалита вследствие полиморфизма в процессе охлаждения залитого в форму металла облегчает удаление стержня обработкой в расплаве бифторида калия или выщелачиванием [9] из затвердевшей отливки.

В общем случае введение плавленого кварца, характеризующегося более низкой по сравнению с электрокорундом температурой плавления, обусловит снижение огнеупорности и термохимической стойкости материала стержня к расплаву. Если такое изменение свойств стержня с точки зрения взаимодействия его с металлом для быстро затвердевающего пера лопатки не представляет какой-либо опасности, то у более массивных элементов это может стать причиной появления поверхностных дефектов.

Можно полагать, что уменьшение содержания плавленого кварца в составе до 12–15 %, позволит использовать принятый для всей номенклатуры серийных стержневых составов режим обжига с максимальной температурой $1350\text{--}1370 \text{ } ^\circ\text{C}$, упростив тем самым обслуживание нагревательного оборудования [5].

Для ускорения процесса спекания, увеличению температуры начала деформации и упрочнению керамики в систему $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ вводится карбид кремния.

При взаимодействии с кислородом образуется оксида кремния обладающий высокой активностью при температурах выше 1000 °С по реакции [3]:



Согласно диаграмме состояния $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, по границам зерен образуется муллитовая связка, которая обеспечивает срастание зерен основной кристаллической фазы- Al_2O_3 [10].

В работах [11, 12] определено необходимое содержание SiC в пределах 1–2% для компенсации разупрочнения из-за процесса кристобалитизации плавленного кварца и отсутствия газовой пористости в отливках из-за его избыточного количества.

Для достижения мелкокристаллической волокнистой (игольчатой) структуры в стержнях, обеспечивающей эффект армирования материала и повышение его термостойкости, а также снижения температуры спекания в состав стержневой смеси добавляется диоксид титана в количестве 0,3–1,0 %. В [5, 10] отмечено, что целесообразно применять более реакционно-активную анатазную (по сравнению с рутилом) модификацию TiO_2 .

Интенсификация диффузионных процессов и образование твердого раствора диоксида титана в электрокорунде при обжиге стержней происходит за счет наличия в TiO_2 большой концентрации вакансий (до 15 % в объеме при стехиометрическом составе). Происходит искажение кристаллической решетки электрокорунда и, как следствие, более активное спекание и рекристаллизация в материале [10].

На основании анализа температурно-временных условий процесса литья лопаток с равноосной, направленной и монокристаллической структурами, а также многолетнего производственного опыта сформированы главные требования к керамическим материалам стержня и оболочковой формы (таблица 1.1) [4].

Также нужно учитывать, что при кристаллизации сплава керамическая форма и стержень нагреваются до температур проведения процесса литья, поэтому необходимо выполнять требование примерного равенства их КТР, что уменьшает деформацию стержня и снижает брак по разностенности лопаток [13].

Таблица 1.1 – Требования к керамическим стержням и оболочковым формам для литья лопаток ГТД, полученным разными методами [4]

Основные свойства материала	Равноосное литье		Направленная кристаллизация		Монокристаллическая технология	
	Керамический стержень	Оболочковая форма	Керамический стержень	Оболочковая форма	Керамический стержень	Оболочковая форма
Огнеупорность, °С	> 1600	> 1600	> 1650	> 1650	> 1700	> 1700
Стойкость к действию сплавов	Химическая инертность к жаропрочным сплавам					
Усадка при обжиге, %	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0,8	< 0,8
Открытая пористость, %	38–42	34–37	33–38	29–30	33–38	28–29
Предел прочности при изгибе, МПа при: 20°С 1400°С 1500°С	12–16	3–8	15–20	15–17	18–25	25–31
	2,5–4	1,5–4	8–10	-	-	-
	-	-	2,5–3	3–4	3–3,5	3,5–4
Температура начала деформации, °С (нагрузка 0,2 МПа)	1450–1480	1350–1450	1550–1570	1550–1590	1580–1600	1590–1630
Коэффициент линейного термического расширения, $10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$ ($t=20-1200^\circ\text{C}$)	4,5–8,5	6,5–8,5	8,5–8,7	8,5–8,7	9–10	9–10
Коэффициент теплопроводности Вт/мК (при 1200 °С)	-	1,7–2,1	-	2,2–2,5	-	2,4–3,0
Шероховатость поверхности Ra, мкм	2–5					
Точность геометрических размеров, мм	$\pm(0,1-0,15)$					
Способ удаления керамического материала	В растворах щелочей (открытая ванна или автоклав низкого давления) и ГДУ*	Механическое	В растворах щелочей (автоклав высокого давления) или расплавах фтористых солей и ГДУ*	Механическое	В растворах щелочей (автоклав высокого давления) или расплавах фтористых солей и ГДУ*	Механическое

*Гидродинамическая установка

1.2 Выбор основных материалов для керамических стержней

В связи с тяжелыми условиями работы формы при литье из тугоплавких металлов к огнеупорным материалам предъявляются высокие требования:

- 1) Высокая огнеупорность
- 2) Малая упругость диссоциации оксида
- 3) Высокая химическая стойкость
- 4) Не должны содержать элементов, переходящих в расплав
- 5) Должны формоваться
- 6) Иметь минимальные изменения размеров при изготовлении, хранении и заливке
- 7) Легко дегазироваться
- 8) Недефицитные
- 9) Безопасны для работающих

В зависимости от степени огнеупорности эти материалы подразделяют на 3 категории:

- 1) Огнеупорные материалы с огнеупорностью от 1580 до 1770 °С
- 2) Высокоогнеупорные материалы с огнеупорностью от 1770 до 2000 °С
- 3) Материалы высшей степени огнеупорности (>2000 °С)

К первой категории относятся огнеупоры на силикатной основе (кварц, силлиманит, форстерит и др.). Для огнеупоров этой группы характерно высокое содержание примесей, которые снижают их огнеупорность.

Рядом исследований доказано [14–16], что огнеупоры на силикатной основе не годятся для литья из тугоплавких металлов (SiO_2 недостаточно огнеупорна и обладает малой химической прочностью)

Упругость диссоциации оксида металла связана с химическим сродством металла к кислороду уравнением:

$$\Delta Z^0 = 4,576T \log P_{\text{O}_2},$$

где ΔZ^0 - изобарно-изотермический потенциал (мера химического сродства Me к O_2); T – температура, °K; $\lg P_{\text{O}_2}$ – упругость диссоциации оксида металла.

Чем более отрицательна величина ΔZ^0 , тем устойчивее оксид Me. По этой причине наименее стойким соединением является SiO_2 . При взаимодействии с тугоплавким металлом SiO_2 легко восстанавливается до SiO . Благодаря летучести SiO реакция восстановления идет непрерывно. Выше 1500 °С наблюдается образование монооксида по реакции:



Известны 22 элемента, простые оксиды которых плавятся при температурах более 1770°С. Однако многие из этих оксидов в качестве формовочных материалов применяться не могут. ThO_2 и UO_2 – радиоактивны, BeO – высокотоксичен, Y_2O_3 , HfO_2 , CeO_2 – дефицитны. Применение некоторых оксидов ограничено их малой склонностью к гидратации, к окислению и восстановлению, а также летучестью при высоких температурах. Легко гидратируются даже влагой воздуха CaO , SrO , BaO , La_2O_3 . Никакой обжиг не может привести к значительному повышению их стойкости.

CaO и NiO легко восстанавливаются тугоплавкими металлами. Оксиды олова и цинка обладают большой летучестью даже при температурах ниже температуры плавления.

При высоких температурах упругость паров некоторых высокоогнеупорных оксидов становится очень значительной. При температуре более 2000°С наблюдается большая летучесть у оксида Cr . Оксид Mg начинает улетучиваться в вакууме при 1600-1700 °С

В настоящее время в качестве высокоогнеупорных материалов наиболее широко применяются оксиды: Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO ; реже Cr_2O_3 , TiO_2 , CaO , BeO , ThO_2 , а также сложные оксиды $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ (циркон), $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (муллит).

Как отмечается в ряде работ [17, 18], очень хорошими огнеупорными материалами являются карбиды ($t_{\text{пл}} \geq 3000$ °С)

Имеются данные о применении некоторых боридов тугоплавких металлов в качестве огнеупорных материалов [17, 18]. Бориды – химически более прочные соединения, чем карбиды. На данный момент наиболее полно исследованы ZrB , TiB , CrB .

Опыты по применению нитридов не привели к положительным результатам вследствие высокой хрупкости и низкой термостойкости.

Весьма перспективным огнеупорным материалом считают тугоплавкие сульфиды [18, 19]. Несмотря на склонность к окислению при высоких температурах, тугоплавкие сульфиды отличаются от других соединений исключительной стойкостью по отношению к расплавленным металлам. В настоящее время большинство тугоплавких соединений производится в ограниченном объеме, и стоимость их очень высока.

Предварительное опробование формовочных материалов, применяемых в литейном производстве, подтвердило, что стержни, изготавливаемые на их основе, не могут быть применены для литья пустотелых лопаток. Стержни из данных формовочных материалов неизбежно вызывали брак отливок по значительным отклонениям деформации и смещению полости, по значительным отклонениям размеров отливок от чертежа. Кроме того, наблюдался химический пригар и ряд других дефектов. Причем в большинстве случаев на одной отливке оказывалось несколько видов брака.

Поэтому были исследованы ранее не применявшиеся в литейном производстве высокоогнеупорные порошки, главным образом оксиды металлов, а также некоторые карбиды и ряд других тугоплавких соединений.

Исследования [3] показали, что выбор состава того или иного стержня зависит от конфигурации отливок и от природы жаропрочного металлического сплава, применяемого при точном литье. В некоторых случаях могут быть применены стержневые смеси на основе таких материалов, как стабилизированный (шамотированный) предварительно отмученный каолин, стабилизированный кремнезем, а также на основе магнезита, хромомagneзита и некоторых других огнеупоров, в частности, на корундовой и муллитокорундовой основе. В других случаях выбор материала для изготовления стержней оказывается весьма ограниченным. Так, например, для некоторых жаропрочных сплавов на никелевой основе положительные результаты достигаются при применении карборундовых стержней (на основе SiC).

Выбор того или иного тугоплавкого оксида должен исходить из ряда специфических условий: например, Al_2O_3 – в случае литья под вакуумом, MgO – в случае необходимости высокого коэффициента термического расширения материала стержня, в некоторых других случаях оказывается устойчивым ZrO_2 [5, 8, 20].

Для изготовления наиболее теплопроводных стержней практический интерес представляет оксид бериллия BeO . Однако следует иметь в виду, что это соединение является токсичным и требует специальных условий работы.

Стержневые смеси на основе тугоплавких порошков значительно дороже формовочных материалов, обычно применяемых в технологии литья. Но в технологии точного литья жаропрочных сплавов применение тугоплавких сыпучих материалов вполне оправдывается во всех тех случаях, когда применение более дешевых формовочных материалов не обеспечивает получение качественных отливок.

В таблице 1.2 [21] приведены основные материалы для изготовления керамических стержней и их физико-химические свойства.

Таблица 1.2 – Основные материалы для изготовления керамических стержней и их физико-химические свойства

Материал	Физико-химические свойства				
	химические	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	Коэффициент линейного расширения, $^\circ\text{C}^{-1}$	
Оксид алюминия (Al_2O_3)	амфотерный	2050	3900	$8,6 \cdot 10^{-6}$	
Оксид циркония (ZrO_2)		2715	5700	$10 \cdot 10^{-6}$	
Оксид бериллия (BeO)		2530	3010	$(5,4-8,9) \cdot 10^{-6}$	
Оксид иттрия (I_2O_3)	-	2410	4840	$7 \cdot 10^{-6}$	
Оксид магния (MgO)	основной	2400	3870	$13,5 \cdot 10^{-6}$	
Оксид кальция (CaO)		2570	3370	$9 \cdot 10^{-6}$	
Диоксид кремния (SiO_2)	кристаллический	кислый	1713	2650	$13,7 \cdot 10^{-6}$
	плавленый	кислый	1713	2200	$0,5 \cdot 10^{-6}$

Важное практическое значение в технологии точного литья приобретают и другие, более сложные системы на основе оксидов, в частности шпинель ($\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) и высокожароупорные силикаты – циркон ($\text{ZrO}_2\cdot\text{SiO}_2$), муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot2\text{SiO}_2$), силлиманит ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) и некоторые другие. Эти материалы (за исключением циркона) обычно получают плавлением.

Циркон нашел применение как формовочный материал при точном литье агрессивных сплавов на основе железа. При невысоких температурах литья лопаток на основе никелевых сплавов (порядка 1600 °) стержни могут также изготавливаться из стабилизированного кремнезема. Как уже сказано, лучшим формовочным материалом на основе SiO_2 в этом смысле является плавный кварц в порошке. Помимо перечисленных материалов для изготовления стержней могут быть также использованы и некоторые другие. Вопрос о применении того или иного тугоплавкого формовочного материала должен решаться применительно к конкретному жаропрочному сплаву и конфигурации отливок.

Все рассмотренные материалы являются высокоогнеупорными, обладающими химической инертностью по отношению к расплавленному металлу.

Оксид алюминия в виде электрокорунда обладает: высокими механическими свойствами и способен не терять их до 1600–1700°C; хорошим КТР, практически не зависящим от температурных воздействий; высокой теплопроводностью; термическая стойкость зависит от плотности готового изделия, так более плотные обладают низкой термостойкостью, а с крупной кристаллизацией в 3–4 раза большей термостойкостью [5]; способен прореагировать с концентрированными растворами кислот и с расплавами щелочей при высоких температурах, что позволяет произвести удаление керамического материала из внутренних полостей отливки химическим путем.

Оксид бериллия обладает высокими механическими свойствами, которые с увеличением температуры медленно снижаются; КТР зависит от температуры и колеблется от $(5,4–8,9)\cdot 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ в интервале температур от 100 до 1000°C [8]; обладает наибольшей теплопроводностью и очень высокой термической

стойкостью; реакционная способность с кислотами зависит от температурных режимов обжига.

Плавленный диоксид кремния обладает высокими прочностными характеристиками; самым низким коэффициентом термического расширения – $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; обладает исключительно высокой термостойкостью; обладает химической устойчивостью против кислот, а при повышении температуры способен реагировать с щелочами. Основная сложность в производстве связана только с процессом обжига.

Керамические изделия из оксида иттрия обладают неплохими механическими характеристиками и небольшой термостойкостью. Коэффициент термического расширения колеблется в пределах $(7,9-9,3) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в интервале температур от 20 до 1600 $^\circ\text{C}$. Оксид иттрия способен растворяться в минеральных кислотах и вступать в реакцию с жидкой водой под давлением, что положительно сказывается на ударяемости керамического материала из внутренних полостей отливки.

Диоксид циркония, оксид магния и оксид кальция не удовлетворяют в полном объеме предъявляемым требованиям.

Диоксид циркония обладает высокими механическими характеристиками. Однако изделия из диоксида циркония менее термостойки. С технологической точки зрения возникает необходимость дополнительного стабилизационного обжига и помола после обжига. Плотность диоксида циркония больше, чем у электрокорунда и составляет $5,56 \text{ г/см}^3$, что отрицательно скажется на седиментационной устойчивости стержневой смеси.

Оксид магния обладает низкими механическими характеристиками и низкой термической стойкостью в сравнении с электрокорундом. Коэффициент термического расширения довольно высок и зависит от температуры, и в интервале температур от 100 до 1000 $^\circ\text{C}$ составляет $(11,7-14,2) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Из технологических преимуществ оксида магния можно выделить его реакционную способность с неорганическими кислотами и подверженность воздействию

водяного пара. Эти свойства являются преимуществом в удаляемости керамического материала из внутренних полостей отливок.

Керамические изделия из оксида кальция обладают низкими механическими характеристиками и высокой термодинамической устойчивостью. Коэффициент термического расширения довольно высок и составляет $(10,2-14,5) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в интервале температур от 20 до 1400°C. Способен взаимодействовать с водой и кислотами.

Наиболее перспективными из всех рассмотренных материалов для изготовления литейных керамических стержней являются оксид алюминия (электрокорунд), оксид иттрия и плавленный диоксид кремния. Недостатком оксида иттрия является его дефицитность и высокая стоимость в Российской Федерации.

Размерная характеристика зерен огнеупорных порошков. Гранулометрический состав порошков подбирается в зависимости от размеров стержней и условий литья.

Регламентирующий зерновой состав формовочных песков (ГОСТ 2138-51) [22] к электрокорундовым порошкам не применяется. На дробленый электрокорунд распространяется ГОСТ 3647-59 [23], действующий в промышленности на абразивные материалы в зерне.

В литейном производстве для изготовления стержней применяются главным образом шлифпорошки, для изготовления драйеров – шлифпорошки и частично шлифзерно, а для изготовления оболочковых форм – микропорошки (для первого слоя, соприкасающегося с металлом) и смеси шлифпорошков с шлифзерном (для наружных слоев). Для изготовления тиглей применяются в основном шлифзерно и шлифпорошки.

Нормы гранулометрического состава огнеупорных порошков. Для практических целей необходимо учитывать не только номера зернистости порошков, но и колебания их гранулометрического состава.

Так как размеры зерен микропорошков по стандарту можно определять двумя методами (микроскопическим и фотоэлектрическим), то и нормы

содержания отдельных фракций для этих порошков регламентируются в соответствии с применяемыми методами анализа.

Удельная поверхность огнеупорных порошков. При изготовлении керамических стержней следует учитывать не только размер фракций порошков, но также и их удельную поверхность. В таблице 1.3 приводится сравнение расчетной и измеренной удельной поверхности электрокорунда нескольких номеров зернистости [8].

Как видно, удельная поверхность, рассчитанная по данным гранулометрического состава, допускаемого стандартом, колеблется для отдельных порошков в тем больших пределах, чем мельче порошок.

Таблица 1.3 – Удельная поверхность в $см^2/г$ электрокорунда различной зернистости [8]

Зернистость	Расчетная	Измеренная
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 определения удельной поверхности используемых фракций порошков для стержневого состава необходимо проводить анализы проб из каждой вновь прибываемой партии.

Распределение связующего вещества на единицу поверхности сыпучего материала может быть рассчитано по формуле [8]:

$$P = \frac{C}{S_0(100-C)} \text{ г/м}^2,$$

где C – количество связующего в шихте в %; S_0 – удельная поверхность электрокорундового порошка в $м^2/г$.

Характер распределения связующего при одном и том же проценте содержании в стержневой смеси в зависимости от удельной поверхности последней наглядно виден на рисунке 1.2 [8].

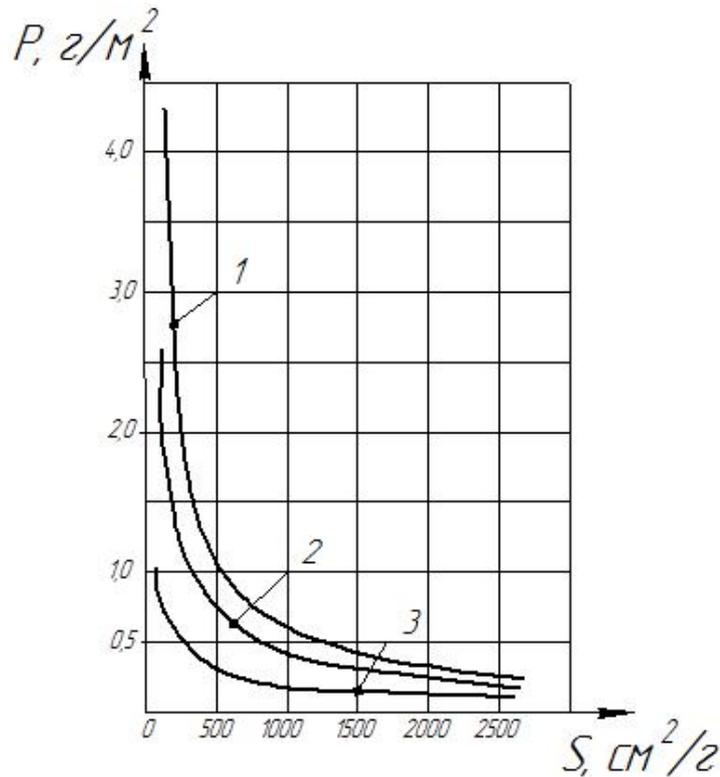


Рисунок 1.2 – Распределение связующего вещества на единицу поверхности сыпучего материала разного гранулометрического состава [8]:

1 – содержание связующего 5 %; 2 – то же, 3 %; 3 – то же, 1 %

Действие связующего вещества наиболее активно проявляется в местах контакта зерен и роль распределения связки на единицу поверхности стержневой смеси тем значительней, чем больше поверхность контакта зерен или чем выше дисперсность исходной смеси [8].

Характер распределения связующего оказывает непосредственное влияние на прочностные и другие свойства стержней. Поэтому необходимо помимо других факторов постоянно учитывать также и количество связующего материала, приходящееся на единицу поверхности стержневой смеси. При этом распределение связующего зависит от способа его введения в смесь порошков, условий смешения и других технологических факторов [8].

1.3 Материалы технологической связки

Все огнеупорные материалы, которые были рассмотрены выше, не обладают пластичностью. Для формирования из порошков непластичных материалов изделия, им придается связанность путем введения технологических связок. Наибольшее распространение получили временные технологические связки органического состава, позволяющие сохранить исходную чистоту изготавливаемой керамики [8].

Параметрами, характеризующими физические свойства технологических связок, являются температура плавления, вязкость, удельный вес, объемная усадка, теплоемкость, теплопроводность.

По своей природе и свойствам технологические связки бывают водорастворимыми, растворимыми в органических жидкостях, бывают твердыми или жидкими, имеют природное и синтетическое происхождение. В качестве пластификатора можно использовать твердые органические связки, такие как парафин, воски (например, пчелиный воск), церезин, стеарин [8].

Наибольшее распространение в отечественном производстве в качестве пластификатора получил парафин.

Парафин - вещество белого цвета, представляющее собой воскоподобную смесь из твердых углеводородов (алканов). Температура плавления парафина находится в интервале от 45 до 65°C, плотность – 808–915 кг/м³. Коэффициент линейного расширения парафина составляет $70 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. В расплавленном состоянии обладает малой вязкостью. Парафин химически инертен к большинству химических реагентов. Окисляется азотной кислотой и кислородом воздуха (при 140°C и выше). Преимуществом парафина является его недефицитность и низкая стоимость. К недостаткам парафина можно отнести: низкую прочность; температуру размягчения – 30°C; склонность к вспениванию в расплавленном состоянии и к образованию усадочных раковин при затвердевании. Химический состав и свойства парафина регламентируются ГОСТом 23683-89 [24].

Пчелиный воск представляет собой многокомпонентное вещество от белого до желто-бурого цвета с медовым запахом. Температура плавления пчелиного воска составляет 62–68°C. Пластичные свойства приобретает при температуре 35°C. Плотность составляет 0,955–0,975 г/см³. ГОСТом 21179-2000 [25] на пчелиный воск устанавливаются марки и технические условия. Достоинством пчелиного воска является его натуральность и безопасность, но также имеет низкую температуру при которой приобретает пластичность.

Церезин представляет собой воскообразное вещество, состоящее из смеси твердых углеводородов, с температурой плавления 65–88°C. Его плотность равна 0,88–0,92 г/см³. У церезина большой коэффициент линейного расширения, так при его нагревании от 20 до 80°C, объем увеличится на 8–10 %, а зависимость от температуры не подчиняется линейному закону. Церезин не растворяется в воде, устойчив к воздействию щелочей и кислот, растворяется в бензоле. Преимущества церезина: имеет высокую температуру размягчения и менее склонен к деформации по сравнению с парафином. К недостаткам церезина относятся: невысокая прочность и твердость; низкая пластичность и большая линейная усадка. ГОСТ 2488-79 [26] в зависимости от температуры каплепадения устанавливает следующие марки: 65, 70, 75, 80.

Стеарин представляет собой твердое полупрозрачное вещество с температурой плавления от 53–65 °C и плотностью 0,92 г/см³. Основным недостатком стеарина является его дефицитность и высокая стоимость. Марка и технические условия стеарина (стеариновой кислоты) устанавливаются ГОСТом 6484-96 [27].

Зависимость изменения вязкости рассмотренных материалов с изменением температуры приведен на рисунке 1.3.

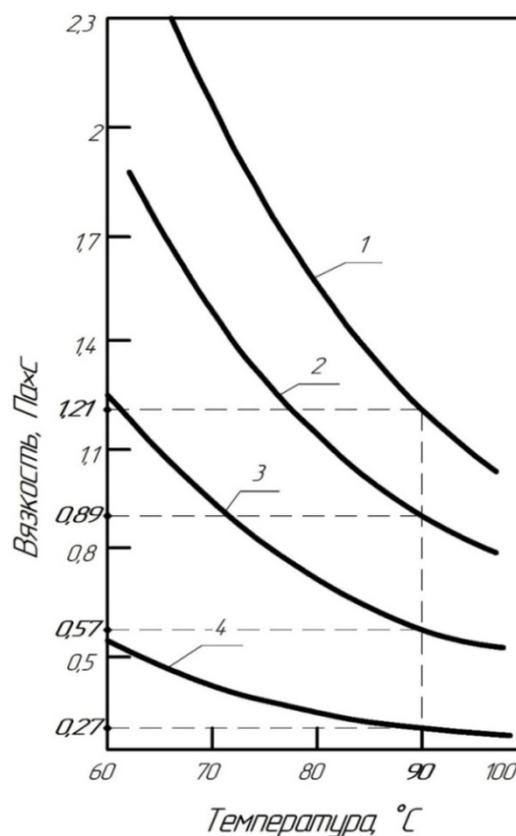


Рисунок 1.3 – Изменение вязкости термопластичной временной связки от температуры: 1–пчелиный воск, 2–церезин, 3–стеарин, 4–парафин [8]

На рисунке 1.4 – представлены зависимости изменения вязкости, литейной способности и подверженности к расслаиванию термопластифицированной стержневой смеси от содержания пластификатора.

Также стоит уделить внимание синтетическим модельным массам без наполнителя. Синтетические модельные массы отличаются стабилизированными свойствами, например, температурный интервал затвердевания более узкий, стабильный коэффициент термического расширения, низкая усадка, стабильная зависимость вязкости от температуры.

Для примера рассмотрим синтетически модельный состав Remet GTR. По заявлению производителя Remet GTR является ненаполненным модельным воском с низкой вязкостью и относительно низкой температурой плавления 60–70°C. Относительная плотность 0,95 г/см³. Не растворяется в воде. Условия, которые следует соблюдать: избегать прямого попадания солнечного света, температура хранения ниже 30°C.

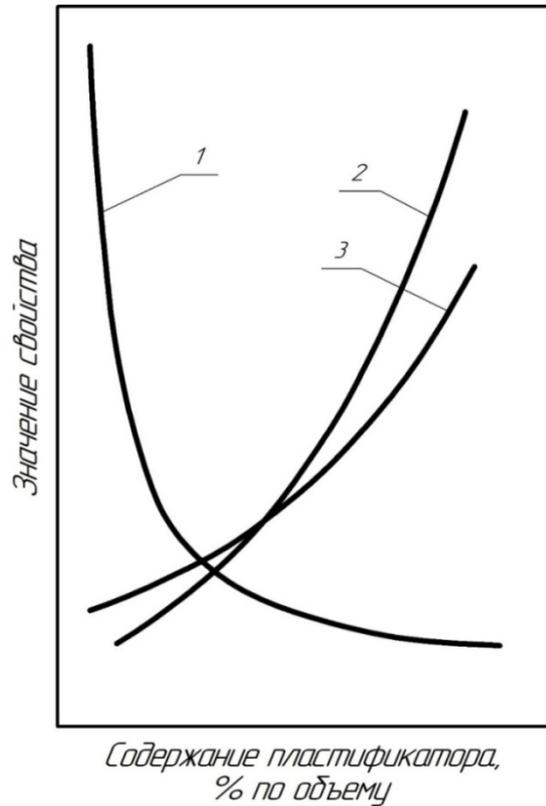


Рисунок 1.4 – Изменение свойств термопластифицированной стержневой смеси в зависимости от содержания пластификатора: 1-вязкость, 2-литейной способности, 3-подверженность к расслаиванию [8]

Для стабилизации и улучшения некоторых свойств, таких, как вязкость, литейная способность, седиментационная устойчивость стержневой смеси в расплавленном состоянии, в состав дополнительно вводят поверхностно активные вещества (ПАВ).

ПАВ повышают поверхностную энергию частиц твердых тел, в результате улучшается их смачивание органическими веществами. В технологии технической керамики наиболее распространена олеиновая кислота ($C_{17}H_{33} - COOH$). Это густая маслообразная жидкость с плотностью $0,898 \text{ г/см}^3$ и температурой плавления $16 \text{ }^\circ\text{C}$. Также хорошей поверхностной активностью обладает воск. Иногда его применяют в смеси с олеиновой кислотой и реже самостоятельно. Дозировка ПАВ обычно находится в пределах $0,5 \text{ \%}$ массы керамического порошка [8].

Все рассмотренные материалы являются термопластичными, используемыми в литейном производстве для разных целей.

Парафин, церезин и стеарин обладают примерно одинаковой плотностью, а плотность пчелиного воска не намного больше. В соответствии с рисунком 1.3, самой низкой вязкостью обладает парафин, чуть больше него стеарин, церезин, а пчелиный воск является самым вязким. Высокая плотность и вязкость положительно влияют на седиментационную устойчивость термопластифицированной смеси. Однако высокая вязкость отрицательно сказывается на литейных способностях стержневой смеси. Низкая вязкость также позволяет снизить процентное содержание термопластификатора в стержневой смеси, что положительно скажется на чистоте керамического стержня от примесей, вносимых через термопластификатор.

По температуре размягчения церезин и пчелиный воск (35°C) обладают лучшими характеристиками, чем парафин (30°C).

Температуры плавления у всех материалов приблизительно одинаковые. Все материалы обладают хрупкостью, низкой прочностью.

В результате проведенного анализа выявили, что парафин, церезин и пчелиный воск являются наиболее пригодными для применения в качестве термопластификатора, но только не в чистом виде, а с дополнительными добавками, которые стабилизируют бы их свойства.

Стеарин в качестве термопластифицирующего материала не пригоден по причине того, что является дефицитным материалом.

Отдельного внимания требуют синтетические модельные массы без наполнителя. Они обладают узким интервалом кристаллизации и низкой вязкостью, низкой усадкой и хорошими механическими свойствами. Они требуют тщательного изучения и являются перспективными в использовании.

1.4 Составы керамических смесей на основе электрокорунда

Составы керамических стержней на основе электрокорунда (Приложение А) [28–38] получили широкое применение. На предприятиях авиационной отрасли в основном используются корундовые керамические стержни, которые отличаются высокой прочностью, геометрической точностью, термохимической устойчивостью при высокотемпературной заливке в вакууме отливок из жаропрочных сплавов, в том числе турбинных лопаток.

Однако существенными недостатками таких стержней являются:

- высокий коэффициент термического расширения;
- повышенная трудоемкость;
- вредные условия труда при удалении их из полостей отливок механическим способом или в агрессивных средах: плавиковой кислоте, расплаве бифторида калия.

В работе [35] рассмотрена смесь для изготовления керамических стержней с электрокорундом, молотым пылевидным кварцем, с увеличенным содержанием кристобаллита 40–50 мас. % и пластификатора на основе парафина. В качестве спекающей добавки добавлялся.

Как и в работах [39-41] удаление стержневой смеси осуществлялось методом выщелачивания. Данный метод менее трудоемок, чем механическое удаление и более экологически безопасен, чем растворение керамических стержней в бифториде калия или других агрессивных средах.

Вместе с тем в предложенном составе [35] стержневая смесь имеет следующие недостатки: из-за содержания β -кварца не менее 50% стержни имеют недостаточную прочность и на этапе обжига и в период заливки форм металлом так как образуется сетка микротрещин, так как при нагреве данная модификация кварца претерпевает ряд полиморфных превращений; из-за высокой дисперсности (не менее 19 мас.%) и повышенной удельной поверхности (500–600 м²/кг) пылевидного кварца происходит большой расход пластификатора. Дисперсность приводит к уменьшению площади контактов между частичками огнеупорного

наполнителя и, следовательно, недостаточной прочности в процессе обжига стержней после твердофазного спекания и как следствие поломки стержней; высокий процент дефектных лопаток по разностенности из-за несоответствия геометрических размеров и конфигурации внутренней полости вследствие недостаточной термостойкости и объемного расширения стержней; высокая трудоемкость подготовки пылевидного кварца, заключающейся в необходимости предварительного прокаливании его до 1300–1350°C в течение 16–24 ч.

1.5 Составы керамических смесей на основе плавленного кварца

Стержни из плавленного кварца (SiO_2) (Приложение А) [42–48] имеют низкий коэффициент температурного и линейного расширения, устойчивы к воздействию металлических расплавов и относительно легко удаляются.

Изобретением [48] является керамика на основе плавленного SiO_2 для изготовления стержней, формирующих полость лопаток ГТД из жаропрочных сплавов. Показано, что в керамической смеси может присутствовать до 40 мас. % спекающие добавки из ряда более тугоплавких оксидов: ZrSiO_4 , ZrO_2 , Al_2O_3 .

Стержни из плавленного кварца в работах [42–48] также имеют недостатки связанные с низкой прочностью (предел прочности при изгибе обычно составляет 10,0–12,0 МПа) и имеют нестабильные фазы основного компонента. При высокотемпературном спекании плавленный аморфный кварц частично расстекловывается с образованием α -кристобалита. При охлаждении α -кристобалит переходит в β -кристобалит с изменением удельного объема. Это приводит к образованию макротрещин, резкому снижению прочности и потере требуемой геометрической конфигурации (коробление) стержня. Приемлемые прочностные свойства сохраняются при максимальном содержании кристаллической фазы не превышающей 15–30 об. %.

В работах [49, 50] рассмотрено понижение температуры спекания до 1100°C для уменьшения или полного отсутствия процесса расстекловывания. Это требует усложнения технологии их получения: пропитка коллоидными растворами

оксидов для интенсивности спекания и упрочнения материала необходима, а также повторный обжиг.

Также в [51] указано, что степень расстекловывания плавленного аморфного кварца зависит от примесей, и особенно от щелочных или щелочноземельных элементов, активирующих этот процесс.

