

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)

*На правах рукописи*



СТЕПАНОВА ТАТЬЯНА ВИКТОРОВНА

**ЛИТЕЙНАЯ ФОРМА ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ  
ДЛЯ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА**

2.6.3. Литейное производство

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Знаменский Леонид Геннадьевич

Челябинск, 2025

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	4
<b>1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ</b>	
1.1 Особенности отливок нефтегазового комплекса.....	11
1.2 Способы изготовления заготовок нефтегазового комплекса.....	15
1.3 Анализ процессов формообразования для отливок нефтегазового комплекса.....	17
1.4 Анализ требований к опытной отливке «Колесо рабочее».....	28
1.5 Анализ существующих технологий изготовления керамических стержней и форм для изготовления отливки представителя.....	31
1.6 Цель и задачи исследования.....	40
<b>2 ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ</b>	
2.1 Приборы.....	42
2.2 Материалы.....	46
2.3 Программное обеспечение (ПО).....	60
2.4 Методики проведения исследований.....	61
<b>3 РАЗРАБОТКА СОСТАВА СУСПЕНЗИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ СВОЙСТВ</b>	
3.1 Влияния процесса гидролиза на качество этилсиликатного связующего.....	67
3.2 Определение рационального состава гидролизованного раствора этилсиликата.....	79
3.3 Влияния огнеупорного наполнителя на структуру и свойства керамических стержней.....	84
3.4 Количественный рентгенофазовый анализ муллитизированных материалов.....	91
3.5 Влияние муллитизированных материалов на свойства суспензии и керамических стержней.....	94

3.6	Определение рационального состава суспензии с муллитизированными материалами.....	102
3.7	Влияние пеногасителя на свойства суспензий и керамических стержней.....	112
3.7.1	Микроструктура керамических стержней, изготовленных по рациональному составу с пеногасителем.....	118
3.7.2	Рентгенофазовый анализ керамических стержней.....	121
3.7.3	Дериватография и дилатометрия керамических стержней.....	122
3.8	Выводы по главе 3.....	124
<b>4</b>	<b>ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК</b>	
4.1	Подготовка производства.....	126
4.2	Изготовление литейной формы из керамических стержней.....	132
4.3	Изготовление отливок.....	144
4.4	Оценка качества полученных отливок.....	146
4.5	Технико-экономические показатели .....	154
4.6	Выводы по главе 4.....	157
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>158</b>
	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>161</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	
	Приложение А – Патент РФ № 2748251.....	170
	Приложение Б – Патент РФ №2760029.....	171
	Приложение В – Акт опытно-промышленных испытаний.....	172
	Приложение Г – Акт внедрения результатов научно-исследовательских работ.....	173

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

Бурное развитие различных отраслей промышленности (машиностроение, металлургия, нефтегазовая и энергетическая) ведет к непрерывному росту потребности в укреплении основной заготовительной базы – литейного производства. Одновременный рост количества требующихся заготовок и усложнение их конструкции определяет необходимость поиска новых методов и материалов для их производства. Кроме того, современные реалии предполагают необходимость импортозамещения, поиск новых более доступных материалов для производства форм и стержней, разработку технологий, обеспечивающих получение отливок высокого качества с минимальными затратами на их производство.

На сегодняшний день одним из основных процессов формообразования, позволяющих получить довольно крупные отливки со сложной конфигурацией и высоким качеством литой поверхности, является литье в объемные наливные керамические формы. Однако известный способ производства наливных керамических форм (Шоу-процесс) является многофакторным процессом с большим количеством сложных и плохо изученных процессов.

Имеющиеся на данный момент технологии не обеспечивают достаточного уровня физико-механических свойств стержней и форм при изготовлении крупногабаритных тонкорельефных и сложнопрофильных отливок.

Высокие затраты на исходные формовочные материалы определяют значительную стоимость получаемых отливок. В связи с вышеизложенным актуальным представляется более детальное изучение процессов изготовления наливных керамических форм и стержней по постоянным моделям, а также разработка рациональных составов и процессов формообразования.