В изобретении [52] получен стержневой состав на основе плавленного диоксида кремния, до 35 мас. % спекающей добавки $ZrSiO_4$, до 5 мас. % ультрадисперсного порошка диоксида кремния и от 1,5 до 6,5 мас. % термически стабильных керамических волокон. Обжиг проводился при температуре 1150–1370°C. Данный состав позволяет снизить дефектность керамических стержней при высокотемпературном обжиге за счет того, что ультрадисперсный порошок кремния (0,007–0,014 мкм) активирует спекание, а термически стабильные керамические волокна снижают усадку и образование макротрещин при обжиге. Недостатком изобретения [52] является применение высокотоксичных веществ. Ультрадисперсные порошки и керамические волокна вызывают профессиональные, в том числе онкологические, заболевания органов дыхания.

Техническим результатом изобретения [42] является разработка стержневой смеси для изготовления керамических стержней, обладающих высокой прочностью, низкой линейной усадкой в процессе обжига, инертностью к жаропрочным сплавам, хорошей растворимостью в водных растворах щелочей.

В качестве спекающей добавки в работе [42] использован порошок из соединений из ряда сиалон $Si-Al-O-N$, а также La_2O_3 , LaB_6 . Также смесь содержит от 5 до 30 мас.% Cr_2O_3 и/или Al_2O_3 , что увеличивает кинетическую стабильность аморфного кварца по отношению к фазоразделению и расстекловыванию, повышает его огнеупорность и сопротивление ползучести.

При обжиге смеси [42] образуются кристобалит, муллит и $\alpha-Al_2O_3$, которые связывают частицы твердого раствора на основе плавленного кварца и способствуют получению стержней точной формы с высоким выходом годного. Недостатком данной стержневой смеси также является недостаточная прочность.

1.6 Методы упаковки полидисперсных частиц в композитных материалах

Для повышения физико-механических свойств керамических стержней и уменьшения склонности их к короблению необходимо подобрать плотную упаковку из фракционного состава порошков Al_2O_3 , SiO_2 , SiC , TiO_2 и других, образующих основу стержневой смеси.

В работах [53, 54] рассмотрены случаи монодисперсной упаковки системы твердых сфер и установлено, что при заполнении объема многократно превышающего радиус заполняющих частиц порошка, достигается максимальная плотность упаковки:

$$\varphi_c = \frac{\pi}{\sqrt{18}} \approx 0,74 \quad (1.1)$$

Данное значение достигается если располагать центры сфер в узлах плотной гексагональной или гранецентрированной кубической решетки [53, 54]. При неупорядоченной упаковке сфер численные и практические эксперименты показывают максимальное значение $\varphi_a \approx 0.64$ [55]. Данное значение используется при практических оценках, когда в системе не определен механизм расчета дальнего порядка расположения сфер.

Исследователи [56, 57] при решении задачи плотной упаковки полидисперсной системы предполагают, что наиболее плотное заполнение некоторого пространства достигается при последовательном заполнении начиная с максимально крупной фракции и далее соответствующих по размеру образующихся пор менее крупных фракций до минимального размера сфер r_{min} .

Теоретически данный способ [56] позволяет достичь плотности заполнения близкой к 1 в зависимости от модели укладки сфер. Недостатком данного способа является сложность осуществления процесса заполнения пор конкретным размером фракций.

Авторами [58] предложено использовать аналогию с теорией вязкости суспензии для получения совокупности сферических частиц с заданным распределением по радиусам.

В работе [59] предложена модель заполнения пор образующихся от максимального размера фракций не одной, а несколькими частицами меньшего радиуса и далее до достижения r_{min} .

Плотность заполнения φ_n , которая получается в результате последовательной укладки сфер радиусов, вычисляется по формуле [58]:

$$\varphi_n = \frac{1}{V_{tot}} \sum_{i=0}^n V_i n_i = \varphi_0 \left(1 + \sum_{i=0}^n \frac{r_i^2 n_i}{r_0^2 n_0} \right) \quad (1.2);$$

где V_{tot} – объем заполняемого пространства, n_i – количество сфер i -го радиуса, V_i – объем сферы, φ_0 – плотность укладки сфер максимального радиуса. Считая укладку неупорядоченной, предполагается $\varphi_0 = \varphi_a = 0.64$.

Оптимальный состав систем состоящих из трех фракций имеющих большой разрыв в размерах примерно соответствует 60–65 % крупной фракции, 25–30 % средней и около 10 % мелкой [60–62]. От схемы плотной упаковки будут зависеть свойства изготавливаемых материалов.

Однако этой формулой нельзя воспользоваться для стержней, т.к. отсутствуют поправочные коэффициенты, которые определяются экспериментально.

Исследователями [63] описана методика, в которой показано, что уплотнение глинистого и грубозернистого компонента смеси происходит по-разному. Пористость такой прессовки может быть рассчитана по формуле:

$$\Pi = V_n / V = 1 - \rho / \gamma_{ТВ} = 1 - K_{ТВ} \quad (1.3)$$

где V_n – объем пустот (пор) в материале; V – полный объем материала; ρ – общая плотность (насыпная, кажущаяся плотность спрессованного или обожженного изделия); $\gamma_{ТВ}$ – истинная плотность (удельный вес) твердого вещества, $K_{ТВ}$ – коэффициент упаковки.

Общая плотность прессовки (включая поры) ρ рассчитывается по формуле [57]:

$$\rho = 1 / ((m_3 \rho_3 + (1 - m_3) / \rho_{\Pi}) , \quad (1.4)$$

где m_3 – массовая доля заполнителя в прессовке, ρ_3 – плотность заполнителя в прессовке; ρ_{Π} – плотность связки в прессовке.

Для ограниченного набора фракций сферических частиц наиболее плотная упаковка достигается при плотной гексагональной упаковке с распределением зерен с размерами D , $(\sqrt{2}-1)D$, $((\sqrt{6}/2)-1)D$, $((2\sqrt{3}/3)-1)D$ в количественном соотношении 1:1:1:1. При этом пористость составит 18,8%. С точки зрения статики гексагональная упаковка частиц неустойчива и технологическая реализация ее затруднена. Более устойчивой является гексагонально-призматическая упаковка частиц, и наиболее технологически осуществимыми являются кубическая или гексагонально-призматическая упаковки [64].

В работе [65] сравнивали экспериментальные и расчетные зависимости плотности оптимальных составов смесей кварцевого песка от способа засыпки. По результатам планирования эксперимента показано, что наибольшее приближение к экспериментальному оптимальному зерновому составу получено по расчетам на основе формулы Функа/Дингера с коэффициентом распределения n , равным 0,5:

$$G_{\text{пр}} = 100 \frac{X^n - D_{\text{min}}^n}{D_{\text{max}}^n - D_{\text{min}}^n}, \quad (1.5)$$

где $G_{\text{пр}}$ – проход частиц, %, через сито размером X , мм; D_{max}^n – наибольшая крупность зерна в смеси, мм; D_{min}^n – наименьшая крупность зерна в смеси, мм.

Также показано [65], что необходимо вводить коэффициенты формы зерна, так как реальная форма зерен зачастую отличается от шарообразной [66]. Коэффициент формы шара равен единице и чем больше форма зерен отличается от идеальной сферической формы, тем большую долю в зерновом составе должна занимать меньшая фракция [67]. Максимальный предел плотности упаковки для кубов и сфероцилиндров составляет 67 %, для сферических частиц – 64 %. «Эффект стенок» увеличивающий плотность упаковки при малом количестве частиц в объеме системы обусловлен наличием повышенной пористости между частицами вблизи стенок пресс-формы. Данный эффект уменьшается при повышении дисперсности частиц и увеличении их численной концентрации в системе.

Графики зависимостей эталонных кривых просеивания, построенные как по уравнению Функа/Дингера при двух значениях коэффициента распределения (0,5 и 0,37), так и по уравнению (1.5) с дополнительными коэффициентами формы зерен приведены на рисунке 1.5. Из графика видно, что коэффициент n оказывает влияние в основном на содержание средних фракций.

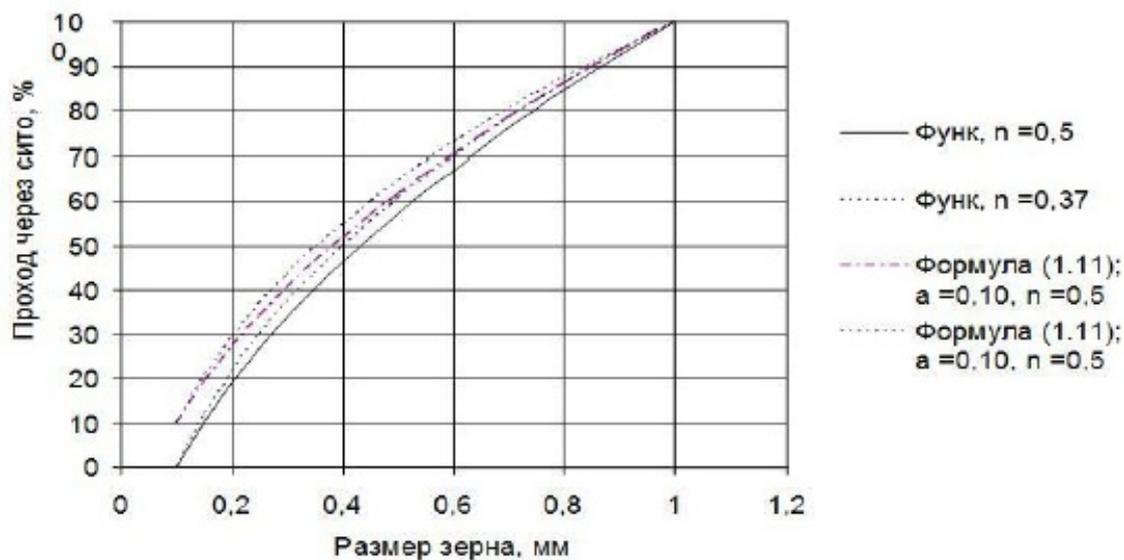


Рисунок 1.5 – Сравнение расчетов оптимального состава сыпучей системы по известным моделям упаковки [58]

Данные методы получения кривой гранулометрического состава предполагает проведение испытаний и тщательную классификацию исходных составов компонентов смеси, что является трудоемким и дорогостоящим процессом.

В работах [65, 66, 68, 69] разработаны компьютерные программы, позволяющие быстро и с заданной степенью точности оптимизировать зерновой состав композиций из любого количества компонентов, которые логично использовать для расчета стержневой смеси с учетом особенностей химического и фракционного состава стержней. рассмотренные методы имеют в основном теоретическую направленность и не учитывают каркасообразующей фракции и размерной геометрической последовательности фракционного состава.

Также не учитывается специфика формирования стержней. Например, не полное спекание при обжиге стержней. Представленные расчетные формулы требуют поправочных коэффициентов, которые можно получить только экспериментально. При формировании фракционного состава стержней не стоит задача обеспечения максимальной плотности – необходимо обеспечить геометрическую размерную точность и стабильность, минимальную усадку и устойчивость к короблению. Отличительной особенностью стержневой смеси является наличие каркасообразующей фракции.

Каркасообразующими фракциями в стержне являются порошки F 120 и F100. Они формируют основную конструкцию стержня и от них зависит размерная стабильность, склонность к усадке и короблению. Вторая группа фракции заполняет образовавшиеся поры, образованные порошками 120 мкм и 100 мкм, и придает устойчивость конструкции. Для устойчивости этой конструкции необходимо заполнить эти поры не только мелкими фракциями, а рассчитанной размерной фракцией. Назначение третьей мелкой фракции, состоит в том, чтобы заполнить мелкие поры, образованные второй группой фракции и обеспечить необходимую шероховатость поверхности. Гранулометрические фракции составляющей стержневой смеси выполняют определенные функции при спекании стержней. Поэтому гранулометрический состав стержня оказывает влияние на спекаемость стержня при обжиге, структуру, физико-механические свойства, склонность к короблению и на усадку [10].

Поэтому необходимо правильно выбрать размерную последовательность фракционного состава порошков и соблюсти синхронность между компонентным и фракционным составами стержневой смеси.

1.7 Выводы по главе 1

1. В литературном обзоре представлена и проанализирована информация, касающаяся способов получения керамических стержней и их применения, а также требований, предъявляемых к стержневым составам для получения качественных охлаждаемых лопаток ГТД.
2. Рассмотрены и проанализированы различные составы стержневых смесей и основных материалов, применяемых в качестве базового наполнителя, показано, что для сложнопрофильных и тонкостенных лопаток ГТД, получаемых из жаропрочных никелевых сплавов, предпочтение следует отдать огнеупорным наполнителям из электрокорунда и плавленого кварца.
3. Рассмотрены основные механизмы упрочнения и влияния материалов на свойства стержневой смеси, в том числе понижения температуры спекания при сохранении прочностных и геометрических показателей.
4. Выполнен анализ методов получения плотной упаковки составов с различными фракциями, показано, что отличительной особенностью стержневой смеси является наличие каркасообразующей фракции. Гранулометрические фракции составляющей стержневой смеси выполняют определенные функции при спекании стержней, поэтому для стержневой смеси необходимо правильно выбрать размерную последовательность фракционного состава порошков и соблюсти синхронность между химическим и фракционным составами стержневой смеси.

1.8 Цель и задачи исследования

Выполненный обзор литературных источников позволил сформулировать цель и задачи исследования.

Целью данной работы является разработка новой стержневой смеси для охлаждаемых лопаток ГТД, обладающей необходимой прочностью при высоких температурах и оптимальным коэффициентом термического расширения.

Основное внимание было уделено решению следующих задач:

- проведению выбора и оптимизации материалов, химического и фракционного состава разрабатываемой стержневой смеси применительно к автоматизированному оборудованию;
- разработке критериев оценки пригодности стержневой смеси для применения на автоматизированном оборудовании;
- созданию программного обеспечения для ЭВМ с целью построения теоретической кривой седиментации и оперативного сравнительного анализа;
- экспериментальному исследованию физико-химических и механических свойств разработанной стержневой смеси.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Методика расчета оптимального гранулометрического состава стержневой смеси

Дисперсность – физическая величина, которая характеризует размер взвешенных частиц в дисперсных системах, показывающая сколько частиц можно уложить вплотную в одном кубическом метре.

Однако порошки состоят из частиц, отличающихся по величине друг от друга. При этом количество частиц того или иного размера в разных порошках может быть различным. В связи с этим в качестве другой характеристики порошка существует понятие о гранулометрическом составе.

Гранулометрическим составом порошка называется соотношение количества (обычного весового) частиц различных размеров, составляющих порошок. Гранулометрический состав порошка при постоянной условной дисперсности оказывает существенное влияние на свойства стержневой смеси.

Дисперсность порошка оказывает влияние не только на плотность упаковки и литейные свойства стержневых смесей, но и на огневую усадку образцов, отлитых из данных смесей. При постоянной плотности упаковки частиц в полуфабрикate огневая усадка, казалось бы, должна быть постоянной, однако в зависимости от дисперсности и гранулометрического состава порошка огневая усадка может изменяться даже при постоянном значении коэффициента упаковки.

При оптимизации гранулометрического состава нужно исходить из того, что стержни должны обладать минимальной усадкой, низкой шероховатостью поверхности, высокой прочностью и оптимальной пористостью.

Твердые составляющие стержневых смесей применяются в виде порошков. Сделаем допущение, что эти порошки имеют идеальную шаровидную форму.

Таким образом, задача разработки стержневых смесей сводится к геометрической задаче размещения шаров внутри некоторой области

пространства при дополнительном условии, что они не должны быть сжимаемы, то задача эквивалентна построению уплотняющей упаковки шаров.

Наибольшая плотность упаковки шаров одинакового диаметра в пространстве достигается в случае 12 точек контакта одного шара с другими.

Рассмотрели расположение шаров, как представлено на рисунке 2.1.

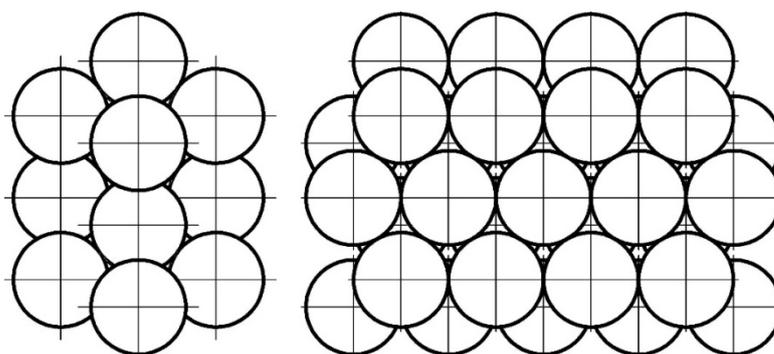


Рисунок 2.1 – Схема расположения

Диаметр шаров первого порядка обозначили d . Рассмотрели треугольник ABC – он равносторонний, $AB = BC = AC = d$, (рисунок 2.2).

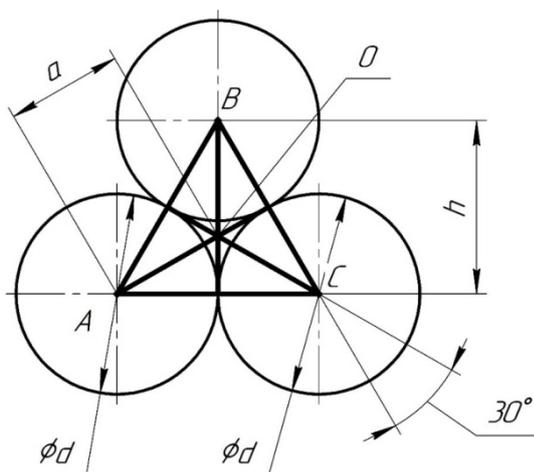


Рисунок 2.2 – Расчетная схема

Определили AO . Обозначили его через букву a .

$$\cos ACB = \cos 30^\circ = \frac{CH}{CO} = \frac{\frac{d}{2}}{a} = \frac{d}{2a} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

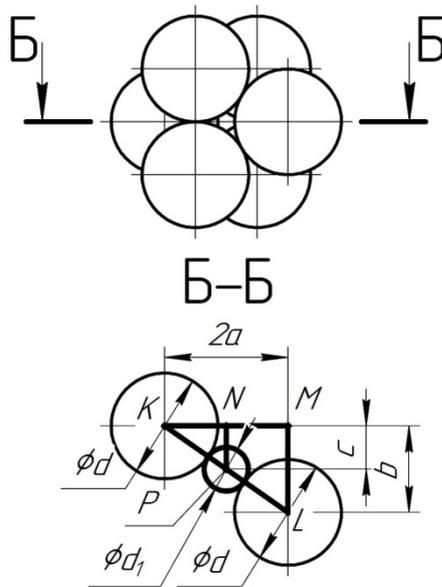


Рисунок 2.4 – Расчетная схема для определения диаметра шаров второго порядка

Диаметр шаров второго порядка обозначили d_1 .

Рассмотрели треугольник KLM – он прямоугольный.

$$d_1 = KL - d$$

$$KL = \sqrt{(2a)^2 + b^2} = \sqrt{4 \cdot \frac{3 \cdot d^2}{9} + \frac{6 \cdot d^2}{9}} = \sqrt{2} \cdot d.$$

Отсюда d_1 :

$$d_1 = \sqrt{2} \cdot d - d = d \cdot (\sqrt{2} - 1).$$

Определили диаметр шаров третьего порядка. Для этого снова рассмотрели рисунок 2.3. Диаметр шаров обозначили d_2 .

В треугольнике EJF: $EF = d$; $EO = b$; $EH_1 = \frac{d}{2}$.

$$\cos \angle FEO = \frac{EH_1}{EJ} = \frac{EO}{EF} = \frac{b}{d} = \frac{\frac{\sqrt{6}}{3} \cdot d}{d} = \frac{\sqrt{6}}{3}$$

$$EJ = EJ = \frac{EH_1 \cdot EF}{EO} = \frac{\frac{d}{2} \cdot d}{\frac{\sqrt{6}}{3} \cdot d} = \frac{3 \cdot d}{2 \cdot \sqrt{6}} = \frac{\sqrt{6} \cdot d}{4}$$

$$EJ = \frac{d}{2} + \frac{d_2}{2} = \frac{\sqrt{6} \cdot d}{4}.$$

Отсюда

$$d_2 = \frac{\sqrt{6} \cdot d}{2} - d = d \cdot \left(\frac{\sqrt{6}}{2} - 1 \right)$$

Диаметр шаров четвертого порядка определили методом построения. Схему определения представили на рисунке 2.5.

С помощью инструментов измерения в CAD-системе измерили диаметр и записали его от d .

$$d_3 = 0,17665 \cdot d$$

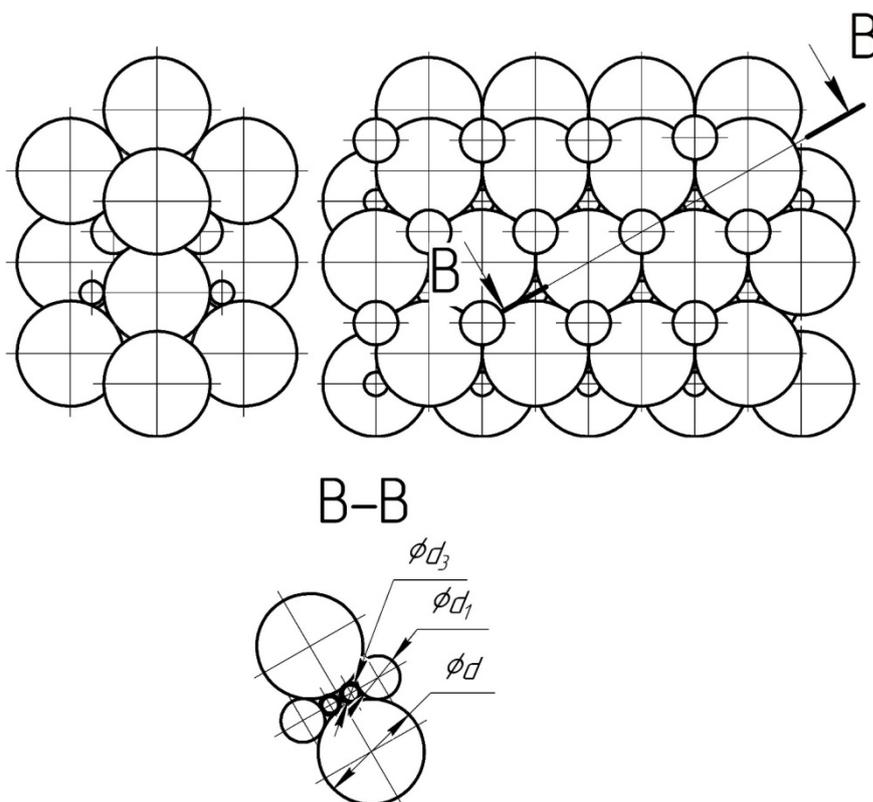


Рисунок 2.5 – Схема определения диаметра шаров 4-го порядка

Результат построения объемно-математической модели представили на рисунке 2.6.

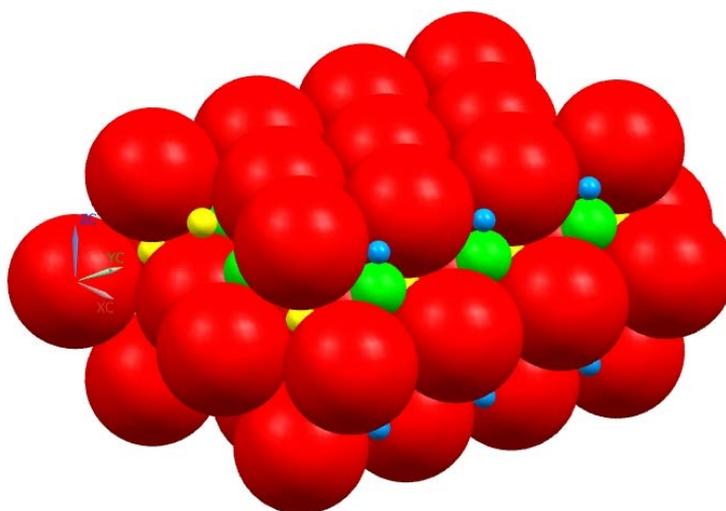


Рисунок 2.6 – Объемно-математическая модель упаковки шаров

Вырезали из построенной объемно математической модели куб размерами $d \times d \times d$, (рисунок 2.7).

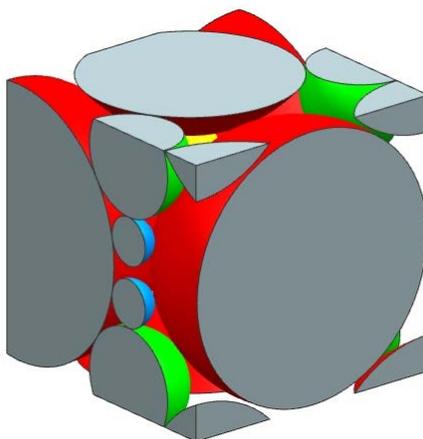


Рисунок 2.7 – Куб с размерами $d \times d \times d$

Плотность упаковки шаров определили по следующей формуле:

$$k_{уп} = \frac{V_{ш}}{V_{п}},$$

где $k_{уп}$ – коэффициент упаковки, $V_{ш}$ – суммарный объем шариков, $V_{п}$ – объем рассматриваемой единицы объема в виде куба со стороной d .

С помощью инструментов измерения в CAD-системе определили объемы, и результаты расчета занесли в таблицу.

2.2 Методика расчета седиментации дисперсных систем в поле действия сил гравитации

Седиментация (осаждение) – оседание частиц дисперсной фазы в жидкости или газе под действием гравитационного поля или центробежных сил.

Седиментационная устойчивость – это один из важнейших технологических свойств термопластифицированной стержневой смеси в расплавленном состоянии. Она определяет возможное время стояния стержневой смеси в расплавленном состоянии без перемешивания.

Скорость седиментации (v) зависит от массы, размера (r), формы и плотности вещества частицы (ρ), вязкости (η) и плотности среды (ρ_0), а также от ускорения, силы тяжести (g) и действующих на частицы центробежных сил.

Из источника [70] взяли формулу скорости движения частиц:

$$v = \frac{2 \cdot g \cdot (\rho - \rho_0) \cdot r^2}{9 \cdot \eta}, \quad (2.1)$$

Допустили, что процесс седиментации протекает в емкости, у которой площадь поперечного сечения по всей высоте одинакова. На рисунке 2.8 привели расчетную схему.

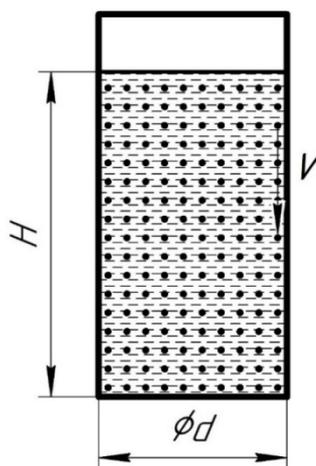


Рисунок 2.8 – Расчетная схема седиментации для монодисперсной системы

Ввели следующие условные обозначения (таблица 2.1):

Таблица 2.1 – Условные обозначения для расчета седиментационных свойств

Название	Обозначение	Единица измерения
Масса осадка	m	кг
Общая масса дисперсной системы (масса готовой стержневой смеси)	M	кг
Масса дисперсной среды (термопластификатора)	M_s	кг
Общая масса дисперсной фазы (керамической основы)	M_f	кг
Масса i -го компонента дисперсной фазы (керамической основы)	M_i^f	кг
Общий объем дисперсной системы	V	m^3
Объем дисперсной среды	V_s	m^3
Объем дисперсной фазы	V_f	m^3
Процентное содержание дисперсной среды в дисперсной системе	ω_s	%
Процентное содержание i -го компонента от общей массы дисперсной фазы	ω_i	%
Плотность i -го компонента дисперсной фазы	ρ_i	$\frac{кг}{m^3}$
Размер частицы i -го компонента дисперсной фазы	r_i	м
Высота столба дисперсной системы в рассматриваемой емкости	H	м
Площадь поперечного сечения емкости	S	m^2
Время	τ	с

Приняли, что в начальный момент дисперсная фаза равномерно распределена по всей высоте H , тогда масса дисперсной фазы, приходящейся на единицу высоты столба будет равна $\frac{M_f}{H}$. Из этого следует, что через площадь поперечного сечения S емкости проходит $\frac{M_f}{H} \cdot V$ кг/с дисперсной фазы.

В результате, массу вещества, осевшую за период времени τ определили по формуле, [69].

$$m(\tau) = \frac{M_f}{H} \cdot v \cdot \tau. \quad (2.2)$$

Первоначальную высоту столба дисперсной системы H в емкости определили по следующей формуле:

$$H = \frac{V}{S}.$$

Объем дисперсной системы вычислили по формуле:

$$\begin{aligned} V = V_s + V_f &= \frac{M_s}{\rho_0} + \frac{M_f}{\rho} = \frac{M}{100\% \cdot \rho_0} \cdot \omega_s + \frac{M - \frac{M}{100\% \cdot \rho_0} \cdot \omega_s}{\rho} = \\ &= M \cdot \left(\frac{\omega_s}{100\% \cdot \rho_0} + \frac{1 - \frac{\omega_s}{100\%}}{\rho} \right). \end{aligned} \quad (2.3)$$

График изменения массы осадка от времени для монодисперсной системы представили на рисунке 2.9.

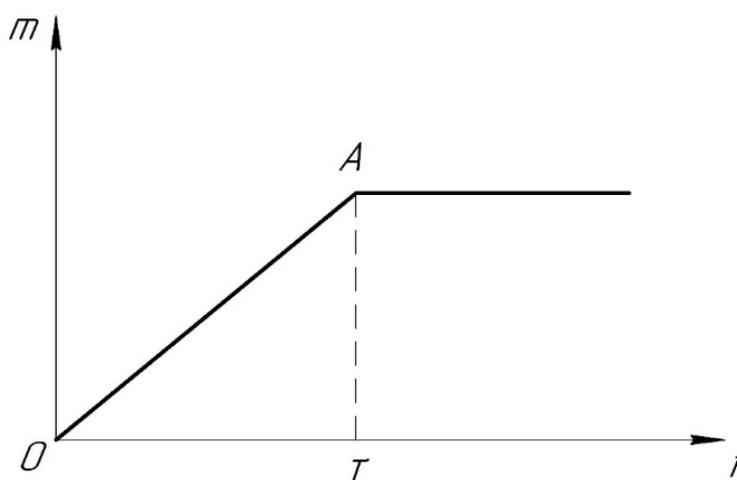


Рисунок 2.9 – График изменения массы осадка от времени для монодисперсной системы, [63]

Рассмотрели полидисперсную систему. В полидисперсной системе частицы каждой фракции осаждаются со своей скоростью. Обозначили ее m_i . Подставили в формулу 2.2 формулу 2.1:

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

где K и C_i – коэффициенты пропорциональности.

$$K = \frac{2 \cdot g}{H \cdot 9 \cdot \eta'}$$

$$C_i = M_i^f \cdot (\rho_i - \rho_0) \cdot r_i^2.$$

В полидисперсной системе частицы каждой фракции осаждались со своей скоростью. Массу суммарного осадка, выпавшую ко времени τ , определили соотношением, [71]:

$$\begin{aligned} m(\tau) &= K \cdot C_1 \cdot \tau + K \cdot C_2 \cdot \tau + K \cdot C_3 \cdot \tau + \dots = \\ &= (C_1 + C_2 + C_3 + \dots) \cdot K \cdot \tau. \end{aligned} \quad (2.4)$$

После выпадения первой фракции указанное соотношение приняло следующий вид, [70].

$$m(\tau) = m_1 + (C_2 + C_3 + \dots) \cdot K \cdot \tau.$$

После выпадения второй фракции получили, [18, стр. 233]:

$$m(\tau) = m_1 + m_2 + (C_3 + C_4 + \dots) \cdot K \cdot \tau.$$

Для полидисперсной системы, объем вычислили по следующей формуле

$$\begin{aligned} V = V_s + V_f &= \frac{M_s}{\rho_0} + \sum_{i=1}^n \frac{M_i^f}{\rho_i} = \frac{M}{100\% \cdot \rho_0} \cdot \omega_s + \sum_{i=1}^n \left(\frac{M - \frac{M}{100\%} \cdot \omega_s}{\rho_i} \cdot \frac{\omega_i}{100\%} \right) \\ &= \\ &= M \cdot \left(\frac{\omega_s}{100\% \cdot \rho_0} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1 - \frac{\omega_s}{100\%}}{\rho_i} \cdot \frac{\omega_i}{100\%} \right) \right). \end{aligned} \quad (2.5)$$

График изменения массы осадка от времени для полидисперсной системы представили на рисунке 2.10.

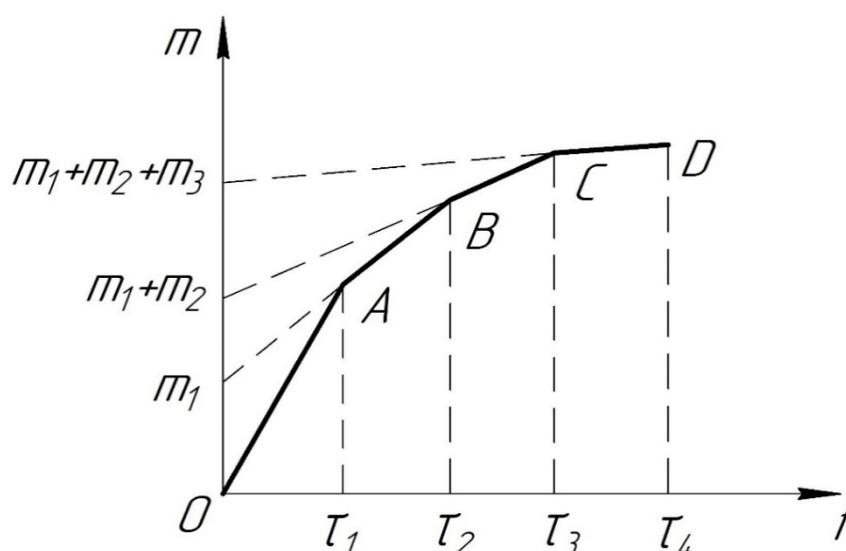


Рисунок 2.10 – График изменения массы осадка от времени для полидисперсной системы, [70]

2.3 Методика определения предела прочности и прогиба при изгибе

Предел прочности ($\sigma_{\text{н}}$) и стрелу прогиба (f) образцов из стержневых материалов определяли испытанием образцов-пластин размерами 70x20x4 мм при 3х-точечном статическом изгибе согласно ГОСТ Р 50523-93 [72]. В процессе эксперимента нагружающее усилие F прикладывалось перпендикулярно к поверхности прямоугольного образца (рисунок 2.11), расположенного на двух призматических опорах с расстоянием между ними 60 мм (рисунок 2.12).



Рисунок 2.11 – Внешний вид образца для термомеханических испытаний

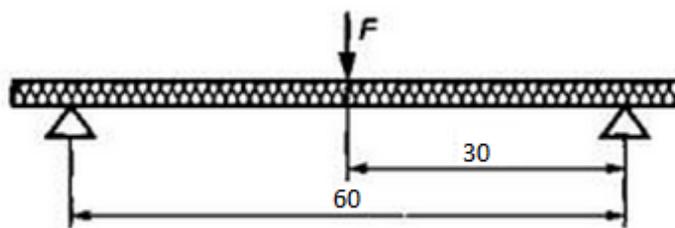


Рисунок 2.12 – Схема испытания образца при изгибе

Предел прочности с использованием полученных экспериментальных данных рассчитывали по формуле [73]:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x}, \text{ МПа,} \quad (2.6)$$

где M – изгибающий момент, МН·м; W_x – осевой момент сопротивления сечения, м³.

Величины изгибающего момента M и осевого момента сопротивления W_x при заданных значениях изгибающей нагрузки F , расстоянии между опорами L , ширине b и толщине h образца определяли по известным формулам [63].

Образцы подвергали обжигу при температурах 1250 и 1360°С в течение 5ч.

Испытание термомеханических свойств стержневых материалов производили на установке INSTRON 5982 (рисунок 2.13), позволяющей определять предел прочности и прогиб при 3-х точечном изгибе образцов в интервале 20–1200°С с регистрацией скоростей нагружения и деформации образцов на самопишущих электронных приборах.

Определение σ_u и f образцов производили при температурах 20, 800, 1000 и 1200°С.

Отметим, что для снижения влияния термоудара, загрузку образца в печь производили при температуре в ней не более 600°С. Дальнейший нагрев образца до более высоких температур испытания (свыше 600°С) осуществляли уже непосредственно с печью.



Рисунок 2.13 – Внешний вид установки для исследования термомеханических свойств

После выдержки в заданных условиях в течение 30 мин с целью выравнивания температуры по сечению образца его при поднятом нагружающем стержне помещали на призмы опоры. Затем стержень аккуратно опускали вниз до соприкосновения его клиновидного наконечника с поверхностью образца, после чего производили нагружение образца со скоростью 5 Н/с.

Деформацию образца при изгибе во времени определяли электронным индикатором, выводящим данные на электронный носитель.

Размеры образцов, используемые при расчетах, измеряли с помощью микрометра с погрешностью, не превышающей 0,01 мм.

Разброс данных отдельных испытаний не превышал 5–10 % от среднего.

2.4 Методика определения относительной усадки при обжиге

Величину относительной усадки (в %) при обжиге определяли из выражения:

$$\Delta l = \frac{l_n}{l_k} \cdot 100 \% \quad (2.7)$$

где l_n и l_k - соответственно начальная и конечная величина некоторой размерной характеристики образца: длины (Д) и ширины (Ш).

Для измерения размеров образца использовали мерительный инструмент с абсолютной погрешностью не более 0,01 мм.

2.5 Методика определения кажущейся пористости

Определение кажущейся плотности и открытой пористости стержневых материалов производили методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 2409-2014 [74].

Для исследований использовали образцы, вырезанные из пластин для механических испытаний.

В соответствии с методикой эксперимента необходимо:

-высушить образец в течение 2ч при температуре 110°C–135°C до постоянной массы;

-охладить образец до комнатной температуры;

-определить массу сухого образца на аналитических весах с абсолютной погрешностью не более $\pm 0,01$ г;

-далее загрузить образец в вакуумный шкаф и вакууммировать его в течение 15 минут;

-извлечь образец из шкафа, поместить его в стакан, залить стакан дистиллированной водой так, чтобы уровень жидкости над образцом был не менее 20 мм;

-установить стакан с образцом на электрическую плиту и нагреть воду до кипения. Выдержать образец в кипящей воде в течение 30–40 минут;

-перенести образец в холодную дистиллированную воду и выдержать в течение 5 минут;

-извлечь образец из стакана и выполнить его взвешивание в состоянии, когда он полностью погружен в дистиллированную воду (гидростатическое взвешивание в соответствии со схемой, показанной на рисунке 2.14;

- извлечь образец из воды, осушить его поверхности фильтровальной бумагой и взвесить на аналитических весах с точностью 0,01 г.

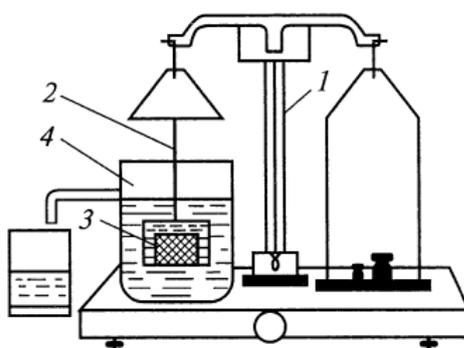


Рисунок 2.14 – Гидростатические весы для определения водопоглощения, кажущейся плотности и открытой пористости [74]:

1 – весы; 2 – подвески; 3 – испытуемый объект; 4 – стакан со сливной трубкой

Величину кажущейся (открытой) пористости определяли с использованием полученных данных из выражений:

$$\Pi_{\text{к}} = \frac{m_1 - m_0}{m_1 - m_2} \cdot 100\% \quad (2.8)$$

где m_0 – масса сухого образца, кг; m_1 – масса образца, насыщенного водой, кг; m_2 – масса образца в воде (полученная гидростатическим взвешиванием), кг.

Кажущуюся плотность определяли по формуле:

$$\rho_{\text{каж}} = \frac{m_0}{m_1 - m_2} \cdot \rho_{\text{ж}} \quad (2.9)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность насыщающей жидкости.

Плотность дистиллированной воды при 20°C была, в соответствии с [64], была принята равной 998 кг/м³.

Общую пористость определяли по формуле

$$\Pi_0 = \frac{\rho - \rho_{\text{каж}}}{\rho} \cdot 100\% , \quad (2.10)$$

где ρ – истинная плотность материала, которую рассчитывали по формуле:

$$\rho = \frac{m_0}{m_2 + m_0 - m_1} \rho_{\text{ж}} , \quad (2.11)$$

Тогда закрытая пористость легко находится из выражения:

$$\Pi_3 = \Pi_0 - \Pi_{\text{к}}.$$

2.6 Методика определения шероховатости поверхности образцов

Параметры шероховатости поверхности образцов определяли по стандартной методике на профилографе АБРИС-ПМ7 (рисунок 2.15). Базовая длина измерения, с учетом предполагаемого качества поверхности образцов, была принята равной 2,5 мм.



Рисунок 2.15 – Изображение профилографа АБРИС-ПМ7

Образец устанавливали в зажим профилографа. На него устанавливали датчик и производили измерения с точностью до 0,1 мкм.

2.7 Методика определения термического расширения

Экспериментальное определение термического расширения проводили на горизонтальном оптическом дилатометре MISURA® ODLT компании «Expert System Solutions» (рисунок 2.16).

Для исследований применяли образцы размерами 5x3-5x20 мм (рисунок 2.17), вырезанные из образцов для термомеханических испытаний.



Рисунок 2.16 – Внешний вид оптического дилатометра MISURA® ODLT

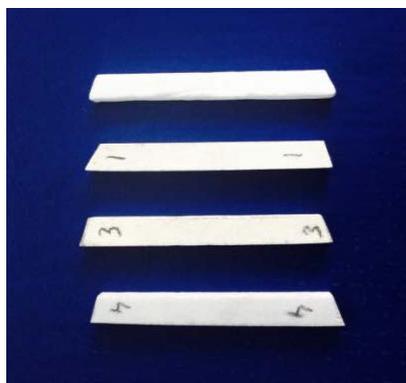


Рисунок 2.17 – Внешний вид образцов для определения термического расширения

Образец в печи размещали горизонтально при комнатной температуре и осуществляли нагрев до 1500°C со скоростью 30 °C/мин. При этом образцы освещали двумя параллельными пучками голубого света с длиной волны 478 нм (рисунок 2.18). Две длиннофокусные цифровые камеры регистрировали изображение образца с каждой стороны с точностью до нескольких сотен долей микрона. Одновременное измерение с двух сторон образца двумя световыми пучками без контакта с образцом обеспечивало абсолютное измерение длины.

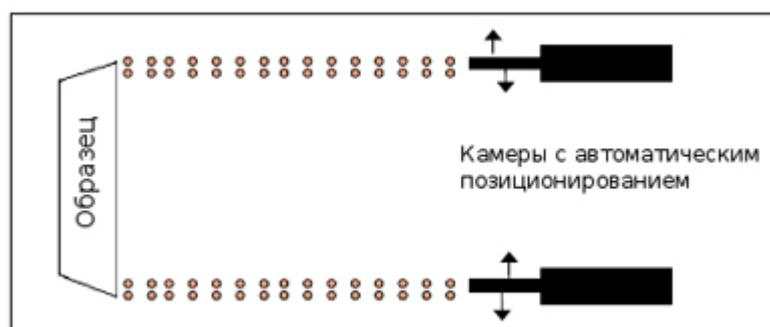


Рисунок 2.18 – Принципиальная схема цифровой камеры дилатометра, регистрирующей изображение образца

2.8 Методика определения удельной теплоемкости

Теплоемкость стержневых составов определяли в диапазоне температур 20–1350°C экспериментально с использованием высокоточного дифференциального сканирующего калориметра NETZSCH DSC 404 F3 PEGASUS (далее ДСК) (рисунок 2.19), который работает по принципу регистрации теплового потока. Для исследований использовали порошки стержневых и оболочковых материалов с зернистостью ~5 мкм, полученных дроблением кусков образцов стержней и форм, разрушенных при термомеханических испытаниях. При использовании этого метода образец и эталон подвергался воздействию контролируемой температурной программы. Реально измеряемыми величинами являлась температура образца и разность температур между образцом и эталоном. Пользуясь этими данными, удается, в свою очередь, определить разность тепловых потоков в указанных элементах, а затем и теплоемкость.

Погрешность измерения теплоемкости на ДСК не превышал 3 %.



Рисунок 2.19 – Внешний вид дифференциального калориметра

2.9 Методика определения фазового состава

Для проведения качественного и количественного фазового анализа, была проведена съемка рентгенограмм с использованием дифрактометра Rigaku Ultima IV (рисунок 2.20) с фокусировкой гониометра по методу Брэгга-Брентано. Съёмку порошков проводили с использованием Cu K_α -излучения (40 кВ, 40 мА) на отраженном пучке. Для расчетов использовалась длина волны $\lambda_{\text{K}\alpha 1} = 1.540600 \text{ \AA}$. Общий вид рентгенограмм снимался с шагом сканирования $0,02^\circ$ и временем экспозиции в каждой точке, равным 3 секундам. Используя программный пакет PDXL (v. 1.8.1.0) в котором реализован метод Ритвельда, проводили обработку рентгенограмм с определением интенсивности I всех рефлексов и соответствующих им межплоскостных расстояний d . На последнем этапе происходила идентификация всех фаз, путем сопоставления экспериментально полученных I и d с таковыми, хранящимися в базе дифрактометрических данных ICDD PDF-2.



Рисунок 2.20 – дифрактометр Rigaku Ultima IV

Объемная доля фаз определялась методом полнопрофильного анализа многокомпонентной смеси. Этот метод был разработан Карлаком и Бурнеттом в 1966 году [75]. В данном методе, в n – фазной смеси имеют место наложения дифракционных максимумов. Вклад, вносимый i – той фазой в j – тый пик на дифрактограмме, можно выразить следующей формулой:

$$I_{ij} = a_{ij}I_{i0}, \quad (2.12)$$

где a_{ij} - коэффициент пропорциональности, I_{i0} - интенсивность основного пика i – той фазы. Полная интенсивность j – того пика равна сумме вкладов всех фаз:

$$I_j = \sum_{i=1}^n I_{ii} a_{ij} = \frac{1}{\mu^*} \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{\rho_i} x_i a_{ij}. \quad (2.13)$$

2.10 Методика оценки седиментации стержневой смеси

Оценка седиментационных свойств готовой смеси (фиксируется химический, фракционный состав и марка пластификатора) проводилась после приготовления стержневой смеси в баке автоматизированной шприц-машины СТМ-25.

Фиксировалось время перемешивания и температура стержневой смеси на дисплее шприц-машины.

Последовательность дальнейшего проведения эксперимента:

– со дна бака бралась навеска и выливалась в керамический стаканчик объемом 3 см³ (излишки срезаются ножом) для последующего выжигания пластификатора;

– через 30 минут измеряли температуру и брали вторую навеску;

– еще через 30 минут измеряли температуру, брали следующую навеску и т. д. в течении 6 часов.

Все полученные образцы обозначали (нумеровали), взвешивали и отдельно прокаливали в печи до полного удаления пластификатора (при температуре 500°С в течение 15–20 мин). Прокаленные образцы взвешивали и аккуратно «размалывали в ступке», не допуская дробления зерна огнеупора, и рассеивали по фракциям.

Все фракции (определяются по составу смеси) взвешивали и считали в процентах от общей прокаленной массы.

После отсева всех образцов строили седиментационные кривые для каждой фракции огнеупоров.

2.11 Методика исключения грубых ошибок.

Имели n результатов независимых равноточных измерений величины. Оценили выпадающее значение.

Среднее значение (математическое ожидание) непрерывной случайной величины определили по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.16)$$

Дисперсию непрерывной случайной величины определяли как:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.17)$$

Среднее квадратичное отклонение рассчитывается как квадратный корень из дисперсии $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$.

Значение погрешности найденной оценки \bar{x} определяли величиной доверительного интервала ε_{x_0} , который покрывает истинное значение x_0 с некоторой доверительной вероятностью:

$$x_0 = \bar{x} \pm \varepsilon_a \quad (2.18)$$

Значение $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента [76], определяется в зависимости от n – числа измерений и α – доверительной вероятности.

Величину доверительного интервала находили по формуле:

$$\varepsilon_{x_0} = t_{\alpha n} \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} \quad (2.19)$$

Таким образом, истинное значение ударной вязкости определяли по формуле:

$$x_0 = \bar{x} \pm \varepsilon_{x_0} \quad (2.20)$$

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА НОВОГО СОСТАВА СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСИ

Наряду с химическим составом, физико-химические свойства стержня существенным образом зависят и от фракционного состава стержневой смеси. Несмотря на значительный прогресс в технологии и средствах производства литых лопаток ГТД, брак в литейных цехах все еще значителен. При литье охлаждаемых рабочих лопаток турбины он достигает 30–50 %. Брак появляется по причине коробления стержня, смещения и полома в процессе прокаливании формы и заливки ее сплавом.

Одной из причин коробления стержня является неоптимальное соотношение фракционного состава стержневой смеси, распределение тонкой и грубой фракций в полости пресс-формы после запрессовки, что в свою очередь также приводит к повышенной пористости и низким механическим свойствам.

Отличительной особенностью формирования фракционного состава стержней является наличие каркасообразующих фракций. Кроме того, при формировании фракционного состава стержней не стоит задача обеспечения максимальной плотности, а необходимо обеспечить геометрическую размерную точность и стабильность, минимальную усадку и устойчивость к короблению.

Каркасообразующими фракциями в стержне являются порошки F 120 (120 мкм) и F100 (100 мкм). Они формируют конструкцию стержня, непосредственно соприкасаясь друг с другом в геометрически правильном порядке, причем деформация частиц порошков не происходит. От этих фракций зависит размерная стабильность, склонность к усадке и короблению стержня, максимально возможная объемная доля дисперсной фазы. Вторая группа фракций заполняет образовавшиеся поры, сформированные порошками 120 мкм и 100 мкм, и придает устойчивость этой конструкции. Для повышения устойчивости этой конструкции необходимо заполнить эти поры не только мелкими фракциями, но и фракциями определенных размеров. Назначение третьей группы мелкой фракции состоит в том, чтобы заполнить мелкие поры, образованные второй группой фракции, и обеспечить необходимую шероховатость поверхности.

Из сказанного следует важность рассмотрения геометрической размерной последовательности формирования фракционного состава порошков для стержневой смеси.

3.1 Оптимизация гранулометрического состава стержневой смеси

Обоснование гранулометрического состава стержневой смеси сводится к геометрической задаче размещения шаров внутри некоторой области пространства при дополнительном условии, что они не должны быть сжимаемы. Таким образом, задача эквивалентна построению уплотняющей упаковки шаров [77].

Рассмотрим расположение шаров в горизонтальной плоскости, как представлено на рисунке 3.1.

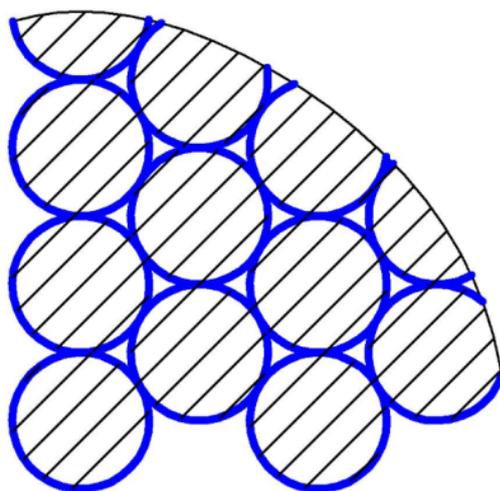


Рисунок 3.1. – Схема расположения шаров в горизонтальной плоскости (штриховка)

Расчетный диаметр шаров первого порядка Al_2O_3 и SiO_2 : F120 и F100 - формирующий каркас стержня, обозначим d_1 . Рассмотрим треугольник ABC – он равносторонний, $AB=BC=AC=d_1$, (рисунок 3.2).

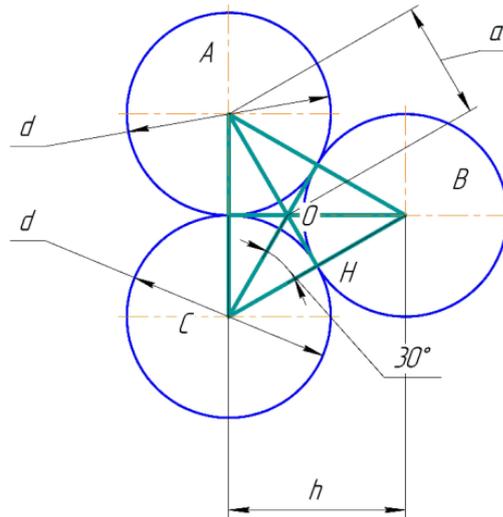


Рисунок 3.2 – Расчетная схема в горизонтальной плоскости

Из треугольника ABC определим величину отрезка AO , обозначив его через букву a .

$$\cos ABC = \cos 30^\circ = \frac{CH}{CO} = \frac{\frac{d}{2}}{a} = \frac{d}{2a} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Отсюда

$$a = \frac{d}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}d}{3}$$

Найдем высоту h из треугольника ABC :

$$h = d \cdot \sin 60^\circ = d \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3} \cdot d}{2}$$

Определим необходимые размеры расположения шаров. Расчетная схема представлена на рисунке 3.3.

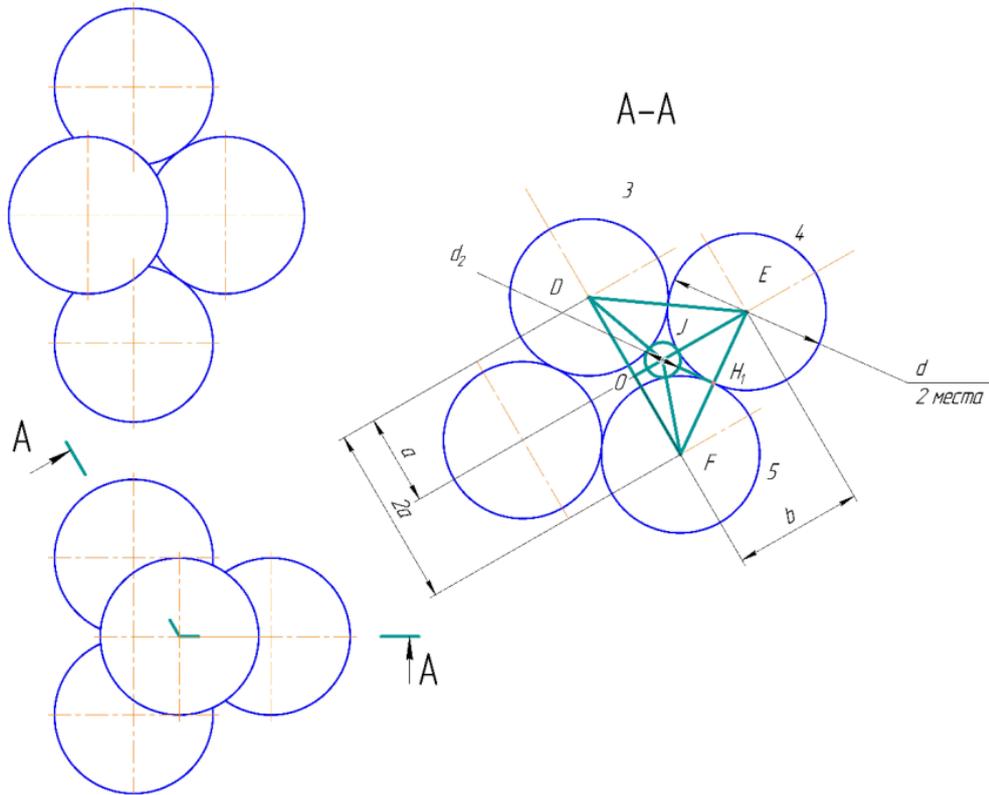


Рисунок 3.3 – Расчетная схема расположения шаров для определения необходимых размеров

Рассмотрим сечение $A-A$, где расположен равнобедренный треугольник DEF : $DE=EF=d_1$; $DF=2a$, таким образом $DO=OF=a$. Необходимо определить $EO=b$.

Из треугольника DEF определяем высоту EO :

$$EO = \sqrt{DE^2 - DO^2}.$$

Следовательно

$$b = \sqrt{d_1^2 - a^2} = \sqrt{d_1^2 - \frac{3 \cdot d^2}{9}} = d_1 \cdot \sqrt{\frac{9-3}{9}} = \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot d_1$$

Определим диаметр шаров второго порядка. Расчетная схема представлена на рисунке 3.4.

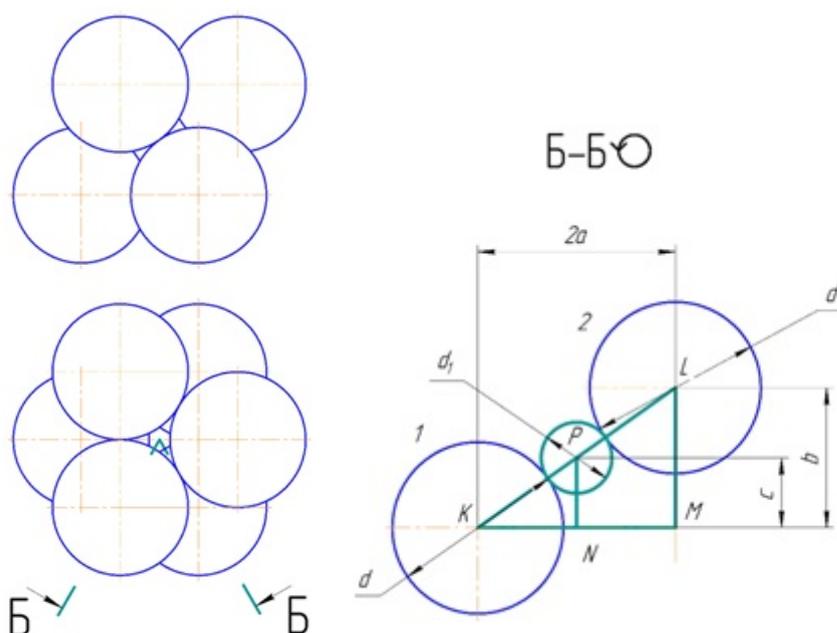


Рисунок 3.4 – Расчетная схема для определения диаметра шаров второго порядка

Расчетный диаметр шаров второго порядка обозначим d_2 . Расчетный размер шаров второго порядка соответствует размеру пор, которые образуют шары первого порядка.

Из прямоугольного треугольника KLM найдем d_2 :

$$d_2 = KL - d_1.$$

Из треугольника KLM определим сторону KL :

$$KL = \sqrt{(2a)^2 + b^2} = \sqrt{4 \cdot \frac{3 \cdot d_1^2}{9} + \frac{6 \cdot d_1^2}{9}} = \sqrt{2} \cdot d_1$$

Таким образом получаем d_2 :

$$d_2 = \sqrt{2} \cdot d_1 - d_1 = d_1 \cdot (\sqrt{2} - 1) = (1,414 - 1)d_1 = 0,414d_1 \quad (3.1)$$

$$d_2 = 120 \cdot 0,414 = 49,68 \text{ мкм};$$

$$d_2 = 100 \cdot 0,414 = 41,4 \text{ мкм}.$$

Определим расчетный диаметр шаров третьего порядка. Для этого снова рассмотрим рисунок 3.4. Диаметр шаров обозначим d_3 . Расчетный размер шаров третьего порядка соответствует размеру пор, которые образуют шары второго порядка.

Рассмотрим равносторонний треугольник EJF : $EF = d$; $EO = b$; $EH_1 = \frac{d_1}{2}$

На основании теоремы косинусов определим сторону треугольника EJ :

$$\cos FEO = \frac{EH_1}{EJ} = \frac{EO}{EF} = \frac{b}{d} = \frac{\frac{\sqrt{6}}{3} \cdot d_1}{d_1} = \frac{\sqrt{6}}{3}$$

$$EJ = \frac{EH_1 \cdot EF}{EO} = \frac{\frac{d}{2} \cdot d_1}{\frac{\sqrt{6}}{3} \cdot d_1} = \frac{3 \cdot d_1}{2 \cdot \sqrt{6}} = \frac{\sqrt{6} \cdot d_1}{4}$$

$$EJ = \frac{d}{2} + \frac{d_3}{2} = \frac{\sqrt{6} \cdot d_1}{4}$$

Отсюда

$$d_3 = \frac{\sqrt{6} \cdot d_1}{2} - d_1 = d_1 \cdot \left(\frac{\sqrt{6}}{2} - 1 \right) = \left(\frac{2,449}{2} - 1 \right) d_1 = 0,224 d_1 \quad (3.2)$$

$$d_3 = 120 \cdot 0,224 = 26,88 \text{ мкм};$$

$$d_3 = 100 \cdot 0,224 = 22,4 \text{ мкм}.$$

Расчетный диаметр шаров четвертого порядка определяем методом построения. Расчетный размер шаров четвертого порядка соответствует размеру пор, которые образуют шары третьего порядка. Расчетный диаметр шаров четвертого порядка соответствуют размеру пор, которые образуют шары третьего порядка.

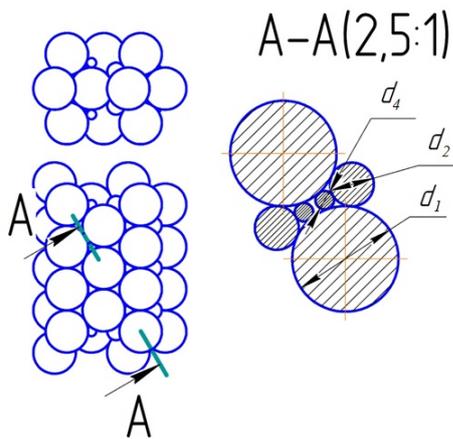


Рисунок 3.5 – Схема определения диаметра шаров 4-го порядка

$$d_4 = 0,1766 d_1 \quad (3.3)$$

$$d_4 = 0,1766 \cdot 120 = 21,19 \text{ мкм};$$

$$d_4 = 0,1766 \cdot 100 = 17,66 \text{ мкм}.$$

Исходный максимальный размер дисперсных порошков стержневых смесей составляет F=120 и F=100. Порошки фракции F120 и F100 в стержневой смеси являются каркасообразующими стержней. Они формируют максимально возможную объемную долю дисперсной фазы, соответствующей такой упаковке порошков, при которой частицы непосредственно соприкасаются друг с другом в геометрически правильном порядке, причем деформация частиц порошков не происходит. При упаковке частиц порошков первого порядка образуются поры, которые должны заполняться частицами порошка второго порядка. При упаковке шаров второго порядка образуются поры, которые должны заполнить частицы порошка третьего порядка [78].

В таблице 3.1 приведены результаты расчетов последовательности изменений объема пор при формировании стержня в зависимости от плотности упаковки и размеры частиц порошков, которые применяются для стержневых смесей.

Расчет необходимой размерной последовательности фракционного состава порошков стержневой смеси производилась по формулам (3.1–3.3). Так как при запрессовке под давлением стержневого состава оказывается упорядочивающее воздействие на частицы с практически равновероятным ростом объемных долей ГПУ и ГЦК упаковки. Поэтому расчет гранулометрического состава стержневой смеси необходимо ввести в соответствии с ранее полученными формулами 3.1–3.3 [10, 78]:

$$d_2 = 0,414d_1, d_3 = 0,224d_1, d_4 = 0,1766d_1$$

где d_1 – самая крупная фракция смеси, d_2 – средняя фракция, располагающаяся в промежутках между частицами крупной фракции ГПУ и ГЦК, d_3 – тонкая фракция меньше d_2 способна перемещаться сквозь промежутки между частицами крупной фракции, d_4 – тонкая фракция меньше d_3 способна перемещаться сквозь промежутки между частицами тонкой фракции.

Сравнение размеров порошков и пор в таблице 3.1 позволяет определить размерный гранулометрический состав стержневой смеси.

Таблица 3.1 – 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	-	-	-	-	-	-	-	-	-

При формировании стержневой смеси каркасообразующими фракциями 120 и 100 мкм образуются поры с максимальным размером 49,7 мкм и 41,47 мкм соответственно. Следовательно, порошки с размерами частиц 75, 63 и 50 мкм (таблица 3.1) не смогут заполнить эти поры. Использование этих фракций будет способствовать формированию неоднородной каркасной гранулометрической структуры стержня и неравномерной ее усадке, что будет способствовать короблению стержня. Поэтому эти фракции исключены в опытной стержневой смеси [77].

Рассчитаны три варианта гранулометрического состава для стержневой смеси, соответствующие минимальной доле кристаллической структуры упаковки (не уплотненная смесь) вариант 1, малой доле кристаллической структуры упаковки (ГПУ+ГЦК ~ 20 %) вариант 2, максимально возможной доле кристаллической структуры упаковки (ГПУ+ГЦК более 80 %) вариант 3.

Таблица 3.2 – Сравнительные расчеты вариантов фракционного состава стержневой смеси.

	Фракционный состав порошков, мкм	Объемное содержание фракций, %		
		вар.1	вар.2	вар.3
крупная фракция	120	66.36%	68.70%	73.62%
	100			
средняя ГЦК	40	12.28%	11.68%	10.31%
	30			
средняя ГПУ	10	12.28%	11.68%	10.31%
тонкая фракция, перемещающаяся	7	9.08%	7.94%	5.77%
	5			
	3			

Из таблицы 3.2 следует определенная закономерность: с повышением плотности упаковки повышается процентная доля крупной каркасообразующей фракции с 66 % до 74 % и уменьшается доля средней и мелкой фракции соответственно с 12,3 % до 10,3 % и с 9,1 % до 5,8 % [79, 80].

Оптимизация гранулометрического состава с выбранными фракциями 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} (Таблица 3.3). В качестве варьируемых факторов были выбраны Al_2O_3 , SiO_2 , SiC , TiO_2 . Матрица планирования удовлетворяла всем требованиям дробного факторного эксперимента.

Таблица 3.3 – Матрица планирования дробного факторного эксперимента

Факторы	Al_2O_3	SiO_2	SiC	TiO_2	σ_B	КТР
Основной уровень	80	16	1,5	1		
Интервалы варьирования	+5 -5	+2,5 -2,5	+0,5 -0,5	+0,5 -0,5		
№ опыта	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

Для предела прочности при изгибе получили уравнение регрессии:

$$y_1 = 24,75 + 3,98x_1 - 0,5x_2 + 2,8x_3 + 0,87x_4$$

Из расчета доверительного определено, что коэффициенты регрессии x_2 и x_4 незначимы и их можно исключить из уравнения.

Уравнение регрессии для КТР:

$$y_2 = 7,66 \cdot 10^{-6} + 0,4 \cdot 10^{-6} x_1 - 1,5 \cdot 10^{-6} x_2 - 0,1 \cdot 10^{-6} x_3 - 0,01 \cdot 10^{-6} x_4$$

Из расчета доверительного определено, что коэффициенты регрессии x_3 и x_4 незначимы и их можно исключить из уравнения.

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

В таблицах 3.4 и 3.5 приведены соответственно исходный и оптимизированный гранулометрические составы стержневой смеси. При

сравнении исходного гранулометрического состава стержневой смеси и оптимизированного следует, что в исходном гранулометрическом составе процентное содержание каркасообразующих фракций (120 и 100) мкм составляет 25 %, средних фракций (40-30) мкм 62,5 % и мелких фракций (10-7, 5-3) 5 % [79, 80].