### **Степень разработанности**

Изучение процессов литья в керамические формы ведется на протяжении длительного периода существования литейного производства. Существенный вклад в изучение связующих материалов внесли С.И. Репях, Я.И. Шкленник, В.А. Озеров. Широкомасштабные исследования в области наполнительных огнеупорных материалов для изготовления керамики внесли Ю.Е. Пивинский, М.И. Роговой, И.Я. Гузман, Г.Д. Чукин. Работы этих ученых внесли существенный вклад в фундаментальные основы технологических процессов изготовления керамических форм для литья по выплавляемым моделям. Изучением процессов изготовления наливных керамических форм и стержней по постоянным моделям подробно занимались А.А. Стрюченко, Э.В. Захарченко, А.С. Лакеев и др.

### **Цель работы и задачи**

В связи с вышеизложенным целью работы является разработка состава и рациональных режимов изготовления крупногабаритных стержней (процесса гелеобразования и прокалки) для отливок нефтегазового комплекса, обеспечивающих высокую точность геометрии отливок и низкую шероховатость литых поверхностей.

Для реализации этой цели были поставлены следующие задачи:

- исследование влияния параметров гидролиза этилсиликата на кинетику гелеобразования;
- анализ структуры и свойств огнеупорных наполнителей;
- изучение зависимостей прочности и качества поверхности керамических стержней от фракционного и фазового составов наполнителя;
- исследование реологических и технологических свойств суспензий и керамических образцов;
- определение математических зависимостей, описывающих связь в системе «состав – свойства», и на основании зависимости выбор рациональных параметров изготовления керамических стержней и отливок;

– проведение опытно-промышленных испытаний разработанного состава керамических стержней при изготовлении стальных отливок нефтегазового комплекса, их анализ по геометрической точности и шероховатости;

– освоение в производстве разработанной технологии изготовления литейных форм из керамических стержней для стальных отливок нефтегазового комплекса, определение технико-экономических показателей эффективности точного литья.

### **Научная новизна и теоретическая значимость**

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена совокупность научных положений, обеспечивающих новые технологические решения в процессе точного формообразования из огеливаемых суспензий. В том числе:

– получены кинетические зависимости процесса гелеобразования от параметров подготовки этилсиликатного связующего (отношение молей воды и этоксильных групп, условное содержание  $\text{SiO}_2$  в гидролизованном растворе этилсиликата и др.) для определения рациональных параметров, обеспечивающих заданное время гелеобразования;

– методами рентгенофазового анализа, дериватографии, дилатометрии и растровой электронной микроскопии установлены закономерности формирования структуры керамических стержней с мелкой сеткой трещин для повышения их физико-механических свойств и определения рациональной температуры прокаливания керамических стержней;

– определены математические зависимости, характеризующие взаимосвязь в системе «структура – свойства – составы», применительно к процессу точного формообразования из огеливаемых суспензий для определения рационального состава керамической суспензии;

– методом лазерной дефектоскопии получены новые данные по влиянию различных наполнителей на точность геометрии отливок из стали ответственного назначения.

### **Практическая значимость**

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработан технологический процесс изготовления крупногабаритных керамических стержней для точных отливок нефтегазового комплекса.

В том числе проведен подбор и анализ формовочных материалов, разработан рациональный состав гидролизованного раствора этилсиликата (ГРЭС) и суспензии, определены параметры проковки керамических стержней. Эффективность разработанной технологии изготовления керамических стержней достигнута применением отечественных экономичных муллитизированных наполнителей и введением в суспензию технологической добавки пеногасителя нового поколения («Пента-462 А»).

Результаты исследования опробованы и внедрены на сталелитейном заводе ООО «БВК» (г. Челябинск), что подтверждается актом промышленных испытаний и актом внедрения.

### **Методы исследований**

Экспериментальные результаты получены с использованием физико-химических методов исследований, таких как количественный рентгенофазовый анализ, дилатометрия и дериватография, растровая электронная микроскопия, а также испытания образцов на прочность, склонность к образованию трещин и др.

Методы анализа экспериментальных данных базируются на математической статистике, а также теории планирования и обработки результатов эксперимента.

### **Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Результаты исследований влияния на процесс гелеобразования параметров подготовки этилсиликатного связующего.
2. Закономерности воздействия муллитизированных материалов на структуру и свойства керамических стержней. Результаты рентгенофазового анализа, дилатометрии, дериватографии и растровой электронной микроскопии наполнителей и стержней.
3. Математические зависимости, определяющие связь в системе «состав – свойства», определенный рациональный состав керамической суспензии.
4. Результаты исследований влияния технологической добавки пеногасителя на процесс получения и свойства керамической суспензии на гидролизованном этилсиликате.
5. Разработанная технология изготовления керамических стержней для получения крупных сложнопрофильных отливок для нефтегазового комплекса.
6. Результаты опытно-промышленных испытаний и внедрения на участке литья в керамические формы на предприятии ООО «БВК» (г. Челябинск).