Таблица 3.4 – Исходный гранулометрический состав

Исходный гранулометрический состав m %					Объемное содержание
	Al ₂ O ₃	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
Хим. состав	85%	12,5%	2%	0,5%	100%

Таблица 3.5 – Оптимальный гранулометрический состав

№	D, мкм	V%	M% Al ₃ O ₂	M% SiO ₂	M% SiC	M% TiO ₂	Объемное содержание 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%
ХИМ. СОСТАВ:		76.11232	85%	12,5%	2%	0.5%	100.0%

В оптимизированном гранулометрическом составе содержание этих фракций соответственно составляет 46,3 %, 48 %, 5,7 %. Из сравнения данных исходного и оптимизированного составов следует, что произошло процентное повышение каркасообразующих фракций на 21,3 %, уменьшение количества средних фракций на 14,5 % и незначительное повышение мелких фракций с 5 % до 5,74 %. За счет этих изменений повысилась плотность структуры опытного стержня и составила 76 ± 1 %. Объем пор составляет 24 ± 1 %.

В таблице 3.6 приведен состав опытной стержневой смеси, оптимизированный синхронно по компонентному составу и фракциям.

Таблица 3.6 – Опытная стержневая смесь, оптимизированная синхронно по компонентному 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

Оптимальное соотношение фракционного и компонентного составов стержневой смеси позволило снизить пустотность каркасообразующих фракций стержня, что положительно повлияло на структуру, повышение физико-механических свойств, снизило усадку и коробление и повысило стабильность размеров. Использование программного обеспечения позволило расчетным способом моделировать составы стержневой смеси, приблизив их к оптимальному составу.

Исходя из результатов проведенного теоретического анализа, предложен новый стержневой состав: $\text{SiO}_2=11-13$ %; $\text{SiC}=1-2$ %, $\text{TiO}_2=0,5-1$ % остальное

Al_2O_3 и легкоплавкий пластификатор на основе парафина с полиэтиленом 10–16 % сверх 100 % [79]. За вычетом процентного соотношения пластификатора, который выгорает при прокаливании, оптимальная плотность упаковки составит 60–65 % или 0,6–0,65.

В оптимизированном гранулометрическом составе содержание каркасообразующих фракций соответственно составляет 46,3 %. Вторая группа фракций, которая заполняет поры, сформированные порошками 120 мкм и 100 мкм, и придает устойчивость конструкции стержня (порошки 30–40 мкм) – 48 %. Третья группа фракций, которая должна заполнить мелкие поры, образованные, второй группой фракций и обеспечить необходимую шероховатость поверхности стержня (порошки 3–10 мкм) – 5,7 %. За счет оптимизации фракционного состава повышается плотность структуры и геометрическая стабильность стержня [78].

Коэффициент термического расширения оптимизированной стержневой смеси составил $7,8\text{--}8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Показателями для сравнения с серийной смесью служили: прочность образцов при изгибе, усадке размеров образцов от номинальных, характеризующих геометрическую точность стержней, коэффициент термического расширения и глубина взаимодействия с жаропрочным сплавом ЖС6У.

3.2 Разработка программы для построения теоретической кривой седиментации

Для проведения быстрого анализа и сравнения седиментации различных дисперсных систем, таких как составы керамических стержней в термопластифицированном состоянии и суспензии для облицовки модельных блоков, необходима разработка программы, визуально отражающей процесс седиментации во времени.

Исходными требованиями к программе являлось следующее:

– программа должна содержать пополняемую базу данных огнеупорных и связующих материалов;

- программа должна иметь возможность создавать новые дисперсные системы и сохранять в базе данных;
- программа должна производить расчеты седиментационных свойств и сохранять в базе данных;
- программа должна производить построение теоретических кривых седиментации рассчитанной дисперсной системы;
- иметь возможность наложения одной кривой седиментации на другую;
- вывод на печать полученных результатов расчета.

Блок-схемы алгоритма работы программы приведена в Приложении Б. Была написана программа для ЭВМ на языке VisualBasic +. Получено свидетельство о регистрации № 2019662797 [81].

Разработанную программу можно использовать в процессе создания и оптимизации стержневых составов в качестве инструмента для быстрого сравнительного анализа. Также программу возможно использовать для определения седиментационных свойств суспензий для облицовки модельных блоков в литье по выплавляемым моделям.

Достоинствами программы являются:

- 1) наличие собственной базы данных огнеупорных материалов, которая может быть дополнена пользователем по его желанию;
- 2) возможность создания дисперсных систем с неограниченным количеством компонентов;
- 3) возможность наложения одной кривой седиментации на другую для сравнительного анализа и вывод на печать и сохранение полученных кривых седиментации.

3.3 Выводы по главе 3

1. Описано решение задачи составления плотной упаковки и геометрической размерной последовательности формирования фракционного состава порошков для стержневой смеси.

2. Оптимальное сочетание прочности и плотности упаковки частиц стержневой смеси составляет 0,6–0,65.

3. Определены основные закономерности протекания процесса седиментации дисперсных систем и выведены уравнения для построения теоретической кривой седиментации, которые позволяют создавать дисперсные системы из имеющихся материалов в базе данных программы.

4. Разработана блок-схема алгоритма для расчета и построения кривой седиментации, по которой разработана программа, позволяющая создавать дисперсные системы из имеющихся материалов в базе данных программы и выполнять их седиментационной анализ.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗРАБОТАННОЙ СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСИ

Исследование физических и механических свойств разработанной стержневой смеси позволяет определить возможность применения данного материала для изготовления стержней, используемых для охлаждаемых лопаток газотурбинного двигателя, работающего в условиях высоких температур.

4.1 Технология изготовления стержневой смеси

Порошки электрокорунда рассыпали на противень слоем 50-120 мм (факультативно) и загружали в прокалочную печь, где просушивали при температуре 350–450°C не менее 3 часов. После чего электрокорунд просеивали через сито 0,16-1,0.

Свежий глинозем марки Г-О перед использованием обрабатывали раствором соляной кислоты:

– глинозем помещали на противень из нержавеющей стали, наливали раствор соляной кислоты (из расчета 150 мл соляной кислоты плотностью 1180-1190 кг/м³ на 10 литров воды);

– выдерживали до полного смачивания глинозема не менее 2 часов. Обработанный глинозем раскладывали в керамические короба.

Глинозем прокачивали при температуре 1330–1400°C в печи KS-2000 в течение 10-12 часов. Верхний ряд коробов закрывали керамической крышкой.

Просеяли обожженный глинозем через сито 0,6–1,0. Параллельно изготавливался пластификатор. Состав пластификатора:

парафин – 90–93%;

полиэтилен – 7–10%.

Процентное соотношение парафина, полиэтилена брали по массе в граммах. Загружали в конвертор (рисунок 4.1) с алундовыми шарами в соотношении 1:3 (масса алундовых шаров к массе пластификатора) навеску парафина, включали

обогрев и вращение конвертора. При достижении температуры парафина до 110–130°C в расплавленный парафин вводили небольшими порциями полиэтилен. После чего поднимали температуру расплава до 140–160°C и выдерживали при этой температуре в течение 1–1,5 часов до полного растворения полиэтилена. После чего пластификатор сливали в противень через сито 02. Хранили в виде кусков в закрытой таре.



Рисунок 4.1 – Конвертор для приготовления пластификатора

Для приготовления стержневой смеси в конвертор с шарами загружали смесь порошков электрокорунда в соотношении 1:2, масса шаров к массе электрокорунда соответственно. Включали обогрев конвертора и перемешивали порошки при температуре 95–100°C в течение 1 часа, не менее.

Параллельно в другой конвертор загружали заданное количество пластификатора, нагревали до температуры 110–120°C; затем добавляли заданное количество порошка карбида кремния и перемешивали в течение 5–10 минут.

После повышали температуру до 110–130°C, загружали совком смесь подогретых порошков электрокорунда и перемешивали в течение 45–60 минут до получения однородной массы (соотношение веса шаров к весу стержневой массы 1:1).

Готовую массу сливали на водоохлаждаемый стол через сито 2,0–5,0, разрезали на куски размером 50x50 (факультативно) и высотой 15–20 мм (факультативно).

Заготовки образцов для исследований изготавливали на гидравлическом прессе *LITOSTROJ HVC 21* запрессовкой при давлении 1,5 МПа термопластифицированной стержневой композиции с температурой 75–90°C в прессформу (рисунок 4.2). После чего образцы зачищали .

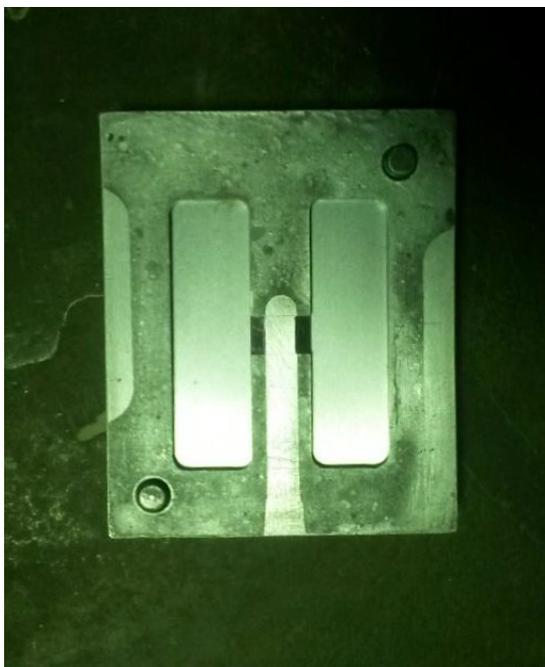


Рисунок 4.2 – Внешний вид прессформы для изготовления образцов

В огнеупорный короб насыпали слой порошка обожженного глинозема толщиной около 30 мм, после чего он устанавливается на вибратор.

Включался вибратор и производилось уплотнение глинозема в течение 1-2 мин при частоте колебаний 70–100 Гц и амплитуде 2–3 мм. Затем 26 образцов в 2 ряда (по 13 образцов в ряду) (рисунок 4.3), в вертикальном положении, длинным ребром вниз, аккуратно, не допуская деформации сырца, погружали в порошок на глубину 5–7 мм. Расстояние между образцами в ряду было не менее 10-15 мм.

После этого производили засыпку образцов глиноземом, с толщиной слоя 30-50мм, уплотняли порошок на вибраторе и укладывали описанным способом следующие 26 образцов. В завершение процесса короб засыпался порошком до верха, подвергался вибрации в течение 1,5–2 мин и отправлялся на обжиг.



Рисунок 4.3 – Образцы, уложенные в короб, перед обжигом

Заготовки образцов всех составов были подвергнуты обжигу при температуре 1350–1370°C по серийной технологии в проходной газовой печи ПГ-30, а часть образцов в камерной электрической печи Linn KK500 (рисунок 4.4) при температуре 1240–1260°C. Это было сделано с целью избежать трудоемкой переналадки газовой печи на другой режим.



Рисунок 4.4 – Внешний вид камерной электрической печи Linn KK500

Отметим, что методика подготовки образцов к термической обработке как в газовой, так и электрической печи была одной и той же.

После охлаждения до комнатной температуры образцы извлекались из коробов и обдувались сжатым воздухом с целью очистки от остатков глинозема.

4.2 Исследования физико-химических и механических свойств образцов

В предыдущей главе, рассмотрев оптимальные химические и гранулометрические составы, теоретически выявили шесть основных составов, которые предположительно должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к разрабатываемым новым стержневым смесям (таблица 4.1). Первые четыре смеси подбирались из условия теоретического соответствия химическому составу, для получения требуемых свойств. Последующие два состава были скорректированы с учетом требований к фракционному и химико-минералогическому составу. Из этих смесей были изготовлены образцы, которые исследовали на прочность при изгибе, пористость, шероховатость, линейную усадку, коэффициент термического расширения, фазовый состав.

Таблица 4.1 – Составы стержневых смесей [79, 80]

№№ п/п составов	№№ п/п образцов	Материалы основы, в % по массе											Пластификатор, сверх 100%		Режим обжига		
		Электрокорунд (фракции)						Кварц плавленный				SiC	Другие добавки	ПП7	ПП10	температура, °С	Время выдержки, ч
		F1200 3-5 мкм	F500 14- 20 мкм	F280 30- 40 мкм	F240 40- 50 мкм	F220 63- 75 мкм	F120 100- 120 мкм	F280 30- 40 мкм	F120 100- 120 мкм	F230 45- 63 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	TiO ₂ - 0.5	16		1240-1260	5
	7б			47,5			37		9,5		3,5	2	TiO ₂ - 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

4.2.1 Исследование предельной прочности образцов при изгибе

Опытные данные по температурным зависимостям предела прочности и прогиба при изгибе образцов первых 4 исследуемых материалов показаны на рисунках 4.5–4.8. Каждая экспериментальная точка на графиках получена усреднением результатов испытаний 4-5 образцов (Приложение Б).

Выявлено, что электрокорундовые образцы с минерализаторами (SiC, АСД-4), прокаленные при 1350°C (номера образцов 1 и 2, таблица 4.1, рисунок 4.5) имеют требуемые для обеспечения необходимой размерной точности лопаток прочностные характеристики, т.е. не менее 15 МПа (150 кгс/см²). Аналогичный вывод может быть сделан и в отношении образцов, содержащих 20-25% плавленного кварца, прокаленных при 1250°C (образцы 4,6, рисунок 4.6).

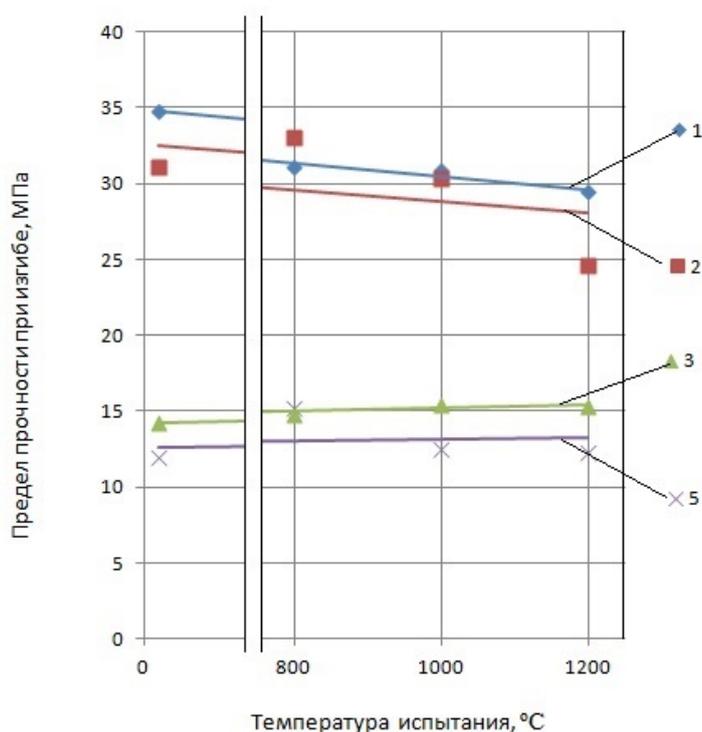


Рисунок 4.5 – Предел прочности при изгибе образцов (обжиг при 1380°C):
цифры у кривых – номера составов по таблице 4.1

В то же время, повышение температуры прокалики последних до 1350°С (образцы 3,5, рисунок 4.5) приводит к их резкому разупрочнению. Это можно объяснить тем, что в плавленном кварце в интервале температур 1200–1350°С интенсифицируются процессы расстекловывания (кристобалитизации). Появившаяся при высоких температурах кристаллическая фаза при последующем охлаждении претерпевает ряд полиморфных превращений с большими объемными изменениями, что приводит к растрескиванию образца, сопровождающемуся потерей прочности.

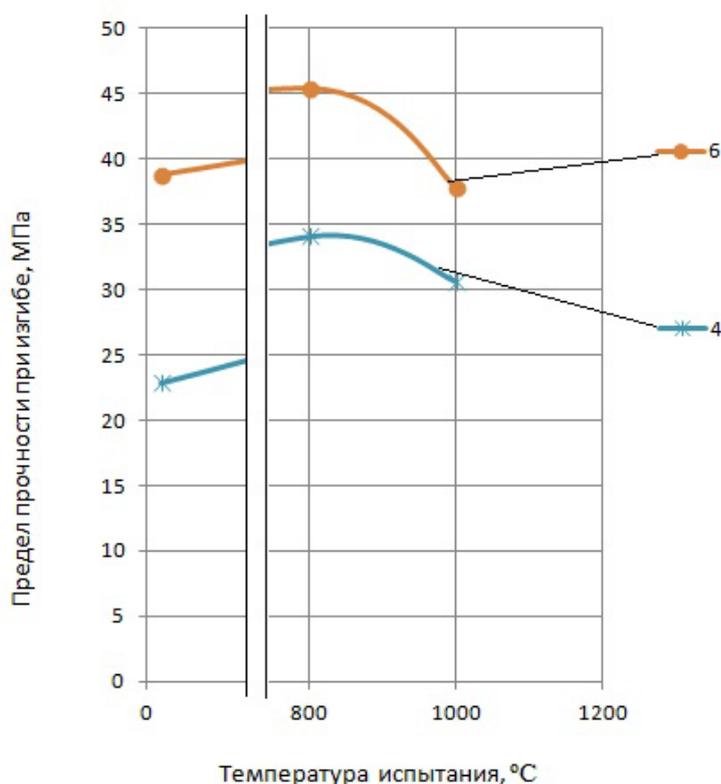


Рисунок 4.6 – Предел прочности при изгибе образцов (обжиг при 1250°С):
цифры – номера составов по таблице 4.1

Прогиб всех исследуемых материалов до температур испытания 1000°С не превышает 0,02–0,025 мм (рисунок 4.7) и можно полагать, что деформация образцов в этом случае является упругой. С увеличением температуры испытания до 1200°С деформация образцов из составов 2,3,5 незначительно возрастает (до 0,04–0,09 мм) и более заметна у образца из состава 1

(до 0,33 мм), что у последнего, по-видимому, можно объяснить незавершенностью диффузионных процессов в данном материале.

Отметим, что образцы 4 и 6, содержащие в составе 25 и 20 % по массе плавленного кварца, также имеют до 1000°C весьма малую деформацию (0,02–0,025 мм) до разрушения (рисунок 4.8). Повышение температуры испытания этих образцов до 1200°C приводит к потере ими способности сопротивляться действующим нагрузкам, и они пластически деформируются без разрушения до касания основания опорной призмы. Поэтому на температурных зависимостях прогибов не отражены точки, относящиеся к 1200°C.

Возможной причиной такой податливости образцов является появление в материале при температурах выше 1050–1100°C относительно легкоплавких алюмосиликатов щелочных металлов, которые могут присутствовать, хотя и в небольших количествах, в компонентах оболочковой формы, а именно, в обсыпчном материале – электрокорунде и в связующем – кремнезоле, в силу особенностей технологии их производства. При увеличении температуры до указанных значений они активно взаимодействуют с Al_2O_3 и SiO_2 с образованием плавней.

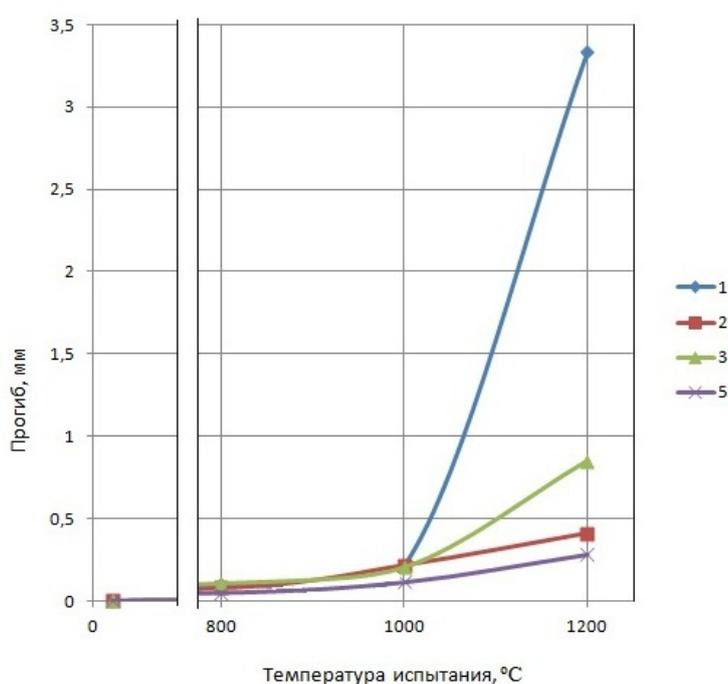


Рисунок 4.7 – Прогиб образцов (обжиг при 1380°C)

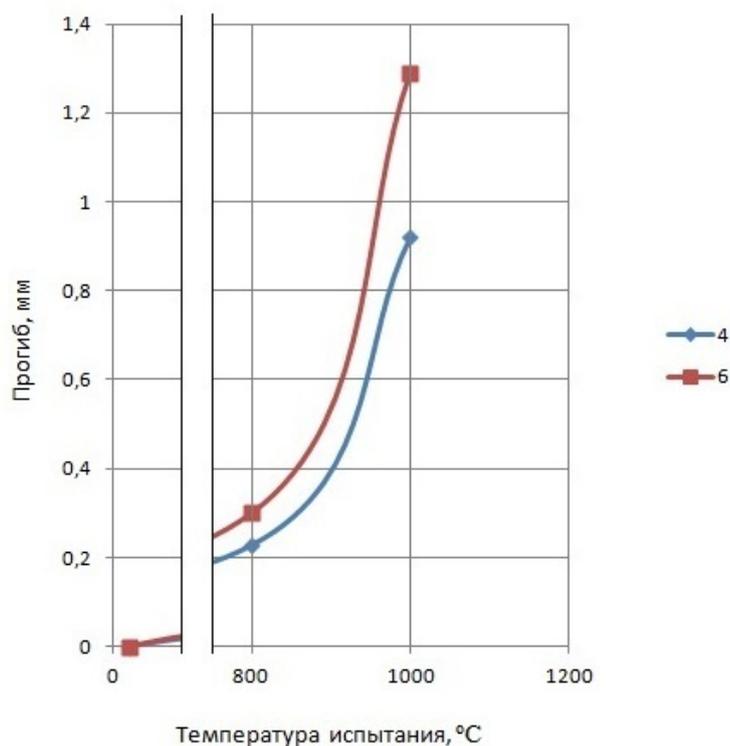


Рисунок 4.8 – Прогиб образцов (обжиг при 1250°C)

Опытные данные по температурным зависимостям предела прочности и прогиба при изгибе образцов последующих двух исследуемых материалов показаны на рисунках 4.9–4.10. Каждая экспериментальная точка на графиках получена усреднением результатов испытаний 4–5 образцов (приложение Б).

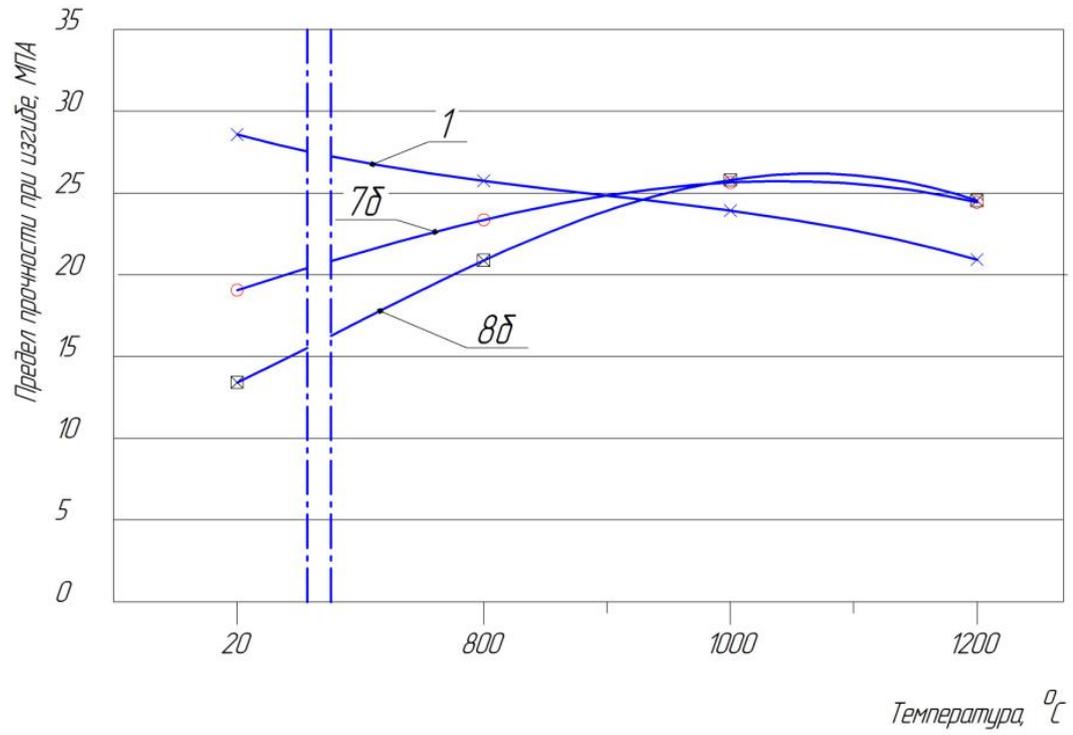
При рассмотрении приведенных данных обнаруживается, что закономерности температурного изменения прочностных свойств у опытных составов 7 и 8 с различным содержанием плавленного кварца практически идентичны (рисунок 4.9). Причем, испытаниями образцов 7б и 8б, прокаленных при 1360°C, выявлено, что в интервале 20-1000°C предел прочности при изгибе у них возрастает с 14–19 до 21-22 МПа, а дальнейший нагрев до 1200°C приводит уже к снижению этого показателя до 18–19 МПа (рисунок 4.9а), т.е. он все еще продолжает оставаться на уровне, заметно превышающем минимально допустимые для стержней значения (не менее 15 МПа).

У образцов, прокаленных при меньшей температуре 1250°C (образцы 7а и 8а) разупрочнение проявляется заметно слабее, что и обуславливает их более высокие прочностные характеристики (рисунок 4.9 б).

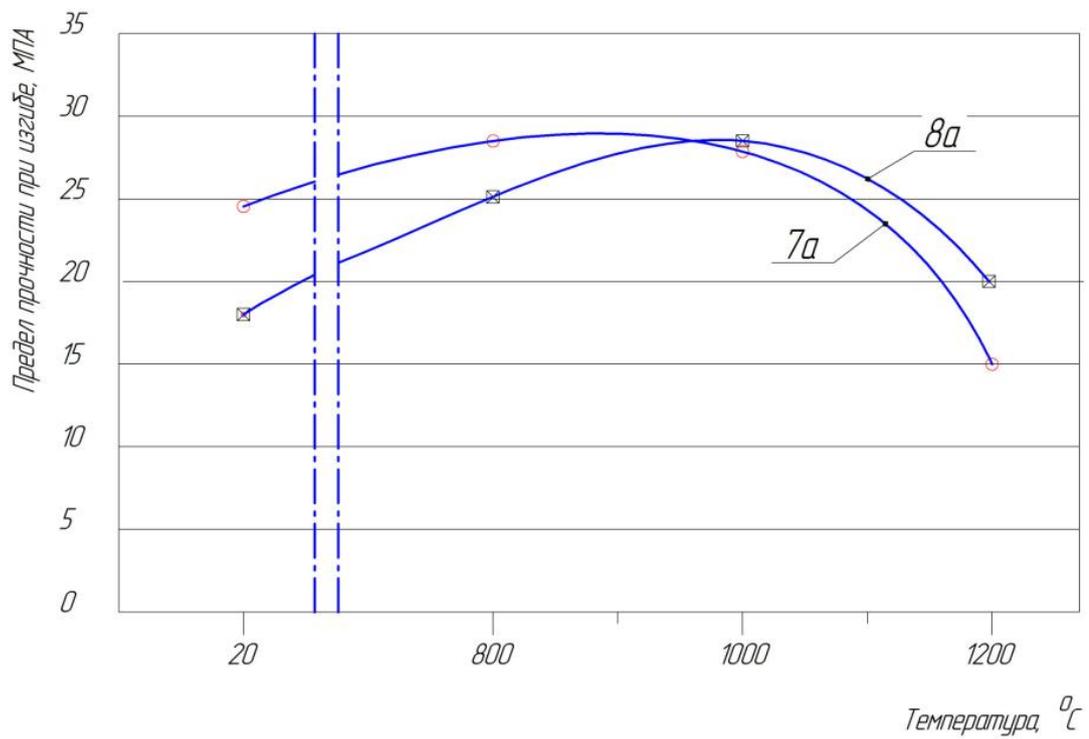
Обнаруженные закономерности можно объяснить структурными изменениями в плавленном кварце, происходящими в нем при обжиге образцов из указанных составов. Как известно, в интервале температур 1200–1360°C в плавленном кварце интенсифицируются процессы расстекловывания (кристобалитизации). Появившаяся при высоких температурах кристаллическая фаза при последующем охлаждении претерпевает ряд полиморфных превращений с большими объемными изменениями, что приводит к растрескиванию образца, сопровождающемуся потерей прочности.

Образцы из исследуемых материалов при относительно низких температурах испытания (до 1000°C) имеют прогиб при нагружении не более 0,02–0,03 мм (рисунок 4.10), т.е., в данном случае, образцы ломаются хрупко, преимущественно упруго деформируясь вплоть до разрушения. Дальнейший нагрев до 1200°C обуславливает уже появление значительной пластической деформации образцов под нагрузкой. Например, установлено что прогиб в ходе испытания при 1200°C у состава 1 достигает 3.3–3.5 мм [82]. Что касается образцов 7б и 8б, то при этой температуре они вообще теряют способность сопротивляться действующим нагрузкам и пластически деформируются без разрушения до касания нагружающего клина основания опоры. Поэтому на температурных зависимостях прогибов не были отражены точки, относящиеся к 1200°C (рисунок 4.10).

Повышенной податливости образца из состава 1 способствует наличие в нем некоторого количества минерализаторов SiC и TiO₂, а также примесей оксидов щелочных металлов в электрокорунде, способных образовывать с ним легкоплавкие соединения. Очевидно, что нагрев выше 1200°C должен обусловить продолжение диффузионных процессов в материале, и как следствие, увеличение его пластичности.



а



б

Рисунок 4.9 – Температурные зависимости предела прочности при изгибе: температура обжига образцов: а - 1380°C; б - 1250°C; цифры у кривых – номера составов по таблице 4.1

Следует отметить, что описанное выше поведение стержневых материалов с плавным кварцем при нагреве из-за деформации стержня может создать сложности при решении проблемы точности, прежде всего, массивных отливок. Применительно же к тонкостенным лопаткам ГТД из жаропрочных сплавов можно сказать, что благодаря быстрому, в течение нескольких секунд, затвердеванию металла в стенке стержень, оформляющий внутреннюю полость отливки, не успевает прогреться до опасных температур и поэтому сохраняет исходные размерные характеристики. Это подтверждается данными успешного использования стержней, частично или полностью изготовленных из плавного кварца при литье пустотелых лопаток ГТД.

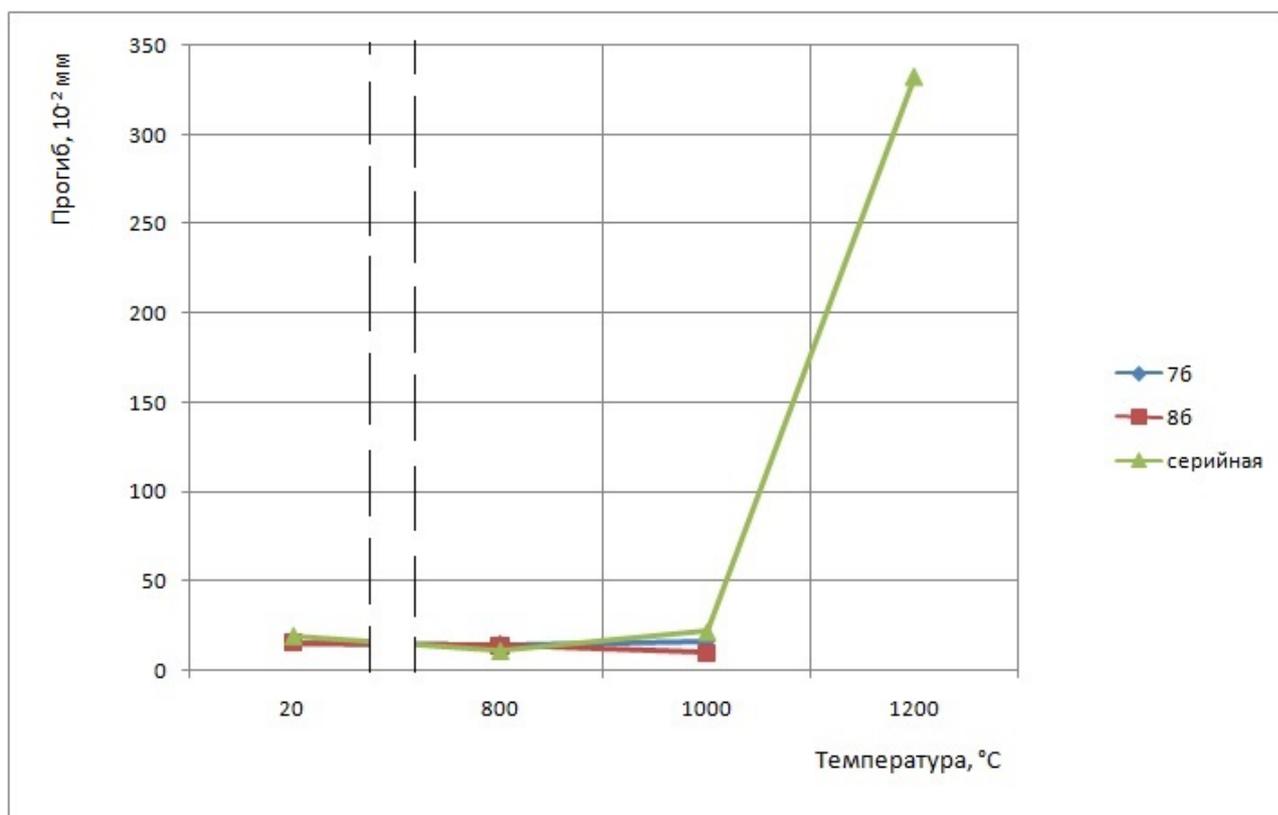


Рисунок 4.10 – Температурные зависимости прогиба при температуре обжига образцов 1360°C

4.2.2 Исследование относительной усадки

Данные по усадке (таблица 4.2) получены усреднением измерений размеров 8–10 образцов (приложение Б) до и после их прокали. Из приведенных результатов видно, что на величину усадки существенное влияние оказывают содержания пластификатора в составе (см. таблицу 4.1) и температура прокали.

Таблица 4.2 – Результаты контроля линейной усадки образцов

№№ составов по таблице 4.1	Линейная усадка, %
1	0,21±0,01
2	0,7±0,07
4	0,44±0,06
6	0,9±0,08
7а	0,39±0,05
7б	0,31±0,03
8а	0,67±0,07

При анализе данных обнаруживается, что значения относительных усадок образцов опытного стержневого материала, подвергнутых обжигу при температурах 1250°C (образец 7а) и 1360°C (образцы 1, 2, 7б) близки к требуемой величине (не более 0,4%), в то время как у образцов 4,6 и 8а наблюдается более чем двухкратное превышение этой характеристики, что является существенным недостатком данного материала. Поэтому для сокращения объема трудоемких исследований целесообразно стержневые составы 2, 4, 6 и 8 исключить из дальнейшего рассмотрения.

4.2.3 Исследование кажущейся пористости

Данные по кажущейся пористости (таблица 4.3) получены усреднением исследований 3 образцов.

Таблица 4.3 – Результаты определения значений кажущейся пористости

номер образца (по таблице 4.1)	Масса образца, г			Кажущаяся пористость, %	
	сухого, m_0	насыщенного водой, m_1	При гидростатическом взвешивании, m_2		
	1	5,67	4,2	6,72	41,7
	5,17	3,95	6,11	43,5	
	5,46	4,15	6,4	41,8	
7а	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	41.8	
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	

Результаты исследования показали, что все исследуемые образцы обладают высокой пористостью и удовлетворяют требованиям, предъявляемым к стержневым составам, используемым при изготовлении стержней охлаждаемых лопаток ГТД.

4.2.4 Исследование шероховатости

Результаты определения основных показателей качества поверхности образцов R_z и R_a проводились на 4-5 образцах, и усредненные данные приведены в таблице 4.4. Результаты всех образцов приведены в приложении Б.

Таблица 4.4 – Величина шероховатости поверхности образцов

Стержневой состав (по таблице 4.1)	Показатели шероховатости, мкм	
	R_z	R_a
1	14,50±0,32	3,022±0,053
7а	10,32±0,45	2,139±0,086
7б	10,26±0,21	2,137±0,042

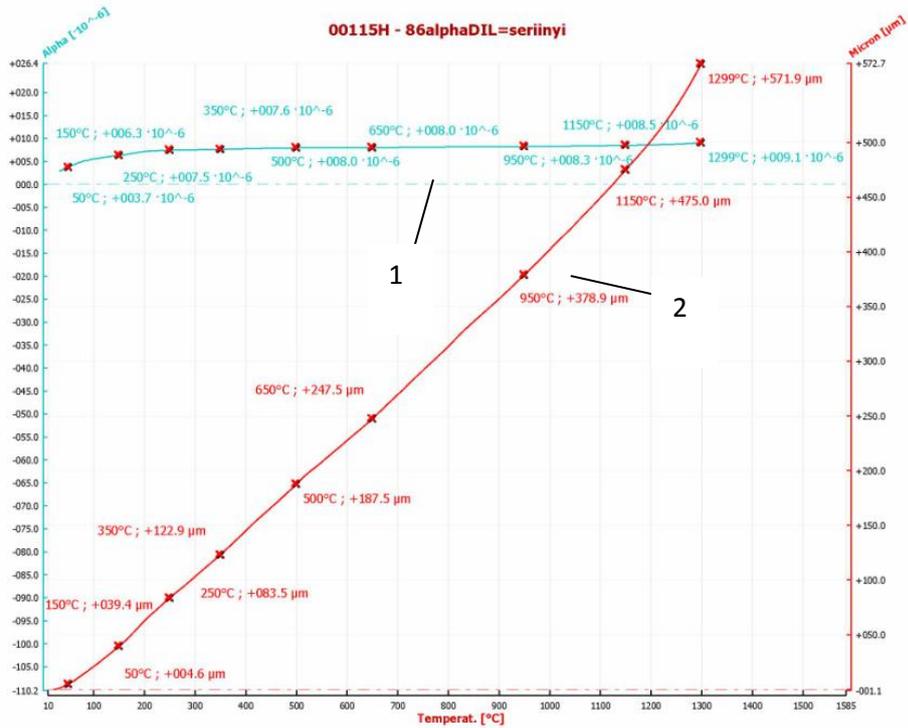
Исследования демонстрируют прямую связь шероховатости поверхности образцов и фракционного состава стержневых смесей. Использование мелких фракций в стержневых составах снижает шероховатость. Согласно данным таблицы 4.4, качество поверхности образцов из опытной смеси 7б заметно лучше, чем у образцов других составов и удовлетворяет требованиям производства исследуемых отливок лопаток ($Rz \leq 25$ мкм).

4.2.5 Исследование коэффициента термического расширения

Материалы образцов соответствуют составам стержневых материалов 1 и 7б таблице 4.1. Кроме того, для получения сравнительных данных было исследовано термическое расширение образца керамической формы на кремнезольном связующем.

Данные по термическому расширению стержневых составов показаны на рисунках 4.11-4.13. Приведенные иллюстрации свидетельствуют о весьма существенном увеличении КТР у всех исследуемых материалов при нагреве. Можно заметить, что изменение этого параметра приходится в основном на начало прогрева образцов, до 300–350°C, после чего он стабилизируется на определенном уровне. Выявленные закономерности температурного расширения определяются как свойствами основного компонента составов- электрокорунда, так и превращениями (с увеличением объема) в кристобалите, некоторое количество которого появляется в плавленом кварце при прокатке образцов из составов 6, 7б

Значение КТР серийного электрокорундового стержневого состава 1 (рисунок 4.11) для температурной области выше 500°C составляет $8,0-9,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что согласуется с известными данными для электрокорунда.



Lo (mm): 49.52

Рисунок 4.11 – Температурные зависимости КТР (1) и линейного расширения (2) стержневого состава 1 (таблица 1.1)

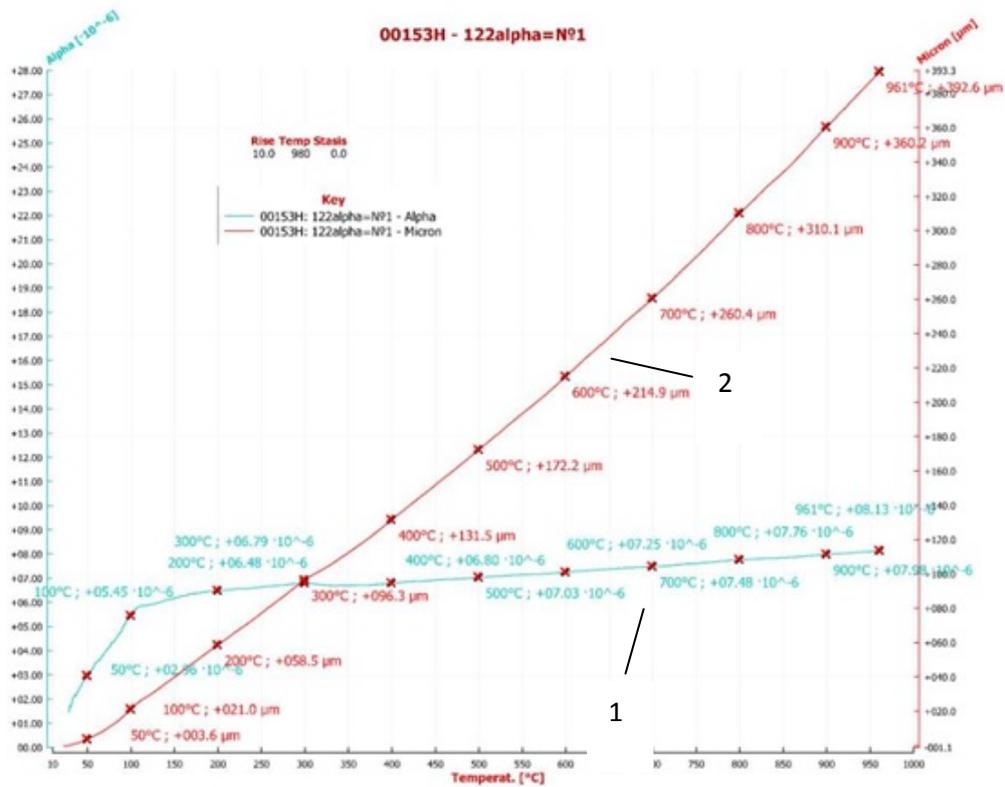
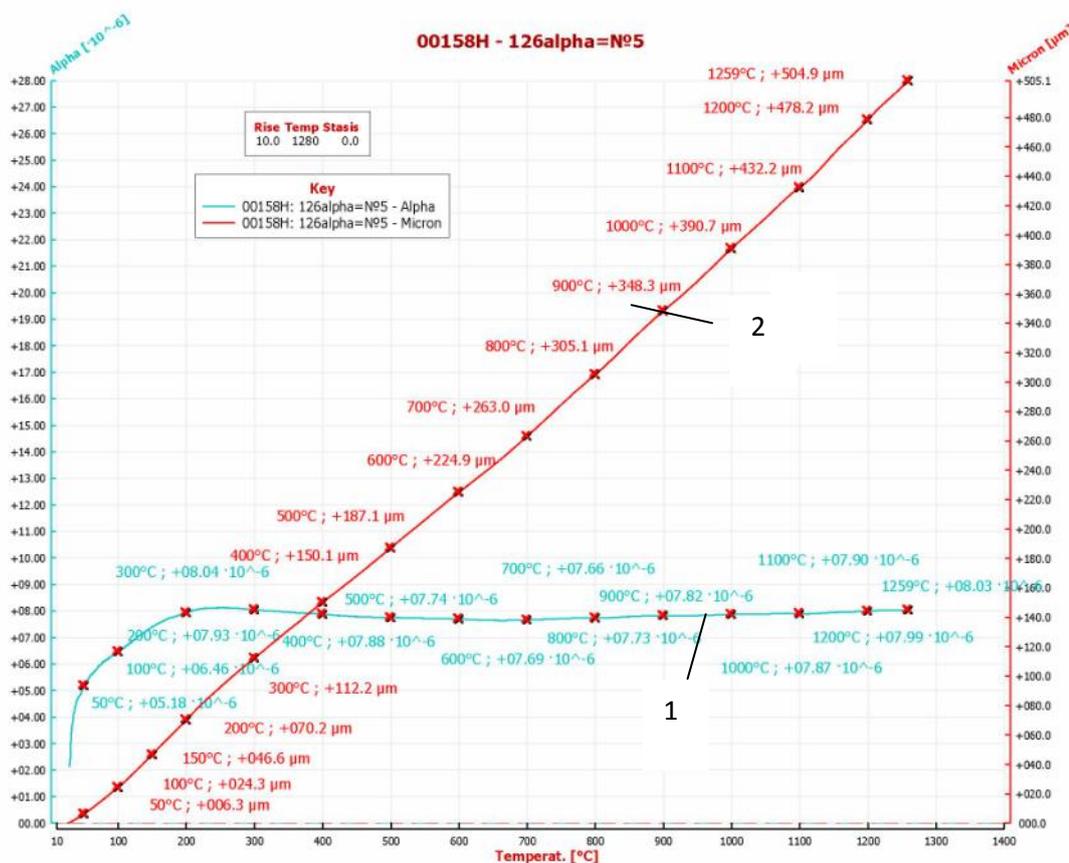


Рисунок 4.12 – Температурные зависимости КТР (1) и линейного расширения (2) и электрокорундовой оболочковой формы на кремнезольном связующем (прокалка образца при 950°C в течение 5 ч)



Lo (mm): 50.98

Рисунок 4.13 – Температурные зависимости КТР (1) и линейного расширения (2) стержневого состава 7б (таблица 4.1)

У оболочковых форм, прокаленных при температурах 950 и 1050°C величина КТР при 1000°C не превышает $7,8\text{--}8,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что существенно ниже чем у серийного стержневого материала (рисунки 4.11–4.12).

Выявлено, что в наибольшей степени с оболочковой формой согласуется по термическому расширению опытный стержневой состав 7б, коэффициент термического расширения которого при температурах 900–1300°C находится в пределах $7,8\text{--}8,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [83].

При этом удлинение при нагреве у образцов из состава 7б так же, как и у формы, происходит равномерно и практически одинаково, благодаря чему в дальнейшем можно ожидать снижения напряжений и опасности коробления стержня в форме, обусловленных разностью термических расширений этих элементов.

4.2.6 Определение химического состава

Химический состав образцов указан в таблице 4.5. Его определяли с помощью энергодисперсионного спектрометра Oxford INCA X-max 80, установленного на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-7001F

Таблица 4.5 – 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
7б	50.23	0.38	35.93	12.23	0.13	0.78	0.19	100.00

Съёмку карт распределения элементов в стержнях (рис.4.14 – 4.15), на которых выявляется присутствие определённых соединений, осуществляли на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-7001F в режиме Mapping.

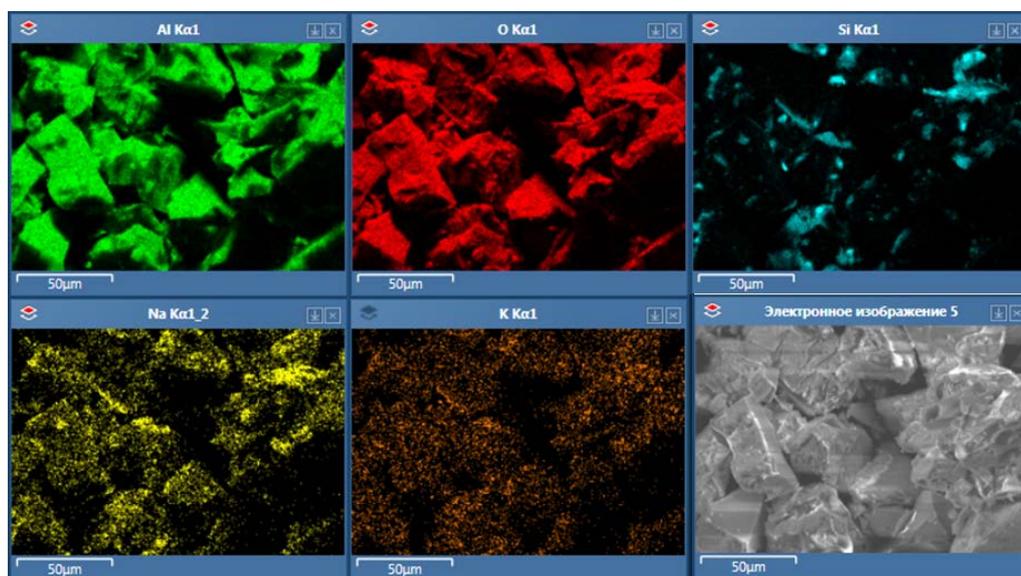


Рисунок 4.14 – Карты распределения элементов и электронное изображение образца «1».

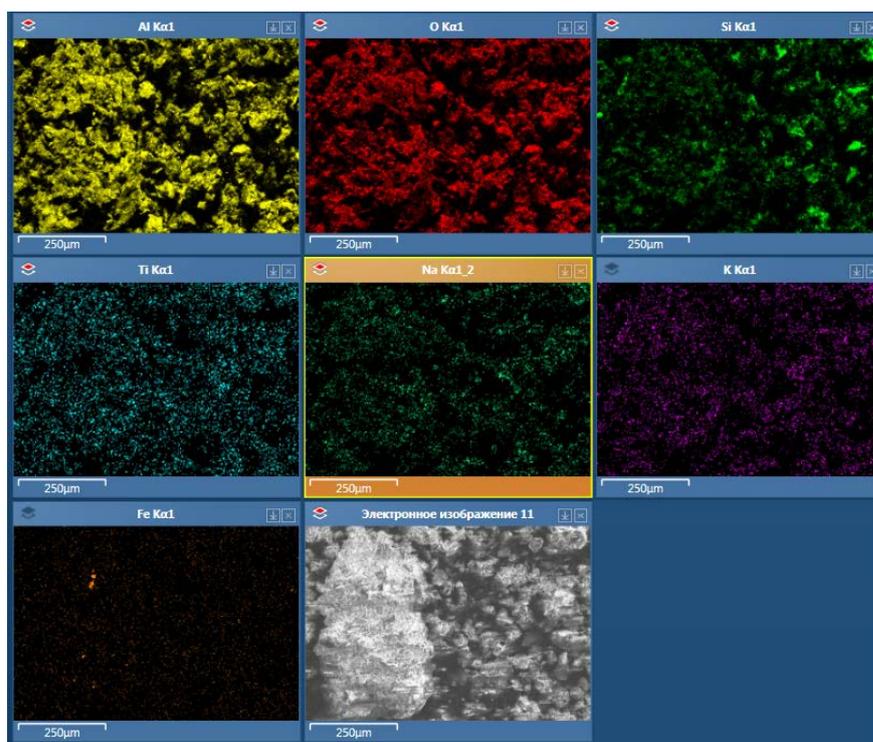


Рисунок 4.15 – Карты распределения элементов и электронное изображение образца «7б».

Анализ химического состава показал, что уменьшение Al и увеличение Si в опытном составе связано с добавками плавленного кварца. Наличие Ti в опытной смеси объясняется его введением с целью снижения температуры спекания при изготовлении стержней. Следы K, Na и Fe свидетельствуют о наличии данных элементов в исходном Al_2O_3 и не выходят за рамки ТУ398807500224450-99.

4.2.7 Исследование фазового состава

Съёмка рентгенограмм для фазового анализа (рис. 4.16 – 4.17) проводилась на дифрактометре Rigaku Ultima IV в излучении медного анода методом полнопрофильного анализа по Ритвельду.

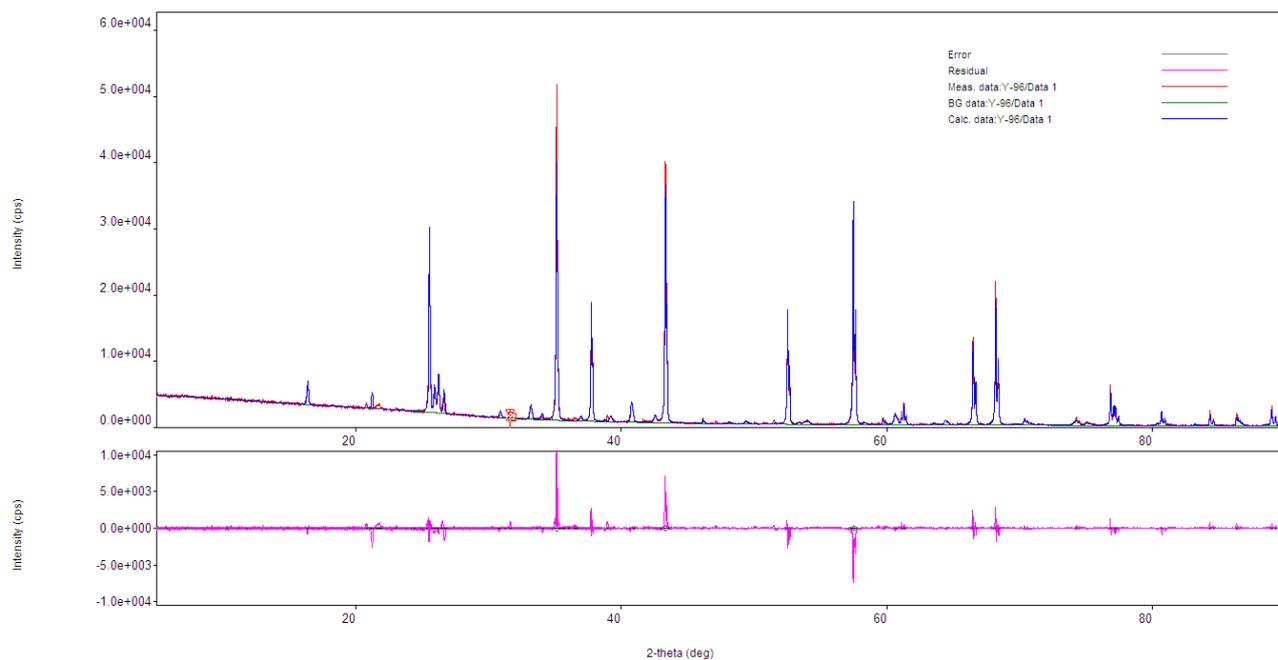


Рисунок 4.16 – Рентгенограмма образца «1».

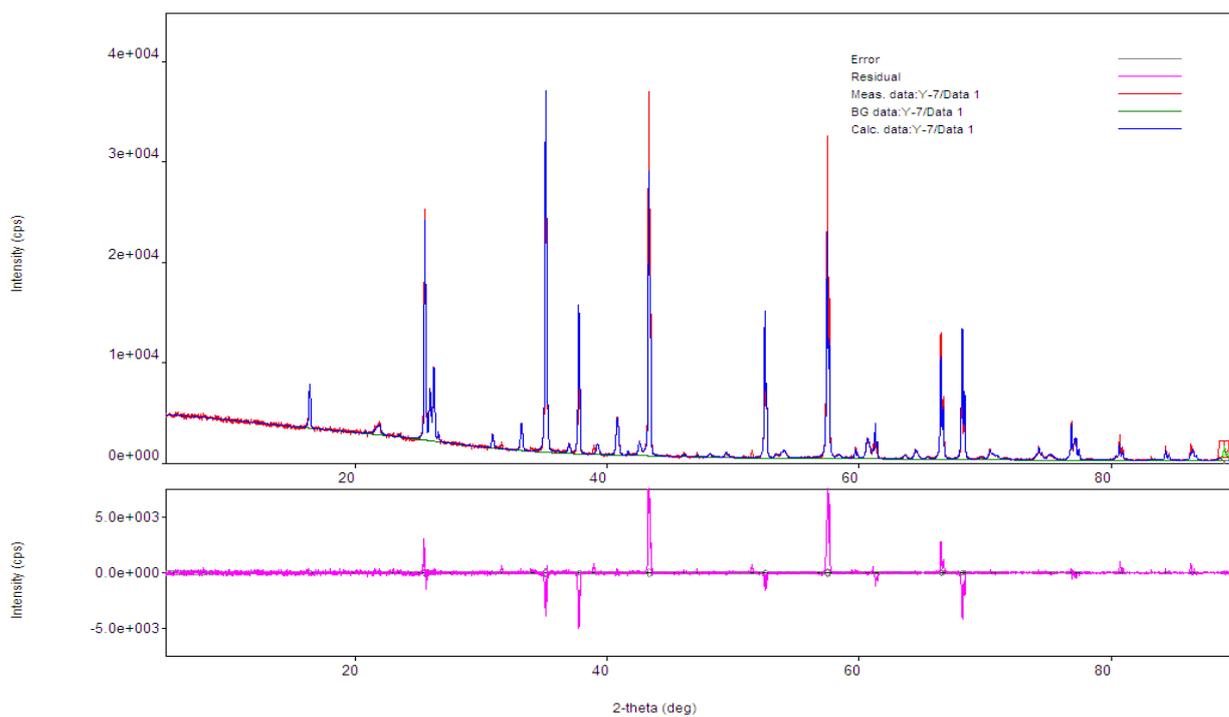


Рисунок 4.17 – Рентгенограмма образца «7б».

Все распределения фаз в процентном соотношении указаны в таблице 4.6

Таблица 4.6 – Фазовый состав образцов

Образец	Фазовый состав			
	Корунд	Кварц	Муллит	Кристобалит
	Al_2O_3	SiO_2	$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	SiO_2
1	99,5	0,54	-	-
7б	77.2	3.6	17.4	1.74

Согласно разделению рентгенограммы на фазы методом полнопрофильного анализа по Ритвельду в образце «1» основной фазой являются корунд и небольшое количество кварца за счет добавки SiC, в образце «7б» также основной фазой являются корунд, и дополнительно образуется муллит, кварц и кристобалит (таблица 4.6). Различие в процентном содержании фаз хорошо видно на совмещенных рентгенограммах (рисунок 4.18)

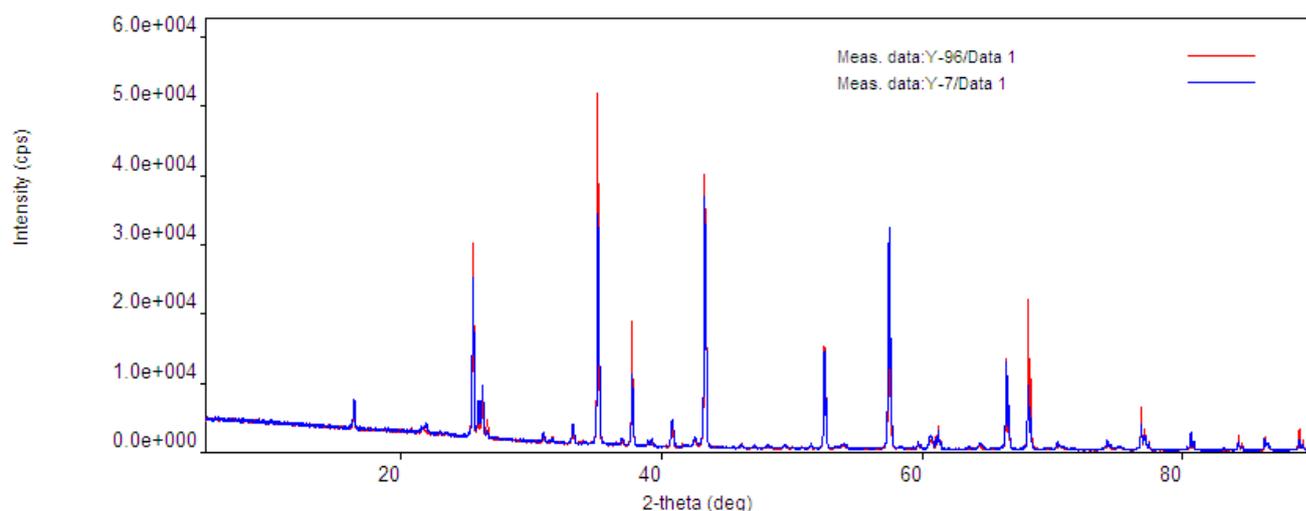


Рисунок 4.18 – Совмещенные рентгенограммы образцов «1» и «7б»

Согласно разделению рентгенограммы на фазы методом полнопрофильного анализа по Ритвельду в образце «7б» присутствуют, в основном, корунд 77.2%, муллит 17.4%, кварц 3.6% и кристобалит 1.74% (таблица 4.6).

В образцах с содержанием плавленного кварца 12,5%, прокаленных при температуре 1360°C (образец 7б) появляется кристаллическая фаза (α -кристобалит, таблица 4.6).

При охлаждении опытных 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. Однако содержание кристобалита в стержне не должно превысить оптимальных значений (1–5 %) с тем, чтобы излишнее снижение его прочностных свойств до опасных значений (менее 15–20 МПа) не привело к ухудшению размерной точности отливки или браку по деформации или слому стержня [83].

4.2.8 Исследование удельной теплоемкости

Удельная теплоемкость образцов определялась на высокоточном дифференциально сканирующем калориметре NETZSCH DSC 404 F3 PEGASUS, результаты представлены на рисунках 4.19-4.21.

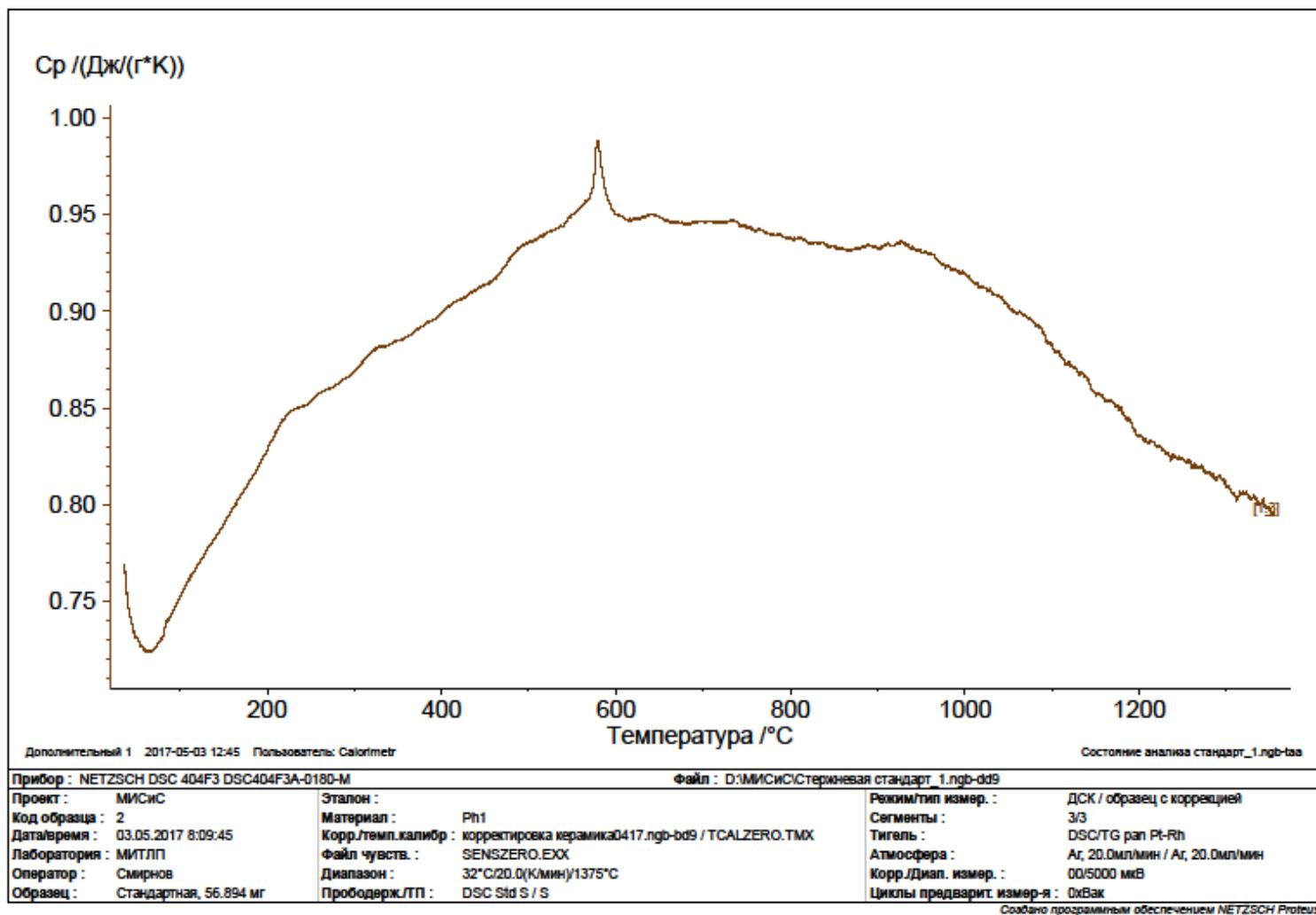


Рисунок 4.19 – Температурная зависимость удельной теплоемкости стержневого состава 1

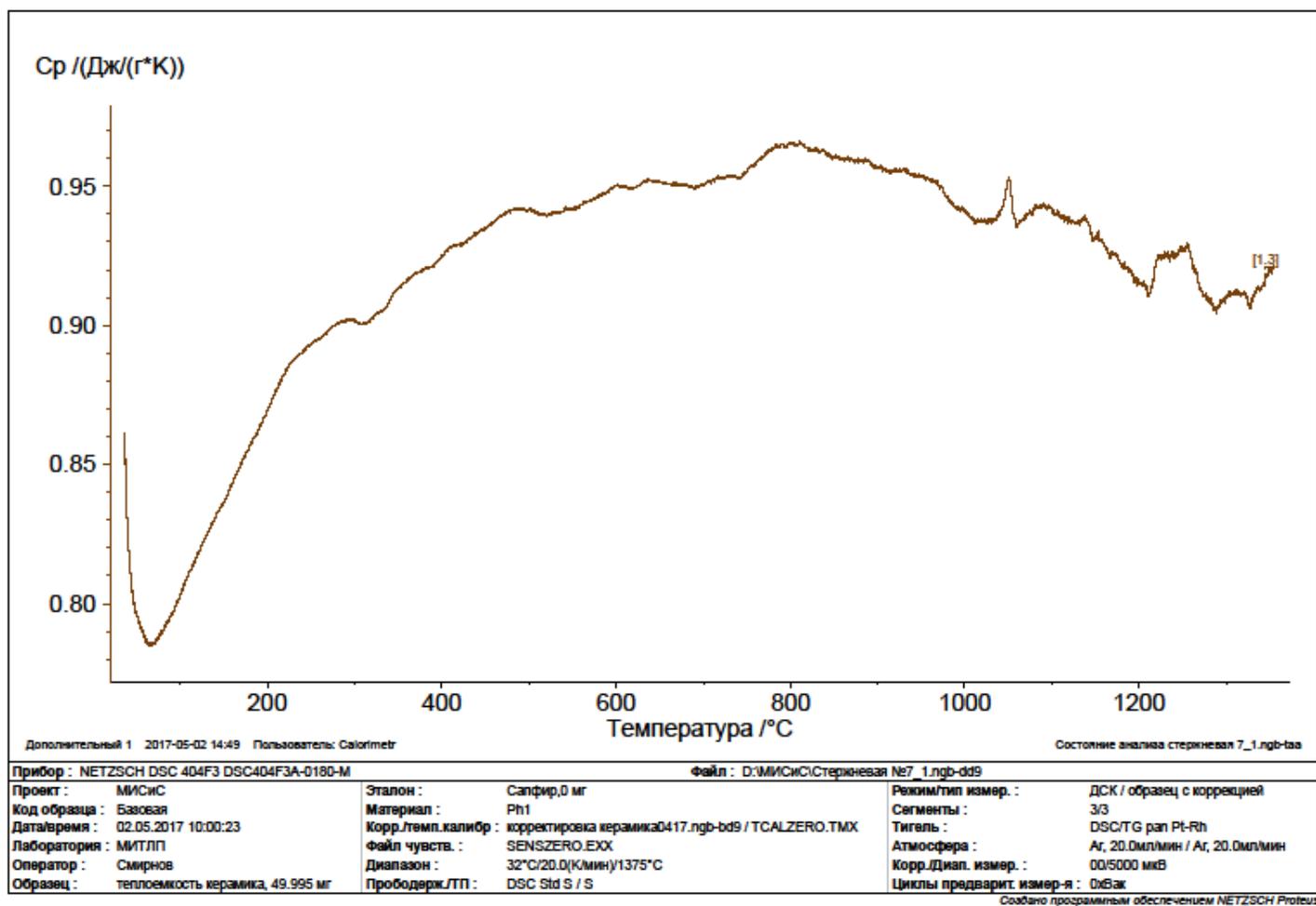


Рисунок 4.20 – Температурная зависимость удельной теплоемкости стержневого состава 7б после выдержки при температуре (обжиг образца при 1350°C в течение 7 ч)

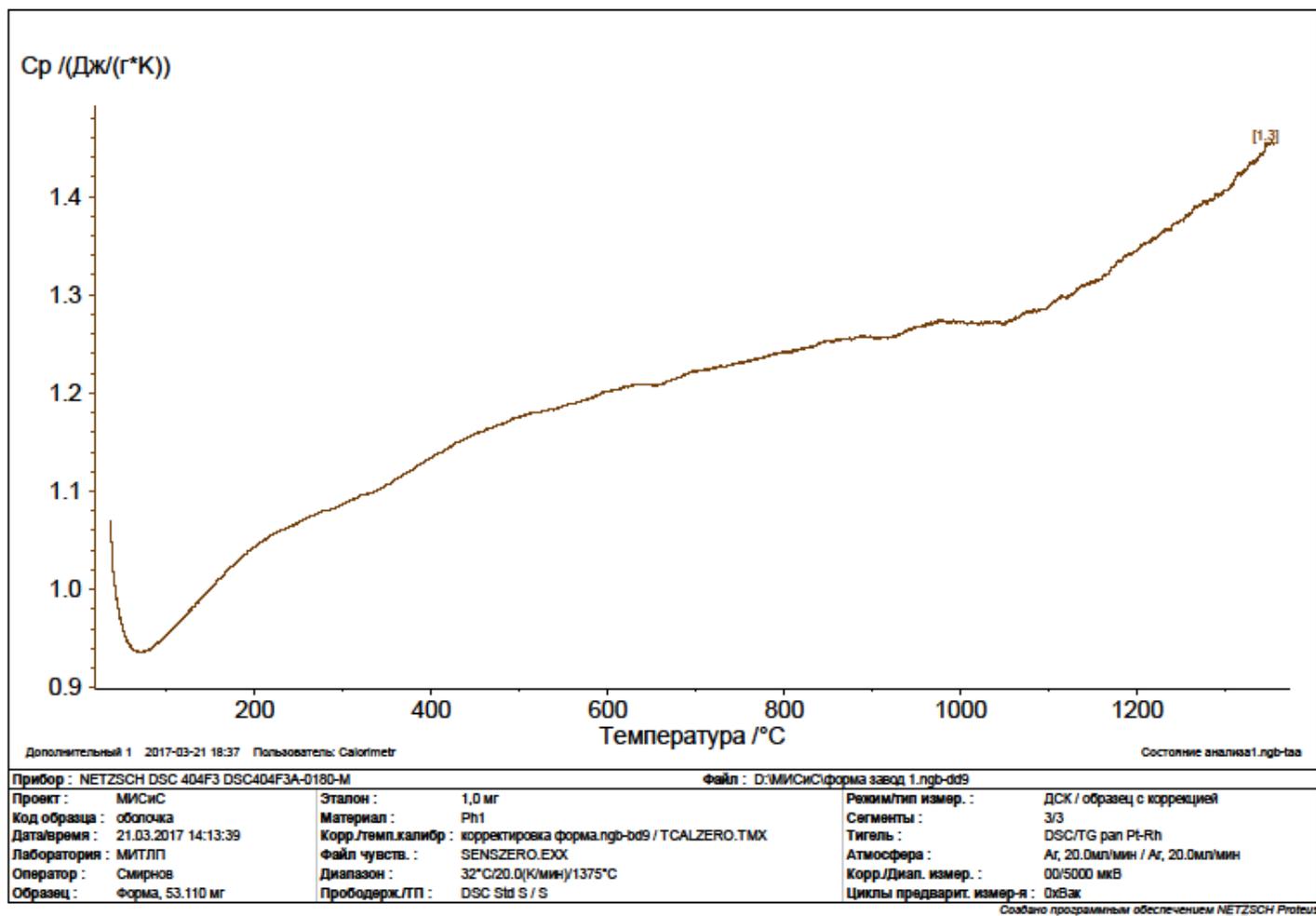


Рисунок 4.21 – Температура зависимости удельной теплоемкости электрокорундовой оболочковой формы на кремнезольном связующем (форма прокалена при 1050°C в течение 5 ч)

1. При анализе приведенных на рисунках 4.19 и 4.20 теплоемкостей серийного и опытного стержневых составов выявлено, что закономерность изменения практически идентична ($\sim 0,15-0,2$ Дж/кг $^{\circ}$ С) вначале (до 600–800 $^{\circ}$ С), но в дальнейшем уже наблюдается ее заметное снижение у серийного состава при нагреве до высоких ($\sim 1300^{\circ}$ С) температур.

Для объяснения причин тепловых эффектов в изучаемых образцах, характеризующихся пиками на кривых, необходимы дополнительные, более тонкие исследования.

Теплоемкость материала прокаленной оболочковой формы на кремнезольном связующем (рисунок 4.21) монотонно растет в интервале указанных температур (от 0,95 до 1,45 Дж/кг $^{\circ}$ С), что свидетельствует об отсутствии в нем превращений с поглощением или выделением теплоты.

4.2.9 Сравнительный анализ седиментации стержневых смесей аналитическим методом

Проведен анализ следующих составов:

- 1 – керамическая стержневая смесь, используемая в серийном производстве;
- 2 – опытная керамическая стержневая смесь, в которой часть фракций электрокорунда заменена на плавленный диоксид кремния.

Составы серийной и опытной стержневых смесей представлены в таблице 4.1.

Для анализа и сравнения седиментационных свойств рассматриваемых стержневых смесей воспользовались разработанной программой [81]. Для сравнительного анализа приняли, что процесс седиментации дисперсных частиц протекает при следующих условиях [84]:

- 1) содержание дисперсной среды (термопластификатора – парафин) в обоих смесях одинакова;

- 2) температура протекания седиментационного процесса принята равной 90°C (температура запрессовки);
- 3) вязкость дисперсной среды принята в соответствии с рисунком 1.7 и равна 0,27 Па · с.

Теоретические кривые седиментации для серийной и опытной стержневой смеси, построенные при помощи созданной программы, представлена на рисунке 4.22.

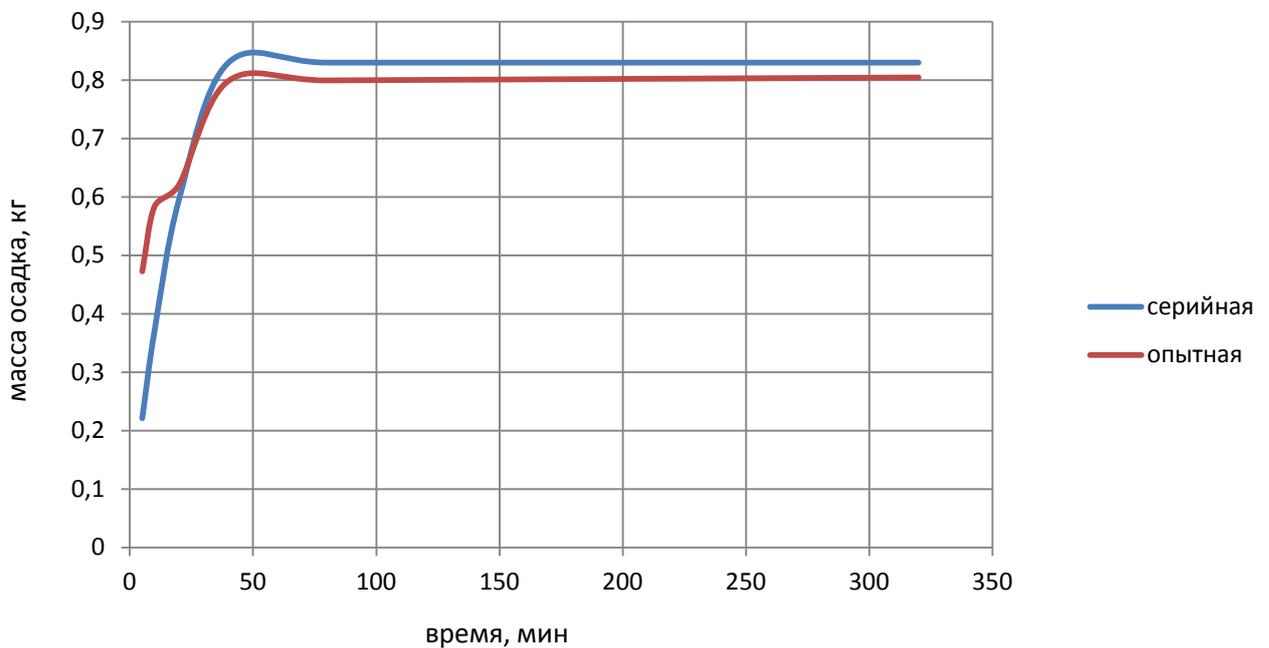


Рисунок 4.22 – Сравнение кривых седиментации серийного и опытного стержневых смесей

Из построенных кривых седиментации видно, что рассматриваемые стержневые смеси подвержены расслоению. В обеих смесях происходит быстрое оседание крупной фракции. Однако масса осадка серийной стержневой смеси больше массы осадка опытной стержневой смеси за приблизительно одинаковое время [84].

4.2.10 Сравнительный анализ седиментации стержневых смесей практическим методом

По приведенной методике были проведены исследования седиментации свойств стержневых смесей составов 1 и 7б .

Была проведена оценка степени процентного изменения содержания крупной фракции в серийной смеси (F120 – 100–120 мкм).

Брали за 100% содержание крупной фракции в первом образце (5,8 грамм) и посчитали, на сколько процентов увеличивается крупная фракция через 30, 60 и 90 минут:

- через 30 минут в образце крупной фракции – 7,71 грамм, т.е. на 33% больше;
- через 60 минут в образце крупной фракции – 7,19 грамм, т.е. на 24% больше;
- через 90 минут в образце крупной фракции – 6,81 грамм, т.е. на 18% больше.

В среднем увеличение крупной фракции больше в последующих стержнях на 25%.

Оценка степени процентного изменения содержания крупной фракции в опытной №7б смеси (F120 – 100–120 мкм).

За 100% принимаем – 5,8 грамма и посчитали насколько больше ее в образцах через 30, 60 и 90 минут:

- через 30 минут в образце крупной фракции–5,88 грамм, т.е. на 1% больше;
- через 60 минут в образце крупной фракции–6,56 грамм, т.е. на 13% больше;
- через 90 минут в образце крупной фракции–5,87 грамм, т.е. на 1% больше.

В среднем увеличение крупной фракции больше в последующих стержнях из опытной смеси на 5%.

Таким образом, при сравнении осаждения крупных фракций выявлено, что седиментация в опытной смеси меньше седиментации в серийной смеси в пять раз.

Для оценки степени изменения содержания фракции 0,05 (F280–F220 – 30–60 мкм) и мелкой фракции (7–30 мкм) было принято, что содержание данных

фракций в первом образце считается первоначальным, а последующие можно рассматривать как предельные колебания [85].

Таким образом, при сравнении образцов из серийной и опытной смеси изменение фракции 0,05 мкм в серийной смеси составляет от минус 2-х до минус 0,9 грамм. В то же время в опытной смеси составляет от плюс 0,3 до минус 1,1 грамма, что подтверждает более медленную седиментацию.

Содержание самой мелкой фракции в серийных образцах составляет от плюс 0,43 до минус 0,4, а в опытных от плюс 0,3 до минус 0,2 грамм, что также подтверждает более медленную седиментацию опытной смеси.

4.3 Моделирование процесса заполнения блока отливок при различных диаметрах дросселя в стояке

Анализ процесса литья охлаждаемых лопаток в оболочковые формы по трем вариантам ЛПС (заливка «сверху», «сифоном» и комбинированная) показал, что величина коробления стержней и расположение участков с максимальной разностенностью отливки зависят как от схемы раззорования знаков керамического стержня, так и от величины возникающего в процессе литья градиента температуры по длине стержня. Нагрузки, действующие на стержень в этих условиях, связаны с неравномерным его прогревом по длине и сечению в процессе заполнения литейной формы металлом.

Характер распределения температуры по высоте стержня показан на рисунке 4.23 [3]. При заливке сверху стержень омывается жидким металлом по всей длине за время заполнения рабочей полости формы (не более 1с). Возникающие при этом термические напряжения и их воздействия на стержень, существенно меньше, чем при заливке «сифоном». При заливке «сифоном» прогрев стержня происходит одновременно с поднимающимся уровнем жидкого металла, и время действия на стержень максимальных термических напряжений соизмеримо со временем заполнения литейной формы. С возрастанием этого времени увеличивается деформация стержня.

Снижение деформации стержня наблюдается при раззоривании знаков вблизи его участков, подвергающихся воздействию максимальных термических напряжений. При заливке «сифоном» и по комбинированной литниковой системе наибольший эффект достигается при раззоривании нижнего знака, а при заливке «сверху» – верхнего знака.

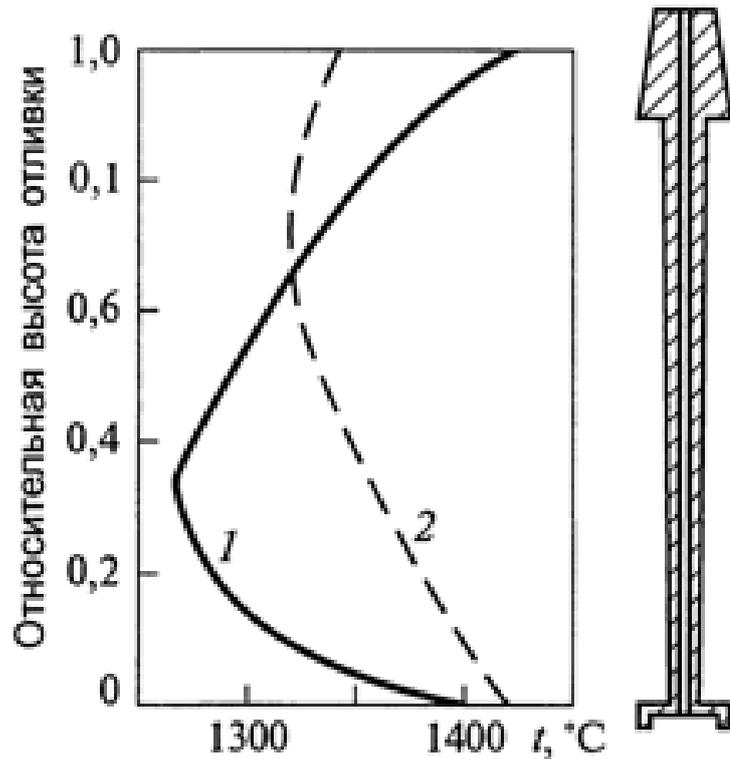


Рисунок 4.23 – Распределение температуры по высоте стержня при комбинированном способе подвода металла. [3] Скорость заливки металла, кг/с:
1 – 1,5–2; 2 – 0,5–0,7

Раззоривание знаков стержня осуществляется двумя способами: либо наклейкой по периметру его знаковой части пленки на полимерной основе толщиной 0,05–0,10 мм, либо пропиткой растворами полимерных соединений с одновременным парафинированием торца знаковой части не менее 2 мм. Влияние способа раззоривания керамического стержня на размерную точность литых лопаток показало (рисунок 4.24), что оба способа по эффективности равнозначны.

Необходимо отметить, что рассмотренная методика раззазоривания исключает возникновение термических напряжений в стержне, связанных с различным тепловым расширением стержня и литейной формы как в процессе прокалики, так и при заливке металлом.

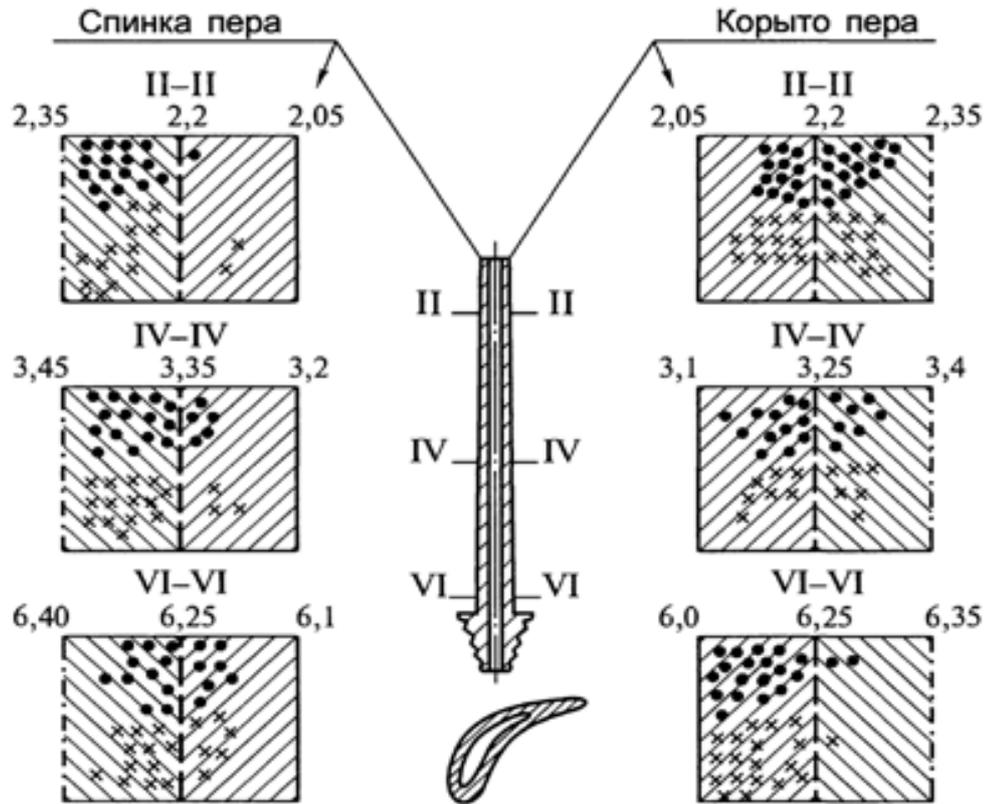


Рисунок 4.24 – Влияние способа раззазоривания керамического стержня на размерную точность литых лопаток [3]:

— — — — — допустимая минимальная толщина стенки пера по чертежу;
 — — — — — допустимая максимальная толщина стенки пера по чертежу;
 — · — · — · — литейный допуск; ● — толщины стенок лопаток, отлитых с наклейкой на знаки стержня полимерной пленки; x — то же, с пропиткой знаков стержня растворами полимерных связующих

Из вышеизложенного вытекает, что необходимо обеспечить преимущественно верхнее заполнение лопаток, с сифонной подпиткой.

Для решения данной задачи необходимо выбрать оптимальное сечение дросселя.

Данная задача решалась путем моделирования заливки блока лопаток с различными сечениями дросселя (рисунок 4.25) в системе ProCast и сравнивалась с некоторыми практическими данными.

Моделирование проводилось по следующим параметрам:

- температура заливаемого сплава – 1520°C ;
- температура блока – 1000°C ;
- диаметр дросселя в расчетах являлся изменяемым параметром и принимался равным 11, 12, 14, 15,5 и 18 мм.



Рисунок 4.25 – Изображение дросселя на стояке

Моделирование заливок блоков лопаток с диаметрами дросселя 11, 12, 14, 15,5 и 18 мм соответственно (рисунок 4.26).

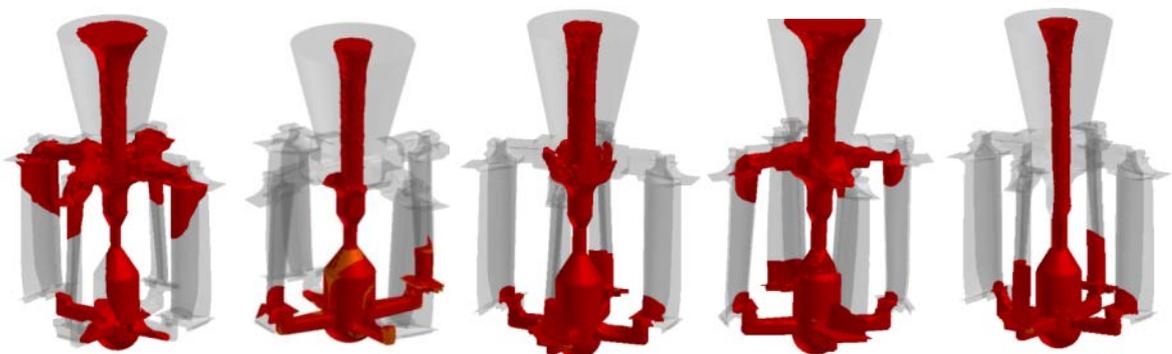


Рисунок 4.26 – Моделирование заливки блоков лопаток с диаметрами дросселя 11, 12, 14, 15,5 и 18 мм соответственно.

Сравнительный анализ начала заполнения блоков показал, что блоки с диаметрами дросселя 12, 14 и 18 мм заполняются аналогично друг другу, а именно преимущественно снизу. Блок с диаметром дросселя 11 мм, заполняется сверху, и блок с диаметром дросселя 15,5 мм, заполняется как сверху, так и сифонным способом.

На рисунке 4.27 показано место слияния потоков сплава в блоках в зависимости от диаметра дросселя.



Рисунок 4.27 – Слияние потоков в блоках с диаметрами дросселя 11, 12, 14, 15,5 и 18 мм соответственно

Блок с диаметром дросселя 11 мм, заполняется преимущественно сверху. Встреча потоков происходит у основания бандажной полки.

Блок с диаметром дросселя 12 мм, заполняется аналогично блоку с диаметром дросселя 14 мм – преимущественно снизу. Слияние потоков происходит в пере лопатки у замковой части.

Блок с диаметром дросселя 15,5 мм заполняется как сверху, так и снизу. Слияние потоков происходит в средней части пера лопатки.

Блок с диаметром дросселя 18 мм заполняется сифонным способом. Слияние потоков происходит в замковой части лопатки.

Блоки заполнились за время: 1,51 с, 3,0 с, 2,3 с, 1,63 с и 2,4 с - соответственно. Таким образом, блок с диаметром дросселя 11 мм имеет наименьшее время заполнения – 1,51 с.

В общей сложности выполнено моделирование заливки 5 моделей с диаметром дросселя - 11, 12, 14, 15,5 и 18 мм. Показано, что изменяя диаметр дросселя можно управлять временем заполнения блока и места слияния потоков снизу и сверху. Исходя из теоретических предпосылок и результатов моделирования, наиболее оптимальным является заливка блока с диаметром дросселя 11 мм, поскольку заливка происходит сверху, за минимальное время равное 1,51 с, что способствует равномерному прогреву стержня по всей длине, а, следовательно, снижению времени действия термических напряжений на стержень.

Анализ модели заливки блока с диаметром дросселя 18 мм, показывает, что заполнение формы происходит преимущественно сифонным способом, и керамический стержень подвергается неравномерному прогреву по длине. На стержень оказывается более длительное воздействие термических нагрузок, что, в свою очередь, влияет на его коробление и может приводить к повышенному браку по геометрии, а также к пористости в замковой части.

Сравнительный анализ качества отливок с дросселями 12 и 15,5 мм показывает, что увеличение диаметра дросселя до 15,5 мм приводит к снижению качества полученных лопаток по всем приведенным показателям (визуальному и рентгеновскому контролю, по результатам замера толщин пера лопатки).

Моделирование заливки блока с диаметром дросселя 14 мм, показало, что заполнение происходит аналогично блоку, изготавливаемому по серийной технологии (с диаметром дросселя 12 мм), но значительно сокращает время заливки блока (на 0,7 - 0,5 с) и снижает неравномерность прогрева стержня.

4.4 Выводы по главе 4

2. Исследование на прочность при изгибе образцов из шести различных стержневых составов показало, что электрокорундовые образцы с минерализаторами (SiC, АСД-4), прокаленные при 1350°C (номера образцов 1 и 2), имеют требуемые для обеспечения необходимой размерной точности лопаток прочностные характеристики, т.е. не менее 15 МПа (150 кгс/см²). Аналогичный вывод может быть сделан и в отношении образцов, содержащих 20–25% плавленного кварца, прокаленных при 1250°C. В то же время, повышение температуры прокалики до 1350°C (образцы 3 и 5) приводит к их резкому разупрочнению. При испытании образцов 7б и 8б, прокаленных при 1360°C, выявлено, что в интервале 20–1000°C предел прочности при изгибе у них возрастает с 14–19 до 21–22 МПа, а дальнейший нагрев до 1200°C приводит уже к снижению этого показателя до 18–19 МПа, т.е. он все еще продолжает оставаться на уровне, заметно превышающем минимально допустимые для стержней значения (не менее 15 МПа).

3. Анализ данных линейной усадки показал, что значения относительной усадки образцов опытного стержневого материала, подвергнутых обжигу при температурах 1250°C (образец 7а) и 1360°C (образцы 1, 2, 7б), близки к требуемой величине (не более 0,4 %), в то время как у образцов 4, 6 и 8а наблюдается более чем двухкратное превышение этой характеристики, что является существенным недостатком данного материала

4. Результаты исследования кажущейся пористости показали, что все исследуемые образцы обладают высокой пористостью (порядка 40%) и удовлетворяют требованиям, предъявляемым к стержневым составам

5. Выявлено, что в наибольшей степени по термическому расширению с оболочковой формой согласуется опытный стержневой состав 7б, коэффициент термического расширения которого при температурах 900–1300°C находится в пределах $7,8\text{--}8,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

6. Микроскопическим и рентгеноструктурным анализом установлено, что в образце «1» основной фазой являются корунд и небольшое количество кварца за счет добавки SiC, в образце «7б» также основной фазой являются корунд и дополнительно образуется муллит, кварц и кристобалит, что положительно сказывается на его термоустойчивости.

7. При анализе теплоемкости серийного и опытного стержневых составов закономерность изменения практически идентична ($\sim 0,15\text{--}0,2$ Дж/кг $^{\circ}\text{C}$) вначале (до $600\text{--}800^{\circ}\text{C}$), но в дальнейшем уже наблюдается ее заметное снижение у серийного состава при нагреве до высоких ($\sim 1300^{\circ}\text{C}$) температур.

8. Практический сравнительный анализ седиментации показал, что увеличение крупной фракции в серийных образцах происходит в среднем на 25%, а в опытных на 5%, т.е. седиментация в опытной смеси меньше седиментации в серийной смеси в пять раз, что подтверждено теоретическими расчетами.

9. Моделирование заливки пяти моделей с диаметром дросселя - 11, 12, 14, 15,5 и 18 мм показало, что изменяя диаметр дросселя можно управлять временем заполнения блока и места слияния потоков снизу и сверху. Исходя из теоретических предпосылок и результатов моделирования, наиболее оптимальным является заливка блока с диаметром дросселя 11 мм, поскольку заливка происходит сверху за минимальное время равное 1,51 с, что способствует равномерному прогреву стержня по всей длине, а, следовательно, снижению времени действия термических напряжений на стержень.

ГЛАВА 5 АПРОБАЦИЯ НОВОГО СОСТАВА СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ЛИТЬЕ ЛОПАТОК ГТД В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Апробация стержневых составов проводилась на стержнях для рабочих лопаток (деталь №100-04-1503) с использованием пресс-автомата CLEVELAND СТМ-25 (рисунок 5.1)

В бак-термостат пресс-автомата заливали установленное количество стержневой смеси, изготовленной по технологии, описанной в предыдущей главе (рисунок 5.1). В баке автоматически поддерживалась температура смеси 85–90°С. Стержневой состав непрерывно перемешивался мешалкой, вращающейся со скоростью 30 об/мин.



Рисунок 5.1 – Внешний вид пресс-автомата с пресс-формой на столе

Собранную пресс-форму (рисунок 5.2) устанавливали на стол автомата и нагружали необходимым давлением (250 МПа). Устанавливали необходимое давление прессования (8 МПа) и температуру стержневой смеси 85-90°C.



Рисунок 5.2 – Внешний вид разобранной пресс-формы стержня (нижняя половина пресс-формы стационарно закреплена на столе пресса)

Запрессовка стержневой смеси в пресс-форму совершалась в автоматическом режиме. Стержень-сырец выдерживался в пресс-форме 25 секунд.

На сырых стержнях непосредственно после запрессовки обнаруживались дефекты типа утяжин (рисунок 5.3а), неровностей на выходной кромке (рисунок 5.3б) и сломы (рисунок 5.3в). В основном дефекты были обнаружены на стержнях-сырцах, изготовленных из серийной смеси (более 50%), так как ее состав не отработывался для применения на пресс-автоматах. Появление этих дефектов обусловлено как недостатками, так и нарушениями технологии подготовки стержневой смеси и отклонениями от установленных режимов ее запрессовки.

*a**б**в*

Рисунок 5.3 – Виды брака стержней при запрессовке: *a* – утяжина;
б – неровности на выходной кромке; *в* – слом кромки

После окончания цикла запрессовки стол с пресс-формой автоматически возвращался в исходное положение, после чего производилась разборка пресс-формы. Снятый стержень с пресс-формы обдувался струей сжатого воздуха. Остатки стержневой смеси от предыдущей запрессовки тщательно выдувались сжатым воздухом.

Облой по разьему полуформы, следы на поверхности стержня от вставок, наделок в полуформе не должны быть более 0,1 мм.

Зачищали облой стержня и устанавливали эталон первого годного стержня. Отриховывали стержень в драере в течение 1 минуты.

Изготовленные стержни-сырцы в количестве по 60 штук из опытной и серийной стержневой смеси (рисунок 5.4) подвергались обжигу в проходной газовой печи ПГ-30 в специальных электрокорундовых коробах в засыпке глиноземом.

Керамические стержни осторожно, не допуская их деформации, укладывались вертикально более массивным торцем вниз в короб в соответствии с требованиями технологической карты.

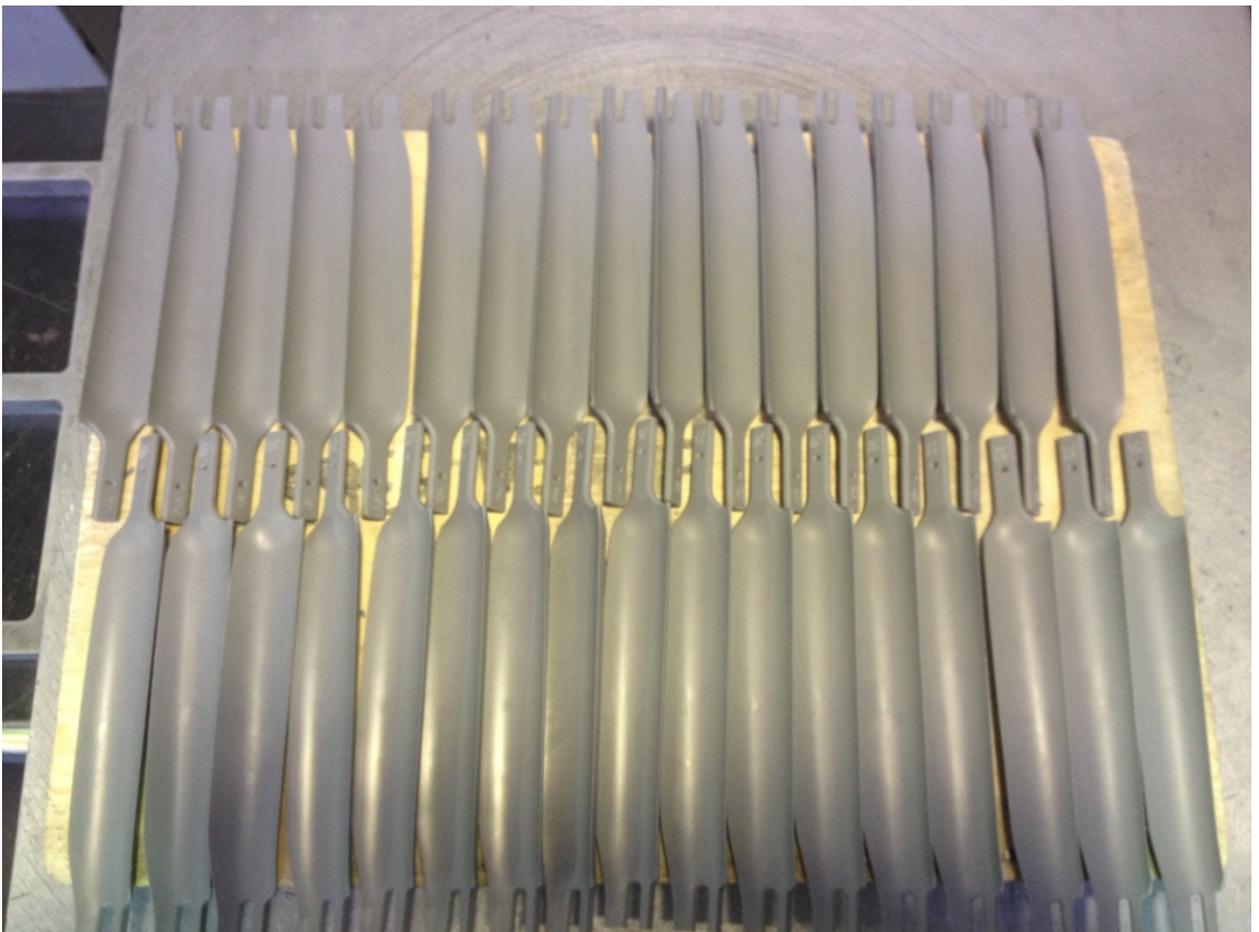


Рисунок 5.4 – Изображение стержней-сырцов

Загружали короба в печь. Расстояние между коробами было не менее 50 мм. Расстояние от боковых нагревателей не менее 120 мм. Начальная температура в печи была не выше 50 °С.

Выдерживали короба со стержнями при температуре 1320–1380 °С в течение 10–12 час. Отключали печь и охлаждали ее до температуры 500–700 °С. Выгружали короба из печи, соблюдая меры безопасной работы.

Разбирали короба со стержнями и записывали в сопроводительной карте номер партии обжига, количество выгруженных стержней, дату разборов коробов, количество отбракованных стержней после разбора коробов.

Зачищали стержни согласно эталону, отделив предварительно стержни с окончательным браком (Таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Результаты контроля стержней после обжига

Стержневой состав	Количество запрессованных стержней	Брак по различным дефектам, в %
1	60	30
7 (образец 7б)	60	6

Большинство дефектов стержней, выявляемые после обжига (рисунок 5.5), выявляются еще на стадии подготовки и запрессовки смеси, а причиной других являются нарушения режимов термообработки (превышение скорости подъема температуры, их конечных значений в печи и т.п.).

После зачистки гладко замазывали допустимые дефекты и царапины замазкой на основе кремнийорганической смолы К-101.

Пропитку керамических стержней в растворе смолы производили один раз по требованию технологической карты. После каждой пропитки стержни (рисунок 5.6) сушили на воздухе не менее 30 мин или в термошкафу при температуре 150–200°С в течение 5–10 мин.

Стержни, соответствующие эталону, передавались на окончательный контроль.

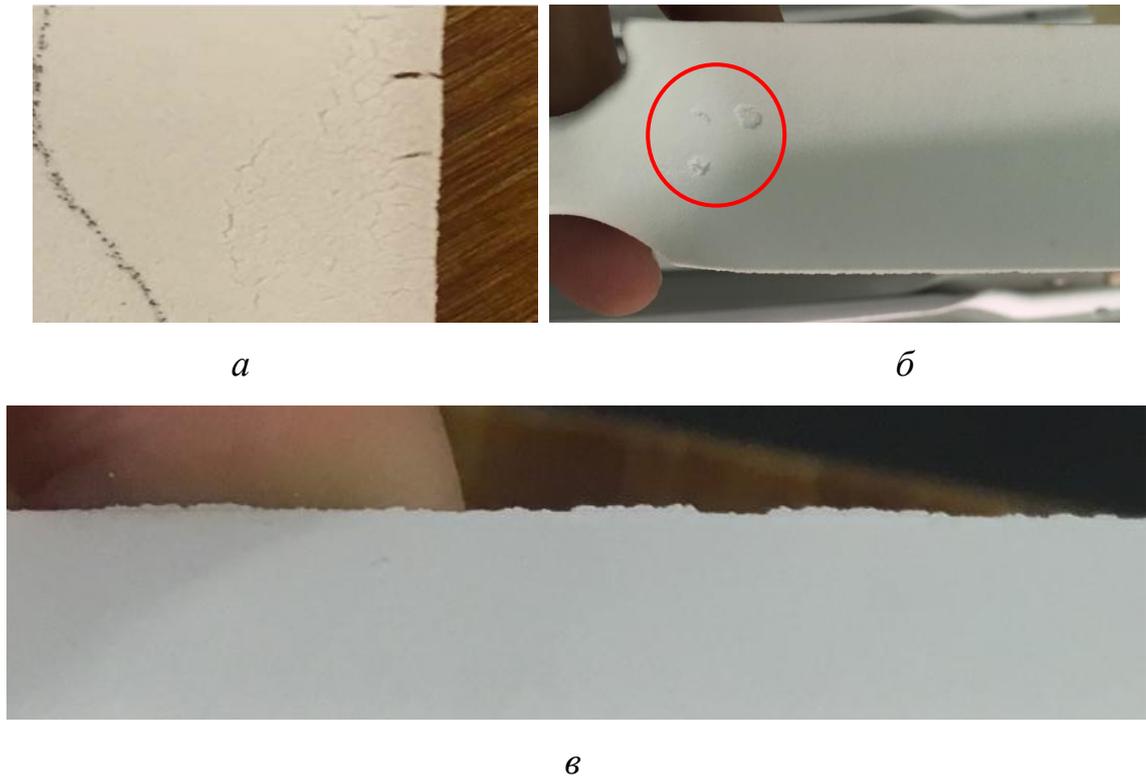


Рисунок 5.5 – Дефекты стержней при обжиге: *а* – растрескивание кромки; *б* – вспучивание; *в* – неровности на выходной кромке [85]



Рисунок 5.6 – Внешний вид пропитанных стержней

Модели отливок лопаток (деталь №100-04-1503) изготавливались на пресс-автомате СТМ-50 (рисунок 5.7) из модельной массы KINDT-COLLINS. Перед началом работы брикеты модельной массы загружались в бак-термостат пресс-автомата, где происходило ее расплавление и нагрев до заданной температуры. На данном оборудовании установка стержня на нижнюю половину пресс-формы, сборка-разборка пресс-формы и съем модели из нее, подготовка половин пресс-формы к реализации следующего цикла запрессовки осуществлялась оператором. Поддержание температуры модельной массы при непрерывном ее перемешивании и сам процесс запрессовки модели производился автоматически, с контролем технологических параметров на экране дисплея пресса. Отметим, что перед запрессовкой модели, стержни и половины пресс-формы подогревались в сушильной печи до температуры 35–40°C .

Параметры запрессовки модельной массы:

- давление – 2,9 МПа;
- температура – 75–80°C;
- время выдержки модели в пресс-форме – 45 с.



Рисунок 5.7 – Внешний вид пресс-автомата СТМ-50

Разрушение стержня при запрессовке моделей обусловлено в основном неаккуратностью обращения с ними при установке стержня в пресс-форму модели (рисунок 5.8) или извлечении из нее уже запрессованной модели со стержнем. Характерный дефект такого рода – слом хвостовика стержня (рисунок 5.9).



Рисунок 5.8 – Установка стержня в пресс-форму



Рисунок 5.9 – Изображение модели лопатки со сломом хвостовика стержня

Четыре модели лопаток со стержнями собирались в блок по методике, принятой в серийном производстве (рисунок 5.10, а). Таким образом изготавливалось 3 блока, в каждом из которых по 2 стержня из серийной смеси и 2 стержня из опытной смеси, чтобы лопатки находились в равных условиях при заливке.

Изготовление оболочковых форм лопаток по выплавляемым моделям производилось по технологии, принятой на ПАО ОДК УМПО, с использованием роботизированного облицовочного комплекса Shell-O-Matic.

Готовый блок лопаток (рисунок 5.10, б), размещали в контейнере перед передачей его на операцию заливки. Заливка керамического блока также производилась по стандартной технологии ПАО ОДК УМПО.



а



б

Рисунок 5.10 – Изображение блока лопаток (а) и керамической оболочки (б)

После отбивки керамики и отрезки литниково-питающей системы из отливки удалялся стержень по новой технологии с помощью гидродинамической установки (рисунок 5.11) [86].



Рисунок 5.11 – Гидродинамическая установка для удаления стержней

Визуальный и рентгеновский контроль показал полное удаление стержней. Все опытные отливки были подвергнуты контролю по геометрической точности. В ходе проверки визуальным осмотром выявлялись внешние дефекты, осуществлялся контроль толщины стенок по перу и корыту по трем сечениям (Рисунок 5.12), а также точности конфигурации профиля лопаток.

Результаты контроля толщин стенок пера лопаток представлены в Приложении В. Буквы с индексами в таблицах обозначают контрольные сечения лопатки в соответствии с рисунком 5.12.

Визуальный осмотр лопаток, полученных с применением стержней из опытной смеси, не выявил на них перечисленных поверхностных дефектов. В то же время, две лопатки из шести, полученные с серийными стержнями, забракованы при визуальном контроле, оставшиеся четыре признаны годными.

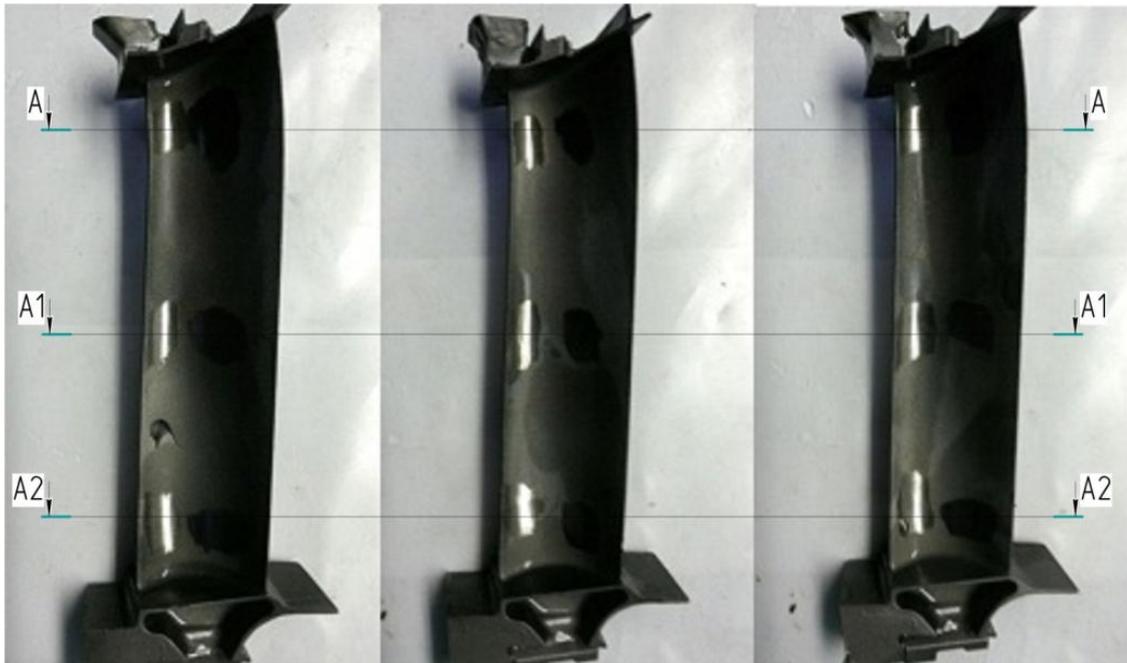


Рисунок 5.12 – Расположение сечений, по которым производился контроль стенок лопатки

По результату контроля толщины пера лопатки с опытными стержнями забраковано две лопатки, а с серийными стержнями три.

В целом из шести лопаток с опытными стержнями забраковано две, а из шести лопаток с серийными стержнями забраковано три. Можно сделать вывод, что отливки с опытными стержнями по качеству не уступают и на 17% увеличили выход годных лопаток, чем отливки с серийными стержнями.

Проведенный сравнительный анализ качества отливок из трех блоков приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты контроля качества отливок

Используемая стержневая смесь	Брак, в %, обнаруженный:		
	при визуальном контроле	при рентгеновском контроле	измерении толщины стенки пера лопатки
Серийная	33	0	50
Опытная	0	0	33

Анализ положения стержня в модели показывает, что стержень в основном располагается в середине модели и соответствует требованиям конструктора.

Одна годная по геометрии лопатка, полученная с опытным стержнем, разрезалась на темплеты. Далее из темплетов изготавливались шлифы. После травления шлифов исследовали микроструктуру кромок внутренней полости отливки на световом микроскопе микроскопа Nilcon Eclipse MA 100 (рисунок 5.13).

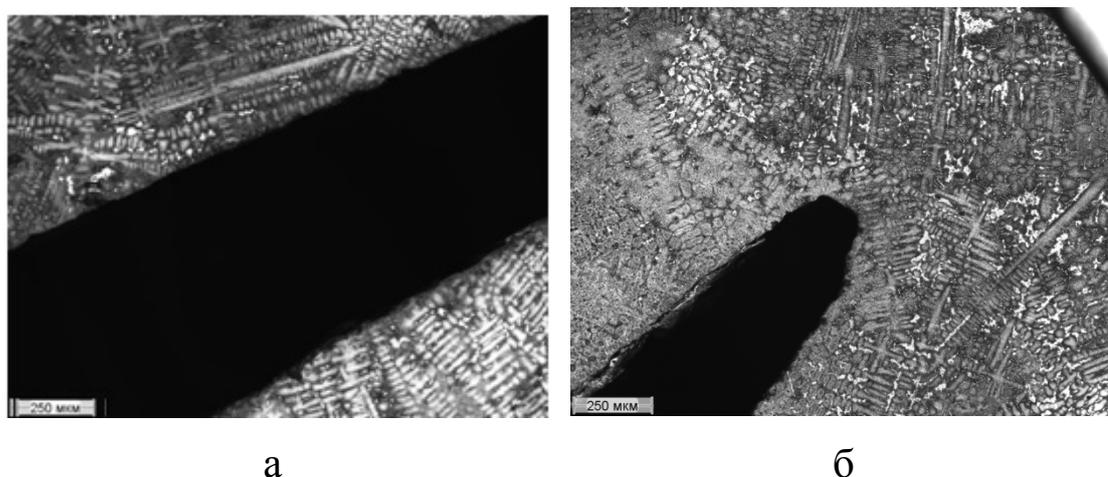


Рисунок 5.13 – Микроструктура отливок лопаток на границе раздела «металл-стержень», увеличение $\times 100$:

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

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

Анализ точности лопаток, полученных со стержнями из разработанной стержневой смеси, показал, что отливки по качеству не уступают и на 17% увеличили выход годных лопаток, чем отливки с серийными стержнями. Разработанная смесь может быть рекомендована к внедрению в производство.

По результатам апробации опытной стержневой смеси было выдано заключение о внедрении ее в производство с использованием новых автоматизированных и роботизированных установок.

5.1 Выводы по главе 5

1. Проведена производственная апробация опытной стержневой смеси, а также сравнение ее с серийной стержневой смесью. В процессе получения стержней выявлено, что с применением пресс-автоматов лучше себя показала вновь разработанная стержневая смесь. Брак по изготовлению стержней «сырцов» из серийной смеси составил более 50%, из опытной смеси – 10%. Брак после обжига стержней из опытной смеси составил всего 6%, тогда как на серийной смеси – 30%.
2. Анализ точности лопаток, полученных со стержнями из разработанной стержневой смеси, показал, что отливки по качеству не уступают и на 17% увеличили выход годных лопаток, чем отливки с серийными стержнями. Разработанная смесь может быть рекомендована к внедрению в производство.
3. Анализ микроструктуры кромок внутренней полости отливки показал, что на границе раздела «металл-стержень» не происходит взаимодействия в отливках, изготовленных с использованием стержней из серийной и опытной смеси. Опытная стержневая смесь является инертной по отношению к сплаву.

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 химического состава стержневой смеси.

2. Проанализированы методы для получения плотной упаковки составов с различными фракциями и показано, что отличительной особенностью стержневой смеси является наличие каркасообразующей фракции, поэтому необходимо правильно выбрать размерную последовательность фракционного состава порошков и соблюсти синхронность между химическим и фракционным составами стержневой смеси.

3. Описано решение задачи 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

4. 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 30 % относительно серийной смеси, что подтверждают теоретические расчеты седиментационной устойчивости смеси.

5. 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.

6. Разработана стержневая смесь с улучшенными физико-химическими и механическими свойствами. Изгибная прочность разработанной стержневой смеси 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, 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.

7. 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 ТНД с использованием стержней, изготовленных из разработанной стержневой смеси. Отлитые лопатки успешно прошли все виды контроля, предусмотренные в серийном производстве. Разработанный стержневой состав рекомендован к внедрению в серийное производство ПАО ОДК-УМПО для 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работы авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / Под общей редакцией д.т.н. В.А. Скибина, к.т.н. В.И. Солонина. – М.: ЦИАМ, 2004. – 424 с.
2. Елисеев Ю.С. Перспективные технологии производства лопаток ГТД / Двигатель. – 2001. – №5(17). – С. 4–7.
3. Абрамсон, И.Д. Керамика для авиационных изделий. – М.: Оборонгиз, 1963. – 240 с.
4. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. /под общ. ред. Е.Н. Каблова. – М.: Наука, 2006 – 631 с.
5. Павлушкин Н.М. Спеченный корунд. – М.: Госстойиздат, 1961. – 210 с.
6. Харитонов Н.П., Островский В.В. Термическая и термоокислительная деструкция полиограносилоксанов. – Л.: Наука, 1982. – 205 с.
7. Галахов Ф.Я. (отв.ред.). Диаграммы состояния систем тугоплавких оксидов: Справочник. Вып. 5. Двойные системы. Часть 4. 1988 – 348с
8. Будников П.П., Балкевич В.Л., Бережной А.С. Химическая технология керамики и огнеупоров. – М.: Стройиздат. 1972. – 551 с.
9. Беляков А. В. Легкоудаляемые керамические стержни для литья лопаток ГТД по выплавляемым моделям / А. В. Беляков, И. В. Разумнова, И. М. Демонис, Ю. И. Фоломейкин // Стекло и керамика. – 2012. – № 4. – С. 26–31.
10. Ганеев А.А. Стержневая смесь для пустотелых лопаток / А.А. Ганеев, О.Б. Деменок, С.П. Павлинич, В.В. Смирнов, Б.А. Кулаков // Литейщик России. – 2017. – № 10. – С. 19–22.
11. Исследование основных параметров получения керамических стержней /З.С. Ермолина, В.М. Степанов, И.Д. Абрамсон и др. в кн. Жаропрочные сплавы и прогрессивная технология литья лопаток ГТД: Сборник статей / Под ред. акад. С. Т. Кишкина [и др.] ; Всесоюз. науч.-исслед. ин-т авиац. материалов. – М.:ОНТИ, 1976. – 168 с.

12. Литье охлаждаемых лопаток ГТД : Сб. произв. инструкций : Утв. ВИАМ 27.03.78 и НИАТ 05.01.77 : Взамен сб. произв. инструкций "Литье лопаток ГТД" вып. 1973 г. – М : ОНТИ, 1978. – 311 с.
13. Кайнарский И.С., Дегтярева Э.В. Карборундовые огнеупоры. – Харьков: Metallurgizdat, 1963. – 252 с.
14. Демидова А.А., Гуляев Б.Б. Взаимодействие тугоплавких металлов с материалом формы при высоких температурах. // Взаимодействие литейной формы и отливки. – М., изд. АН СССР, 1962. – 306 с.
15. Пугин В.С., Морозов В.И. Формовочные материалы при литье титана // Формовочные материалы при литье по выплавляемым моделям. – М.: МДНТП.– 1960.– С. 22–24.
16. Техника высоких температур / Под общ. ред. И. Э. Кэмпбелла. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1959. – 596 с.
17. Тресвятский С.Г., Черепанов А.М. Высокоогнеупорные материалы и изделия из окислов. – М.: Мет-издат, 1957. – 248 с.
18. Самсонов Г.В. Новые огнеупорные материалы для плавки и литья тугоплавких металлов. Огнеупоры. – 1956. – №3. – С. 23–31
19. Kirtchik H. *Precis Metal Molding*. – 1961. – 19. – №4. – С. 5–9.
20. Керамика из высокоогнеупорных окислов /В.С. Бакунов, В.Л. Балкевич, А.С. Власов, М.– 1977. – 304 с.
21. Самсонов Г.В. Прочность и пластичность тугоплавких соединений. / Изв. АН СССР. Неорганические материалы, 1973. – №10. – С.1680–1687.
22. ГОСТ 2138-51. Пески формовочные. Классификация. Технические условия. – М., 1955. – 10 с.
23. ГОСТ 3647-80. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля (с Изменениями N 1, 2). – М., 1997. – 17 с.
24. ГОСТ 23683-89 Парафины нефтяные твердые. Технические условия (с Изменением N 1). – М., 1997. – 14 с.
25. ГОСТ 21179-2000 Воск пчелиный. Технические условия. – М., 2000. – 18 с.

26. ГОСТ 2488-79 Церезин. Технические условия (с Изменениями N 1, 2). – М., 1979. – 6 с.
27. ГОСТ 6484-96 Кислота стеариновая техническая (стеарин). Технические условия. – М., 1997. – 16 с.
28. Смесь для изготовления литейных керамических стержней: пат. 1496898 СССР. – №4382231; заяв. 23.12.87; опубл. 30.07.89, Бюл. №28. – 6 с.
29. Смесь для изготовления литейных керамических стержней: пат. 865479 СССР. – №2862131; заяв. 23.11.79; опубл. 23.09.81, Бюл. №35. – 6 с.
30. Керамическая смесь для изготовления литейных стержней: пат. 1435374 22. СССР. – №4119987; заяв. 20.06.87; опубл. 07.11.88, Бюл. №41. – 3 с.
31. Керамическая смесь для изготовления стержней: пат. 549237 СССР. – №2151308; заяв. 28.04.75; опубл. 05.03.77, Бюл. №9. – 3 с.
32. Смесь для изготовления огнеупорных литейных стержней: пат. 933174 СССР. – №2979283; заяв. 27.08.80; опубл. 07.06.82, Бюл. №21. – 4 с.
33. Керамическая масса для изготовления керамических стержней в производстве точного литья: пат. 474386 СССР. – №1926017; заяв. 31.05.73; опубл. 25.06.75, Бюл. №23. – 2 с.
34. Суміш для виготовлення ливарних керамічних стрижнів: пат. 79420 Украина. – №201210899; заяв. 18.09.12; опубл. 25.04.13, Бюл. №8. – 3 с.
35. Смесь для изготовления литейных керамических стержней: пат. 2132760 Рос. Федерация. – №98106529; заяв. 07.04.98; опубл. 10.07.99. – 7 с.
36. Способ изготовления керамических стержней: пат. 1323205 СССР. – №3977137; заяв. 18.11.85; опубл. 15.07.87, Бюл. №26. – 3 с.
37. Состав смеси для изготовления литейных керамических стержней: пат. 1736670 СССР. – №4792999; заяв. 08.12.89; опубл. 30.05.92, Бюл. №20. – 2 с.
38. Смесь для изготовления керамических стержней: пат. 1663840 СССР. – №4431645; заяв. 04.04.88; опубл. 20.09.05, Бюл. №26. – 1 с.
39. Сноп В.И. Изостат для обработки материалов и способ удаления керамического материала из металлических изделий с его использованием. Патент Российской федерации, RU2245220 С1.Кл.В22F3/14,В30В12/00

40. ROLLS-ROYCE.PLC. A method of leaching ceramic, eg alumina, cores from turbine blade casting. GB2266677 (GB9305293.4) 15 Mar 1993. UKC Headings: B3F UISJnt. C15B22D29/00

41. Способ удаления корундовых керамических стержней из внутренних полостей отливок. Иванов В.Н., Казеннов С.А., Курчман Б.С. и др. А.с. РФ МКИ В22Д29/00, 11.11.2000

42. Смесь для изготовления литейных керамических стержней: пат. 2273543 Рос. Федерация. – №2004126276; заяв. 01.09.04; опубл.10.04.06, Бюл. №10. – 6 с.

43. Смесь для изготовления литейных керамических стержней: пат. 1468639 СССР. – №4132580; заяв. 30.07.86; опубл. 30.03.89, Бюл. №12. – 4 с.

44. Суміш для виготовлення ливарних керамічних стрижнів: пат. 37037 Украина. – №2000031428; заяв. 13.03.00; опубл. 16.04.01, Бюл. №3. – 2 с.

45. Суміш для виготовлення ливарних керамічних стрижнів: пат. 79421 Украина. – №201210908; заяв. 18.09.12; опубл. 25.04.13, Бюл. №8. – 3 с.

46. Керамическая масса для изготовления литейных стержней: пат. 508324 СССР. – №1883562; заяв. 12.02.73; опубл. 30.03.76, Бюл. №12. – 1 с.

47. Смесь и способ изготовления литейных керамических стержней: пат. 2098220 Рос. Федерация. – №96109811; заяв. 21.05.96; опубл. 10.12.97. – 11 с.

48. Huseby I.C., Borom M.P, Gresjkovid C.D. High temperature characterization of silica-based core for superalloys, Am. Ceram. Soc. Bull., 58:448-52, 1979.

49. Lequeux N., Larose H., Boch P. Low Shrinkage Refractories by an Infiltration Technique, J. Eur. Ceram. Soc. – 1994. – Vol. 14, №1. – P. 23–27.

50. Chao C.H., Lu H.Y. Optimal Composition of Zircon-Fused Silica Cores For Casting Superalloys, J. Am. Ceram. Soc. – 2002. – Vol.85, №4 – P. 773-779.

51. Pat. 4093017 United States. Cores for investment casting process / Miller Jr J., Loxley T., Eppink D. – Appl. № 05/644,939; December 29, 1975; Pub. June 6, 1978. 15 p.

52. Pat. 4989664 United States. Core molding composition/ Roth H.. – Appl. № 401,532; Aug. 30, 1989; Pub. Feb. 5, 1991. – 8 p.

53. Попильский Р.Я. Пресование порошков керамических масс / Р.Я. Попильский, Ю.Е. Пивинский. – М.: Металлургия, 1983. – 176 с.
54. Статюха Г.А. Оптимизация гранулометрического состава наполнителей для сухих строительных смесей / Г.А. Статюха, Н.Е. Телицына, И.В. Суруп // Хімічні технологієкологія. Вісник ЧДТУ. – 2008. – № 4. – С. 57–61.
55. Локтев И. И. О моделировании некоторых технологических свойств дисперсных материалов / И. И. Локтев, К. Ю. Вергазов, В. А. Власов, И. А. Тихомиров // Известия ТПУ. – 2005. – Т.308. – №6. – С. 85–89.
56. Королев Л.В. Плотная упаковка полидисперсных частиц в композитных строительных материалах / Л.В. Королев, А.П. Лупанов, Ю.М. Придатко // Современные проблемы науки и образования. – 2007. – № 6 – С. 109–114.
57. Королев Л.В. Анализ упаковки полидисперсных частиц в композитных строительных материалах / Л.В. Королев, А.П. Лупанов, Ю.М. Придатко // Современные проблемы науки и образования. – 2007. – № 6 – С. 105–108.
58. Борисенко Н.И. Модель формирования структуры твёрдого сплава с добавлением наночастиц основы / Н.И. Борисенко, О.Н. Борисенко, П.А. Лисин и др. // Сб. трудов конференции "Нанотехнологии - производству 2006" Фрязино, М.; Янус-К, 2006, –С. 326–332.
59. Борисенко Н.И. Моделирование плотных упаковок с участием наночастиц / Н.И. Борисенко, П.А. Лисин // Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». – 2009. – С. 14–17.
60. Пивинский Ю.Е. Теоретические аспекты технологии керамики и огнеупоров. Избранные труды. Том 1 / Ю.Е. Пивинский. – Спб.: 2003. – 544 с.
61. Дыбань Ю.П. Влияние фракционного состава формовочных смесей на свойства самосвязанного карбида кремния / Ю.П. Дыбань, З.В. Сичкарь, Л.А. Шипилова // Порошковая металлургия. –1982. – № 6.– С. 16–23.

62. Дыбань Ю.П. Структурно-технологические аспекты прочности самосвязанного карбида кремния (СКК) / Ю.П. Дыбань. ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины. – Киев, 1998. – 64 с.
63. Майстренко А.Л. Закономерности уплотнения порошков карбида кремния / А.Л. Майстренко, В.Г. Кулич, И.П. Криворучко // Сверхтвердые материалы. – 2009. – №1. – С. 217–222.
64. Слоэн Н. Дж. А. Упаковка шаров/ Н.Дж. Слоэн// В мире науки: Scientific American. Издание на русском языке, 1984. – № 3. – С. 72–82.
65. Мамыркулов М.И. Математическое моделирование структуры пористых материалов / М.И. Мамыркулов [и др.]// Популярное бетоноведение. –2008. – № 4. – С. 77–78.
66. Белов В.В. Оптимизация гранулометрического состава композиций для изготовления безобжиговых строительных конгломератов / В.В. Белов, М.А. Смирнов // Вестник Центрального регионального отделения РААСН. Воронеж: РААСН, ВГАСУ. – 2010. – Вып. 9. – С. 65–72.
67. Удодов С.А. Применение пористого заполнителя в отделочных составах для ячеистого строительного композита. Часть 1 / С.А. Удодов, В.Ф. Черных // Сухие строительные смеси. – 2008. – № 2. – С. 68–70.
68. Зеленкова Е.Г. Формирование структуры и свойств спеченных материалов на основе бимодальных порошковых смесей.: дис. канд.техн.наук: 05.16.06 / Зеленкова Елена Геннадьевна –Красноярск, 2003. – 146 с.
69. Стрелов К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / Стрелов К.К., Кащеев И.Д. М.: Металлургия, 1996. – 608 с.
70. Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник для вузов. – 2-е изд., переработанное и дополненное – М.: Химия, 1988. – 464 с.
71. Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия: Учебник для вузов. – 4-е издание, исправленное – М.: Высшая школа, издательский центр «Академия», 2001. – 743 с.

72. ГОСТ Р 50523-93 Изделия огнеупорные. Определение предела прочности при изгибе при повышенных температурах. М., 1993. – 8 с.

73. Феодосьев В.И. Ф42 Сопротивление материалов : учебник для вузов / В.И. Феодосьев. – 16-е изд., испр. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2016. – 543с.

74. ГОСТ 2409-2014 Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения. Введ. 2015-09-01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 7 с.

75. Karlak R.F., Burnett D.S. Quantitative phase analysis X-ray diffraction. - Anal. Chem. – 1966. – Vol.38, №12. – P.183–187.

76. Доерфель К. Статистика в аналитической химии / Перевод с нем. И. С. Шаплыгина; Под ред. В. В. Налимова. – М.: Мир, 1969. – 247 с.

77. Деменок А.О. Расчет оптимального гранулометрического состава стержневой смеси / Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. В 5 т. Том 2 // УГАТУ, Уфа: УГАТУ, 2019. – С. 170-171.

78. Деменок А.О. Выбор и оптимизация химического и фракционного состава стержней для пустотелых лопаток / Ганеев А.А., Деменок А.О., Павлинич С.П. и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2017. – Т.17, № 3. – С. 54-63.

79. 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. – 11 с.

80. 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. – 11 с.

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

82. Стержневой материал для равноосного литья охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) из жаропрочных сплавов / Деменок А.О. и др. 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.

83. 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

84. 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

85. Исследование седиментационных свойств стержневых смесей для литья охлаждаемых лопаток ГТД / Деменок А.О. и др. 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.

86. Бельмер П.Ф Химико-гидравлический метод удаления гидравлических стержней из отливок / П.Ф. Бельмер, И.М. Демонис, А.А. Носков и др. // Авиационная промышленность –1980 – №2 – С.53–55.

Приложение А

Таблица А.1 – Составы керамических смесей для изготовления литейных стержней

№	№ патента	Состав смеси, % по массе				Режимы изготовления		Режимы удаления	Физико-механические свойства
		Керамическая основа		Пластификатор		Прессование	Обжиг		
		Состав	Кол.	Состав	Кол.				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	SU 1496898 А1	Электрокорунд (разнофракционный)	основа	Технический лигносульфонат	4÷9		Без засыпки при температуре 1100 °С; t = 8 ч.	Нет сведений	σ _{раст} = 4 МПа при T=1100 °С; σ _{сж} = 3,9 МПа при T=1100 °С; Расширение образцов при T=1100 °С - 0,64÷0,76 %.
		Карбид кремния	2÷3,5	Графит	1÷4				
		Аморфный кремнезем	1÷7						
2	865479	Электрокорунд (состав: размер зерен - 50÷40 мкм, 63÷50 мкм, 160-125 мкм; соотношение порошков – 1:0,42:0,4 соответственно)	основа	Пластификатор ПП-10	9÷17	Температура прессования – 140÷160 °С; Давление прессования – 3÷5 кг/см ²	Обжиг в засыпке глинозема или оксида магния при температуре 1250 °С	В 70 % растворе плавиковой кислоты (HF) В автоклаве, заполненном раствором щелочи (KOH) 35÷40 %; T = 180÷210 °С; P = 5÷6 атм.; T = 6÷10 ч.	σ _{изг} = 14÷21 МПа; Усадка – 0,1÷0,4 %.
		Диоксид кремния (плавленный) фракции 40÷50 мкм	3÷8						
		Электродный графит	3÷8						
3	SU 1435374 А1	Огнеупорный наполнитель (электрокорунд или циркон)	основа	Пластификатор ПП-10	21÷25	Температура запрессовки - 60÷80 °С; Давление 4÷6 атм.	В засыпке глинозема; Подъем температуры до 400 °С со скоростью 50 °С в 1 час. Далее со скоростью нагрева печи при работе на полной мощности. Температура обжига 1200÷1350 °С. Обжиг не при максимальной температуре не менее 3 ч.	Удаление осуществляется обдувкой смесью сжатого воздуха с абразивом в пескоструйной камере.	σ _{изг} = 5,7÷6,3
		Полые микросферы из оксида алюминия	5÷42						
		Связующее (Эмаль-T9-H)	5÷10						
4	SU 549237	Огнеупорный наполнитель (электрокорунд)	основа	Кремнийорганическая смола	15÷20	Формование изделий при комнатной температуре и давлении 3÷5 МПа в течении 5÷8 мин.	Обжиг при температуре 1350 °С.	Нет сведений	σ _{изг} = 15÷40 МПа
		Растворитель органический	5÷6,5						
5	SU 933174	Огнеупорный наполнитель (плавленный кварц и электрокорунд в соотношении 1:4)	основа	Пластификатор ПП-15	17÷21		В засыпке с постепенным набором температуры и выдержкой при 1250 °С в течении 3-х ч.	В 30÷35 %-ом растворе щелочей при температуре 130÷135 °С. В среднем время удаления составляет 12÷48 ч.	σ _{сж} = 28÷32 МПа; σ _{изг} = 27÷31 МПа при T=20 °С; σ _{изг} = 11÷19,5 МПа при T=1150 °С
		Нитрид кремния (Дисперсность порошков огнеупорного наполнителя и нитрида кремния – 10÷30 мкм)	0,1÷10						

Продолжение таблицы А.1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	SU 474386	Электрокорунд	основа	Пластификатор	13÷18		Обжиг при температуре 1000÷1100 °С	В расплавах и растворах щелочей	Нет сведений
		Маршалит	20÷30						
		Полиорганосилоксановая смола	2÷6						
		Спиртовой раствор хлористого кальция	0,5÷2						
7	UA 79420 U	Огнеупорный наполнитель (корунд или оксид магния)	основа	Пластификатор ПП-10	13÷18		Проводят в засыпке. Подъем температуры до 600 °С со скоростью 50 °С/час, потом со скоростью 100÷150 °С до температуры 1180÷1200 °С и выдержка при температуре 2 ч.	Нет сведений	$\sigma_{изг} = 37\div39$ МПа при T=1050 °С
		Кремний	0,5÷3						
		АСД-4	0,5÷3						
8	RU 2132760	Электрокорунд зернистостью 5 - 120 мкм (шлифпорошок NN 10, 12 – 20÷40 %; микропорошок М40, М50, М63 – 25÷50 %; микропорошок М5, М7, М10 – 5÷20 %.)	основа	Пластификатор на основе парафина (ПП-10 или ПП-5)	13 ÷15	Запрессовка при температуре 90±10 °С	Обжиг при температуре 1410±20 °С, в течении 12 ч.	В кипящем 40÷45 %-ном растворе КОН в течении 8÷9 ч.	$\sigma_{изг} = 17\div21$ МПа; КТР = (1,9÷4,1) · 10 ⁻⁶ °С ⁻¹ , в интервале температур 20÷1000 °С.
		Порошок электродинаса (до 50 мкм – 10÷30 %, 50÷60 мкм – 40÷60 %, 63÷100 мкм – 10÷40 %.)	43,5÷55						
		Пылевидный возгон циркониевого электрокорунда (ПВЦЭ)	0,01÷0,03						
9	UA46881 C2	Электрокорунд: N10 – 17÷21 %; M63 – 28÷31 %; M14 – 17÷21 %; M7 – 4÷7 %.	Основа	Пластификатор ПП-10	10÷14		В засыпке глинозема при температуре 1250 °С в течении 10 ч.	Выщелачивание в 40 %-ом растворе NaOH	Пористость – 32÷34 %; Плотность – 2,28÷2,37 г/см ³ ; Увеличение линейного размера при заливке – 0,18÷0,4 %.
		Кварц молотый пылевидный	5÷8						
		Порошок алюминиевый АСД-4	2÷4						
		Оксид хрома Cr ₂ O ₃	2÷3						
10	SU 1323205	В керамическую смесь, состоящую из шлифпорошков и микропорошков электрокорунда и алюминиевого порошка, до его смешивания с пластификатором дополнительно вводят оксид и хлорид Mg в соотношении 4:6				Запрессовка при температуре 95÷100 °С; Давление прессования – 0,25÷0,27 МПа.	В засыпке глинозема при температуре 700 °С в течении 1 ч. со скоростью подъема температуры в печи 50 °С/час.		$\sigma_{сж} = 4,86$ МПа
11	SU 1736670 A1	Огнеупорный наполнитель на основе оксида алюминия	основа	Парафин – 85÷97,5%; Полиэтилен – 2,5÷15	13÷18	Нет сведений	Постепенный набор температуры до 1400÷1500 °С и выдержка при этой температуре 3 ч.	В ванне с расплавом гидроксида натрия, T = 400÷450 °С; t = 3,5÷4 час.	$\sigma_{изг} = 32,1\div40,3$ при 20 °С; $\sigma_{изг} = 18,8\div27,5$ при 1150 °С.
		Бор	0,5÷5						
		Кремний	0,5÷5						

Продолжение таблицы А.1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
12	SU 1663840 A1	Огнеупорные порошки на основе оксида алюминия	основа	Пластификатор ПП-10	12÷15	Нет сведений	Нет сведений	Нет сведений	Нет сведений
		Дисперсный порошок алюминия	3÷10						
		Диоксид титана в анатазной форме	1÷3						
		Графит	1÷4						
		Каолин или Тальк	5÷10 1÷3						
13	SU 536004	Алюминат натрия	Основа	Стеарин	2,5÷4	Запрессовка при температуре 70÷75 °С	В засыпке окиси магния при температурах 1100÷1200 °С	В две стадии в воде. На первом этапе удаления отливку помещают в холодную воду на 30÷60 мин. В течении этого периода стержни размягчаются. На второй стадии удаления они вымываются проточной водой из полости отливки за 5÷10 мин.	$\sigma_{сж} = 4÷7$ МПа; Класс чистоты поверхности – 4÷5 (ГОСТ 2789-73); Относительное удлинение – 0,9÷1,1 %; Огневая усадка – 2,5÷3,1 %.
		Оксид алюминия	10÷30	Парафин	17,5÷24				
		Оксид титана	2÷5						
14	RU 2273543	Твердый раствор на основе плавного SiO ₂ , с содержанием: Cr ₂ O ₃ – 10,0 %; Al ₂ O ₃ – 5,0 %	91	Парафин-полиэтилен	10÷15 % сверх 100 %	Нет сведений	Обжиг на воздухе в туннельной газовой печи при 1350±20°С в течение 7-10 часов в засыпке из глинозема.	30%-ный водный раствор КОН Т=100÷110°С, t=1÷5 час.	$\sigma_{изг} = 15,0÷19,0$ МПа; Класс чистоты поверхности стержней 5÷6; КТР = (0,2÷0,5)·10 ⁻⁶ °С ⁻¹ ; Линейная усадка – 0,2÷0,5 %; Глубина взаимодействия со сплавом – 0,03÷0,05 мм.
		Si _{1,8} Al _{0,2} O _{1,2} N _{1,8}	7,5						
		La ₂ O ₃	1,5						
15	SU 1468639 A1	Кварц молотый пылевидный, прокаленный при 1300 – 1350 °С в течении 16-24 ч до содержания в нем 40-50 % кристобаллита	основа	Пластификатор ПП-10: Парафин – 90%; Полиэтилен – 10%.	19÷22	Температура прессования - 65÷100 °С.	При температуре 1300±20 °С в засыпке глинозема	В кипящем 40 % -ом растворе КОН; t = 30÷60 мин.	$\sigma_{изг} = 3,7÷7,5$ МПа.
		Карбонат кальция	0,1÷0,2						
		Электрокорунд зернистостью 50 – 200 мкм	10÷35						
16	UA 37037 А	Плавленый кварц	основа	Пластификатор ПП-10	13÷20		Проводят в засыпке. Подъем температуры до 600 °С со скоростью 50 °С/час, потом со скоростью 100÷150 °С до температуры 1180÷1200 °С и выдержка при температуре 2 ч.	Нет сведений	$\sigma_{сж} = 15÷47$ МПа; $\sigma_{изг} = 9÷21,7$ МПа при Т=1050 °С;
		Порошок АСД-4	0,1÷6						

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
17	UA 79421 U	Плавеный кварц	основа	Пластификатор ПП-10	14÷19		Проводят в засыпке. Подъем температуры до 600 °С со скоростью 50 °С/час, потом со скоростью 100÷150 °С до температуры 1180÷1200 °С и выдержка при температуре 2 ч.	Нет сведений	$\sigma_{изг} = 21\div25$ МПа при T=1050 °С;
		Порошок кремния	0,1÷5						
		Порошок бора	0,1÷0,6						
18	SU 508324	Пылевидный кварц	65÷70	Пластификатор ПП-15	остальное		Обжиг в засыпке при температуре 950 °С; продолжительность процесса 40÷50 час	Нет сведений	Нет сведений
		Электрокорунд	8÷12						
		Сода	1÷1,5						
		Оксид гадолия (Gd_2O_3)	0,2÷5						
19	RU 2098220	Пылевидный кварц	основа	Пластификатор на основе парафина ПП-10	13÷17	Запрессовка при температуре 70÷100 °С	В засыпке глинозема при температуре 1450÷1500 °С в течение 10÷12 ч.	В кипящем 40÷45 %-ном раствор КОН.	$\sigma_{изг} = 7,5\div12,5$ МПа; Отклонения от номинальных размеров – 0,1÷0,2 %;
		Электрокорунд зернистостью 40÷120 мкм	17÷40						
		Пылевидный возгон шамотного производства	0,4÷16						
		Алюминиевый порошок АСД-4	0,5÷1,5						
		Олеиновая кислота (ПАВ)	0,4÷1,5						
20	SU 554057	Карбид кремния, (зерновой состав 28÷40 мкм – 55÷65 %; 7÷10 мкм – 35÷45 %)	Основа	Органический пластификатор ПП-15	17,7÷19,2	Прессование при температуре 150 °С и удельном давлении 700 МПа	В шамотных коробах с глиноземом по следующему режиму: 50 °С - 1 час; 100 °С - 1 час; 150 °С - 1 час; 200 °С - 1 час; 250 °С - 1 час; 300 °С - 1 час; 350 °С - 1 час; 400 °С - 1 час; 400 °С - 2 час; 500 °С - 1 час, далее идет прямой подъем температуры до 1200 °С и выдержка при этой температуре 2 ч.	Удаление керамики в щелочной ванне с применением ультразвука в течении - 2÷3 ч., без применения ультразвука 6÷8 ч.	$\sigma_b = 0,9\div1,12$ МПа; Температура деформации под нагрузкой 2 кг – 1720 °С; Огнеупорность 1770 °С; Изменение размеров после обжига – (+0,5; +0,9) %.
		Циркон	3,4÷3,8						
		Этилсиликат, (оксид кремния – 24÷28 %;)	24,9÷27,8						
21	SU 531620	Карбид кальция	Основа	Стеарин	2÷2,5	Запрессовка под давлением 0,2÷0,4 МПа	Обжиг в защитной среде (аргон, гелий) при температуре 1600÷1650 °С	Удаляются в холодной воде за 8 ч.	$\sigma_{сж} = 6,5\div7$ МПа; Класс точности поверхности отл. 4÷5; (зависимость относительного удлинения от температуры дана в патенте)

Приложение Б

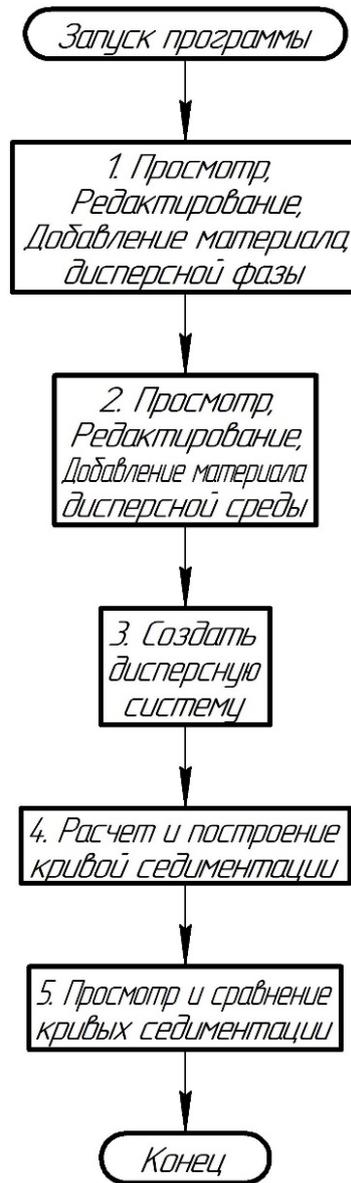


Рисунок Б.1 – Основная блок-схема работы программы

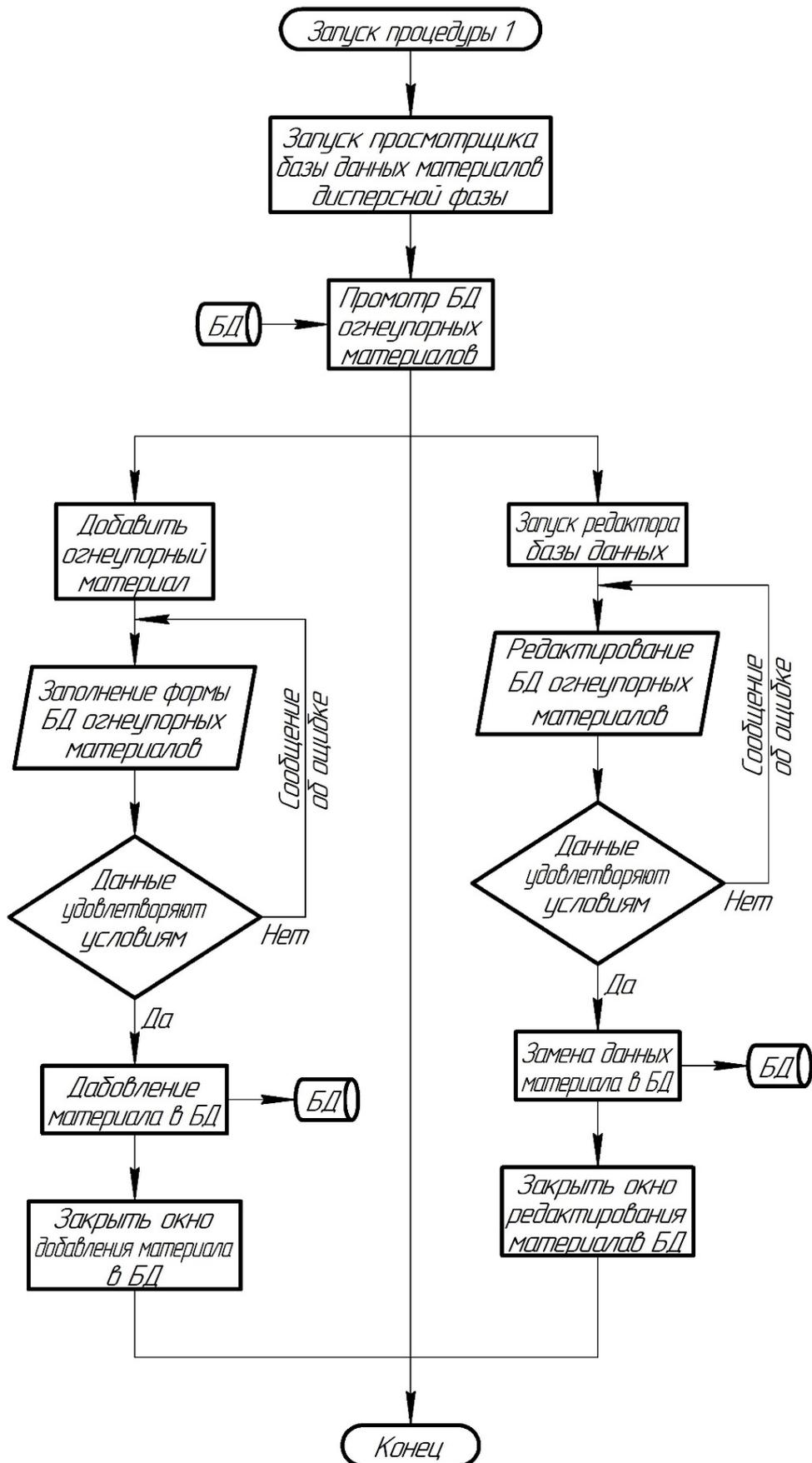


Рисунок Б.2 – Блок-схема работы первой процедуры

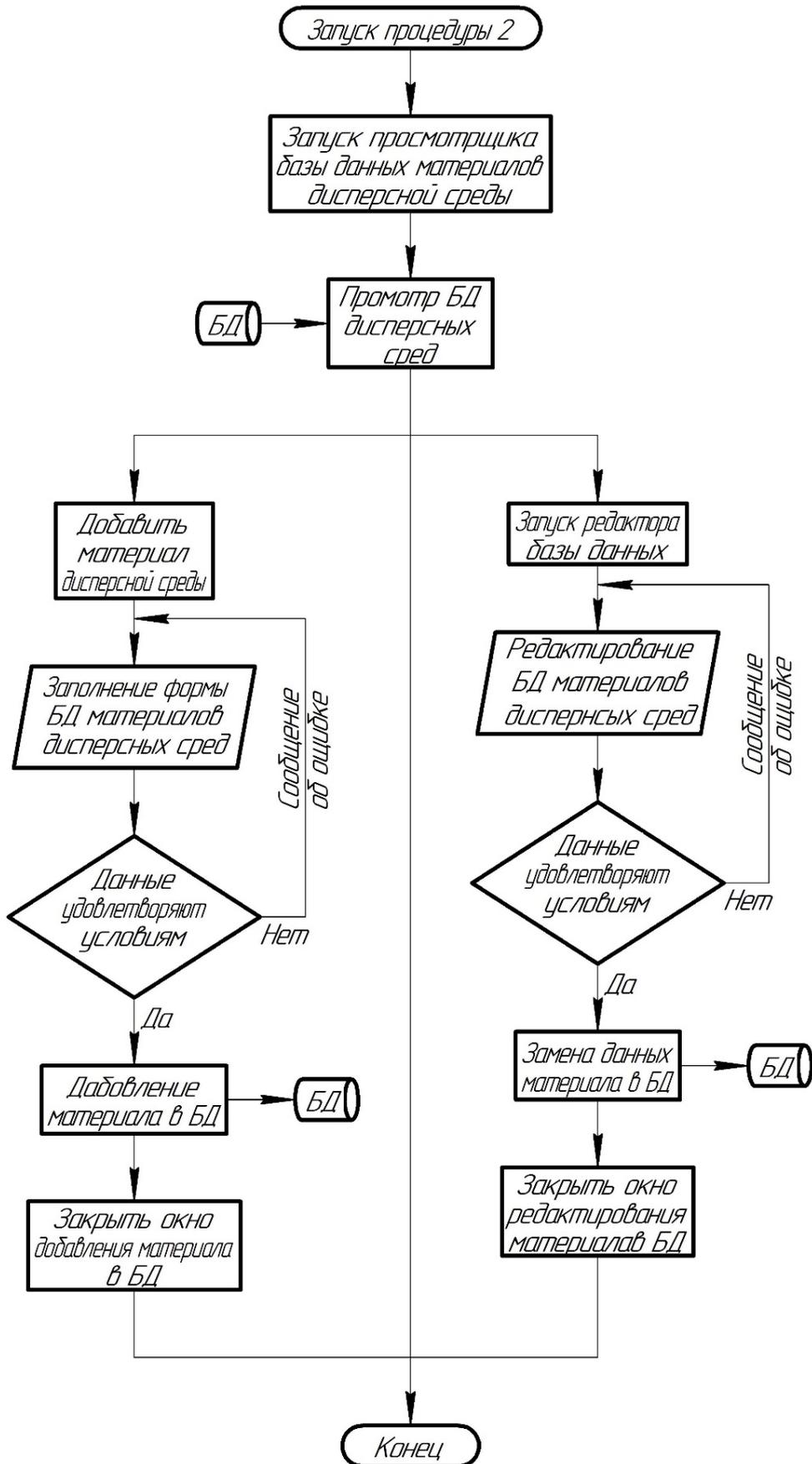


Рисунок Б.3 – Блок-схема работы второй процедуры

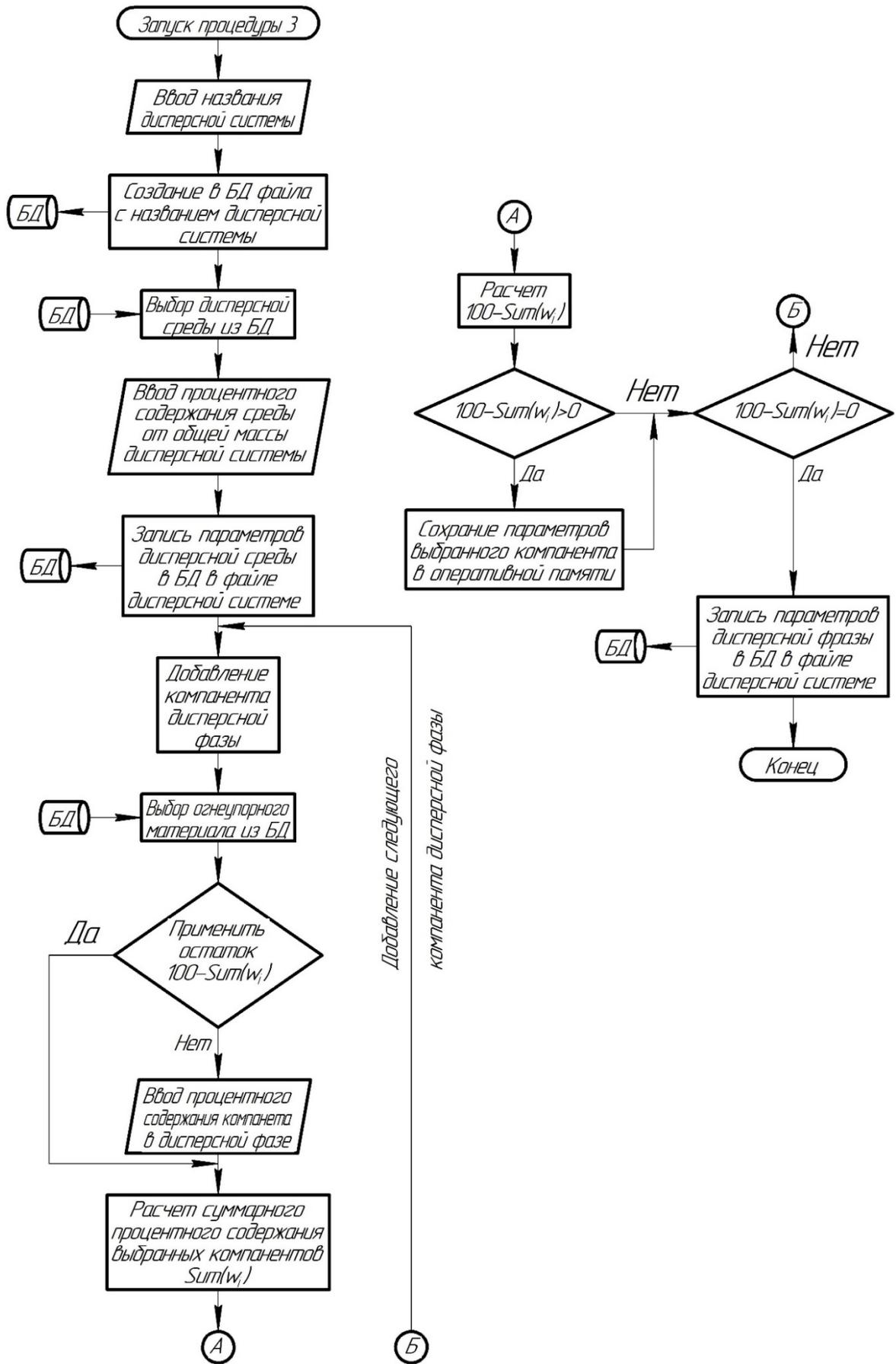


Рисунок Б.4 – Блок-схема работы третьей процедуры

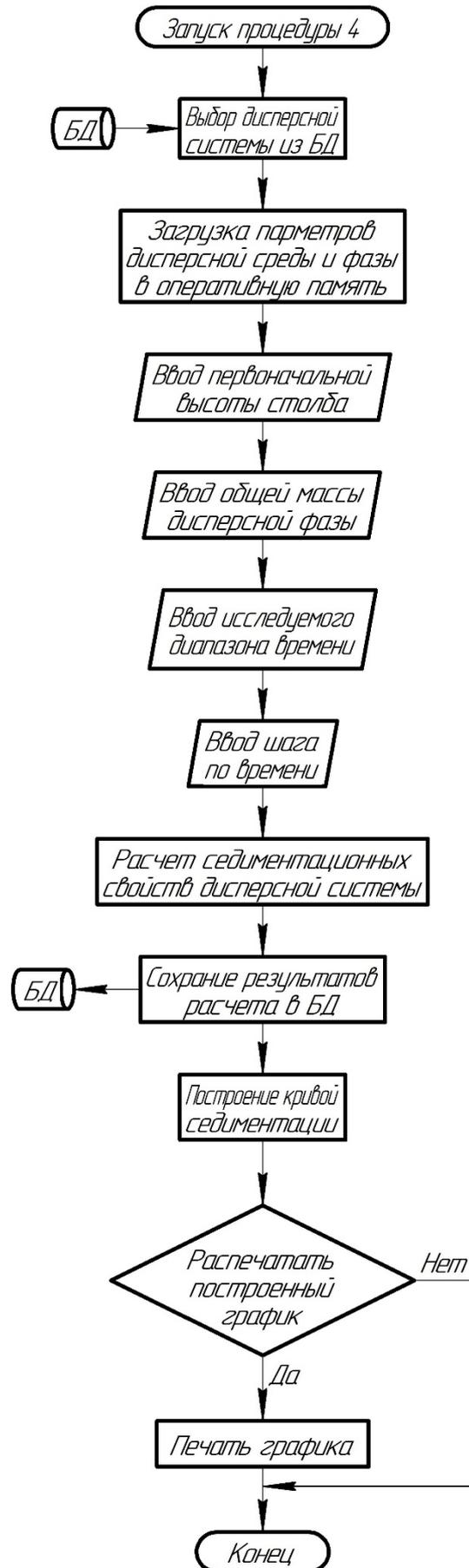


Рисунок Б.5 – Блок-схема работы четвертой процедуры

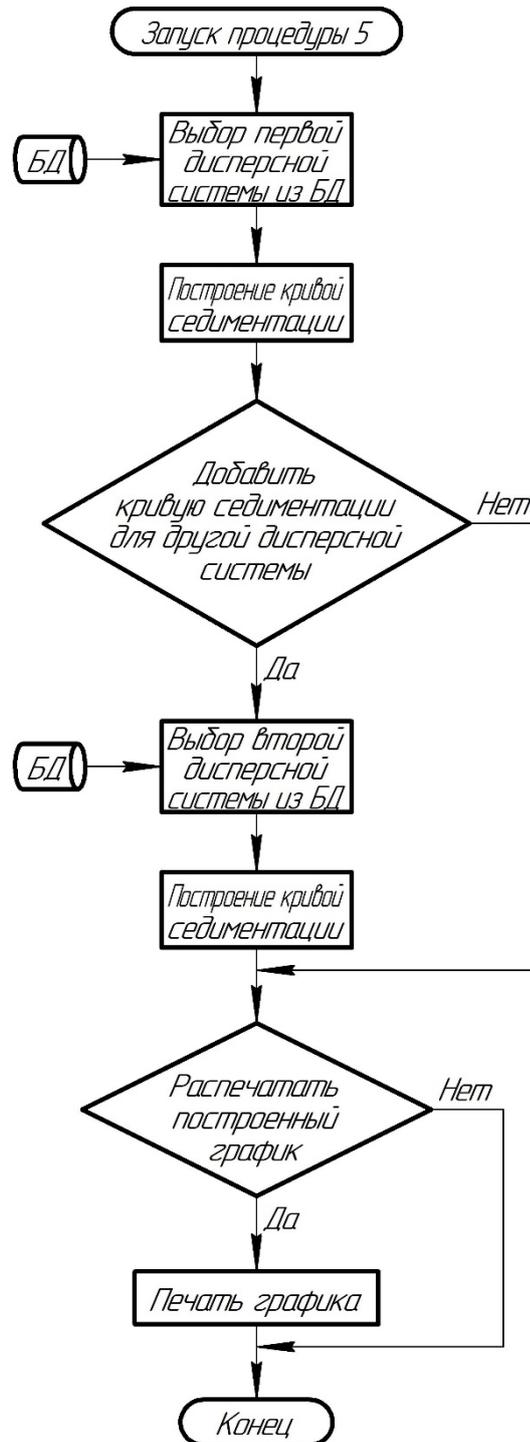


Рисунок Б.6 – Блок-схема работы пятой процедуры

Приложение В

Таблица В.1 – Результаты контроля лопаток блока №1

№ лопатки		Стержень из состава 7 (опытный)			№ лопатки		Стержень из состава 1 (серийный)		
		A1-A1	A2-A2	A3-A3			A1-A1	A2-A2	A3-A3
33	корыто	0,8	0,6	0,9	<u>35</u>	корыто	1	<u>0,55</u>	<u>0,65</u>
		0,85	0,75	1,25			1,05	0,8	1,05
		1,1	0,8	1,1			1,1	0,75	0,9
		0,54-0,89	0,61-0,96	0,69-1,04			0,54-0,89	0,61-0,96	0,69-1,04
	спинка	1,1	1,25	1,25		спинка	1,1	1,35	1,55
		1,1	1,35	1,25			0,8	1,2	1,35
		0,9	1,05	1,1			0,85	1,1	1,35
		0,5-0,85	0,61-0,96	0,69-1,04			0,5-0,85	0,61-0,96	0,69-1,04
34	корыто	0,85	0,65	0,9	36	корыто	0,9	0,65	0,9
		0,95	0,7	1,15			1,1	0,8	1,25
		1,1	0,8	1,1			1,15	0,85	1,1
		0,54-0,89	0,61-0,96	0,69-1,04			0,54-0,89	0,61-0,96	0,69-1,04
	спинка	1,1	1,35	1,3		спинка	1,05	1,45	1,35
		1,1	1,45	1,15			0,85	1,35	1,15
		0,95	1,1	1,1			0,7	1,1	1,1
		0,5-0,85	0,61-0,96	0,69-1,04			0,5-0,85	0,61-0,96	0,69-1,04

Таблица В.2 – Результаты контроля лопаток блока №2

№		Стержень из состава 7 (опытный)			№		Стержень из состава 1 (серийный)		
		A1-A1	A2-A2	A3-A3			A1-A1	A2-A2	A3-A3
39	корыто	0,8	0,6	0,65	37	корыто	1,05	0,6	0,7
		0,85	0,7	1,1			1,1	0,85	1,1
		0,9	0,85	1,1			1,1	0,85	1,05
		0,54-0,89	0,61-0,96	0,69-1,04			0,54-0,89	0,61-0,96	0,69-1,04
	спинка	1,1	1,25	1,3		спинка	1,1	1,5	1,5
		1	1,2	1,35			0,8	1,35	1,45
		0,8	0,95	1,1			0,85	1,1	1,25
	0,5-0,85	0,61-0,96	0,69-1,04		0,5-0,85	0,61-0,96	0,69-1,04		
40	корыто	0,85	<u>0,55</u>	0,7	38	корыто	1	<u>0,5</u>	<u>0,65</u>
		0,8	0,7	1			1,1	0,75	1,1
		0,8	0,65	0,85			1,15	0,65	1,1
		0,54-0,89	0,61-0,96	0,69-1,04			0,54-0,89	0,61-0,96	0,69-1,04
	спинка	1,1	1,45	1,45		спинка	1,1	1,25	1,4
		1,1	1,35	1,35			0,9	1,35	1,25
		1,1	1,15	1,35			0,85	1,35	1,35
	0,5-0,85	0,61-0,96	0,69-1,04		0,5-0,85	0,61-0,96	0,69-1,04		

Таблица В.3 – Результаты контроля лопаток блока №3

№		Стержень из состава 7 (опытный)			№		Стержень из состава 1 (серийный)		
		A1-A1	A2-A2	A3-A3			A1-A1	A2-A2	A3-A3
43	корыто	0,9	0,7	0,9	41	корыто	0,9	<u>0,55</u>	0,65
		1,1	0,9	1,35			1,1	0,75	1,1
		0,95	0,85	1,05			1,1	0,75	1,1
		0,54-0,89	0,61-0,96	0,69-1,04			0,54-0,89	0,61-0,96	0,69-1,04
	спинка	1,1	1,35	1,45		спинка	1,1	1,45	1,5
		1,1	1,35	1,35			0,8	1,25	1,35
		1,05	1,15	1,35			0,85	1,15	1,25
		0,5-0,85	0,61-0,96	0,69-1,04			0,5-0,85	0,61-0,96	0,69-1,04
44	корыто	0,8	<u>0,5</u>	<u>0,65</u>	42	корыто	0,9	0,65	0,8
		0,85	0,8	1,05			1,1	0,9	0,9
		0,85	0,85	1,1			1,15	0,85	0,85
		0,54-0,89	0,61-0,96	0,69-1,04			0,54-0,89	0,61-0,96	0,69-1,04
	спинка	1,1	1,45	1,5		спинка	1,1	1,45	1,35
		1,1	1,35	1,35			0,7	1,25	1,35
		0,85	1,1	1,1			0,85	1,05	1,35
		0,5-0,85	0,61-0,96	0,69-1,04			0,5-0,85	0,61-0,96	0,69-1,04

Приложение Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2662514

СМЕСЬ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ
КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ ПОЛЫХ ЛОПАТОК ИЗ
ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ЛИТЬЕМ ПО
ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный авиационный технический университет" (RU)*

Авторы: *Деменок Олег Борисович (RU), Ганеев Альмир Амирович (RU), Мамлеев Рафилъ Фаритович (RU), Павлович Сергей Петрович (RU), Аликин Павел Владимирович (RU), Деменок Анна Олеговна (RU)*

Заявка № 2017128281

Приоритет изобретения 07 августа 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 26 июля 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 07 августа 2037 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

Рисунок Г.1 – Патент Российской Федерации на разработанную стержневую смесь

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019662797

**РАСЧЕТ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ И ПОСТРОЕНИЕ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ СЕДИМЕНТАЦИИ В
ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Правообладатели: *Деменок Анна Олеговна (RU), Харисова Зарина
Ирековна (RU)*

Авторы: *Деменок Анна Олеговна (RU),
Харисова Зарина Ирековна (RU)*



Заявка № 2019661352

Дата поступления 16 сентября 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 октября 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Рисунок Г.2 – Свидетельство о государственной регистрации программы
для ЭВМ

ПАО ОДК-УМПО

УТВЕРЖДАЮ
 Заместитель управляющего директора -
 технический директор
 С.А. Симонов
 04 2021 г.



АКТ

**внедрения в ПАО «ОДК - УМПО»
 результатов диссертационной работы Деменок А.О.
 на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Настоящим актом подтверждается:

В ПАО «ОДК-УМПО» внедрены следующие результаты диссертационной работы А.О. Деменок на тему «Разработка и обоснование нового состава стержневой смеси для изготовления отливок охлаждаемых лопаток ГТД»:

1. Разработанная стержневая смесь, имеющая повышенные характеристики прочности и выхода годного при использовании автоматизированного пресс-автомата
2. Технологические режимы работы на пресс-автомате при запрессовке стержней для рабочих лопаток ГТД.

Первый заместитель главного металлурга
 ПАО «ОДК-УМПО», к.т.н.



С.В. Бакерин

Заместитель главного металлурга
 по литейному производству, к.т.н.



П.Н. Никифоров

Заместитель начальника литейного цеха
 по технической части



И.И. Самиев

Рисунок Г.3 – Акт внедрения в ПАО «ОДК-УМПО» разработанной стержневой смеси с использованием автоматизированного оборудования