### **Степень достоверности**

Высокая степень достоверности полученных результатов подтверждается применением современных методов проведения исследований, воспроизводимостью полученных результатов, согласованностью представленных теоретических данных с практическими результатами, достаточным объемом исследований российского и мирового опыта в области теории и технологии материалов на керамической основе и литейных процессов. Результаты и выводы научной работы не противоречат результатам, представленным в независимых источниках по рассматриваемой тематике.

### **Апробация работы**

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на Международном съезде литейщиков в 2021 и 2022 годах (г. Москва), на Всероссийской конференции RusMetalCon «Материаловедение и металлургические технологии» в 2020 и 2021 годах (г. Челябинск) и на Всероссийской конференции RusMetalCon «Материаловедение и металлургические технологии» в 2022 году (г. Сочи).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликованы 4 научные статьи, из них 2 в изданиях, рекомендованных в ВАК при Минобрнауки России и 2 в наукометрической базе данных Scopus. Получено 2 патента РФ на изобретения.

### **Личный вклад автора**

Сбор и анализ литературных источников по выбранной теме, формулировка цели и задач проведенного исследования, выполнение лабораторных исследований и промышленных испытаний, анализ и обработка результатов, выявление закономерностей, апробация результатов исследований, подготовка текста диссертации.

Автор выражает благодарность научному руководителю доктору технических наук, профессору Знаменскому Леониду Геннадьевичу, доктору технических наук, профессору Кулакову Борису Алексеевичу и коллективу кафедры «Пирометаллургические и литейные технологии» ЮУрГУ за помощь в работе над диссертацией, исполнительному директору ЗАО «КОНАР», кандидату технических наук Пыхову Даниле Сергеевичу и исполнительному директору ООО «БВК» Лопатину Андрею Викторовичу за поддержку исследований и предоставление материально-технической базы, коллективу ООО «БВК» за помощь в проведении опытно-промышленных испытаний,

Степанову Юрию Петровичу за всестороннюю помощь и поддержку во всех аспектах написания и оформления диссертационной работы.

**Объем и структура работы**

Диссертация представлена на 173 страницах машинописного текста и содержит 96 рисунков и 73 таблицы. Работа состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы, содержащего 85 наименований работ.

# 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Особенности отливок нефтегазового комплекса

На данный момент многие отрасли промышленности сталкиваются с необходимостью транспортировки жидкостей и газов, но самое широкое распространение механических агрегатов для этих целей наблюдается в нефтегазовой отрасли. Для обеспечения транспортировки и регулирования подачи нефти и газа необходимо большое количество сложных механизмов и агрегатов различных форм и конфигурации.

Наиболее широкое применение имеют запорная арматура и насосные агрегаты. На рисунке 1.1 показана фонтанная арматура, применяемая для добычи нефти и газа.

Фонтанная арматура представляет собой систему герметизации устья нефтяных и газовых скважин. Данная система необходима для предотвращения межколонных перетоков, также она используется для присоединения устройств, позволяющих исследовать саму скважину. Кроме того, фонтанная арматура позволяет проводить различные технологические, эксплуатационные и управленческие операции, необходимые для работы скважины.



Рисунок 1.1 – Фонтанная арматура

На рисунке 1.2 показаны шиберные задвижки, применяемые для регулирования или полного перекрытия потока жидкости в нефтепроводе.

На рисунке 1.3 показан нефтяной магистральный насос центробежного типа. На рисунке 1.4 показан подпорный насос, который необходим для

подачи нефти и нефтепродуктов к магистральным насосам и создания необходимого для их работы кавитационного запаса.



Рисунок 1.2 – Задвижки шиберные DN1200



Рисунок 1.3 – Насос магистральный NM10000



Рисунок 1.4 – Подпорный насос

Все перечисленные выше механизмы и агрегаты состоят в основном из сложных деталей, которые имеют комплексную и специфическую форму [1 – 3].

На рисунке 1.5 приведены наиболее сложные и распространённые детали, применяемые в агрегатах нефтегазового комплекса.

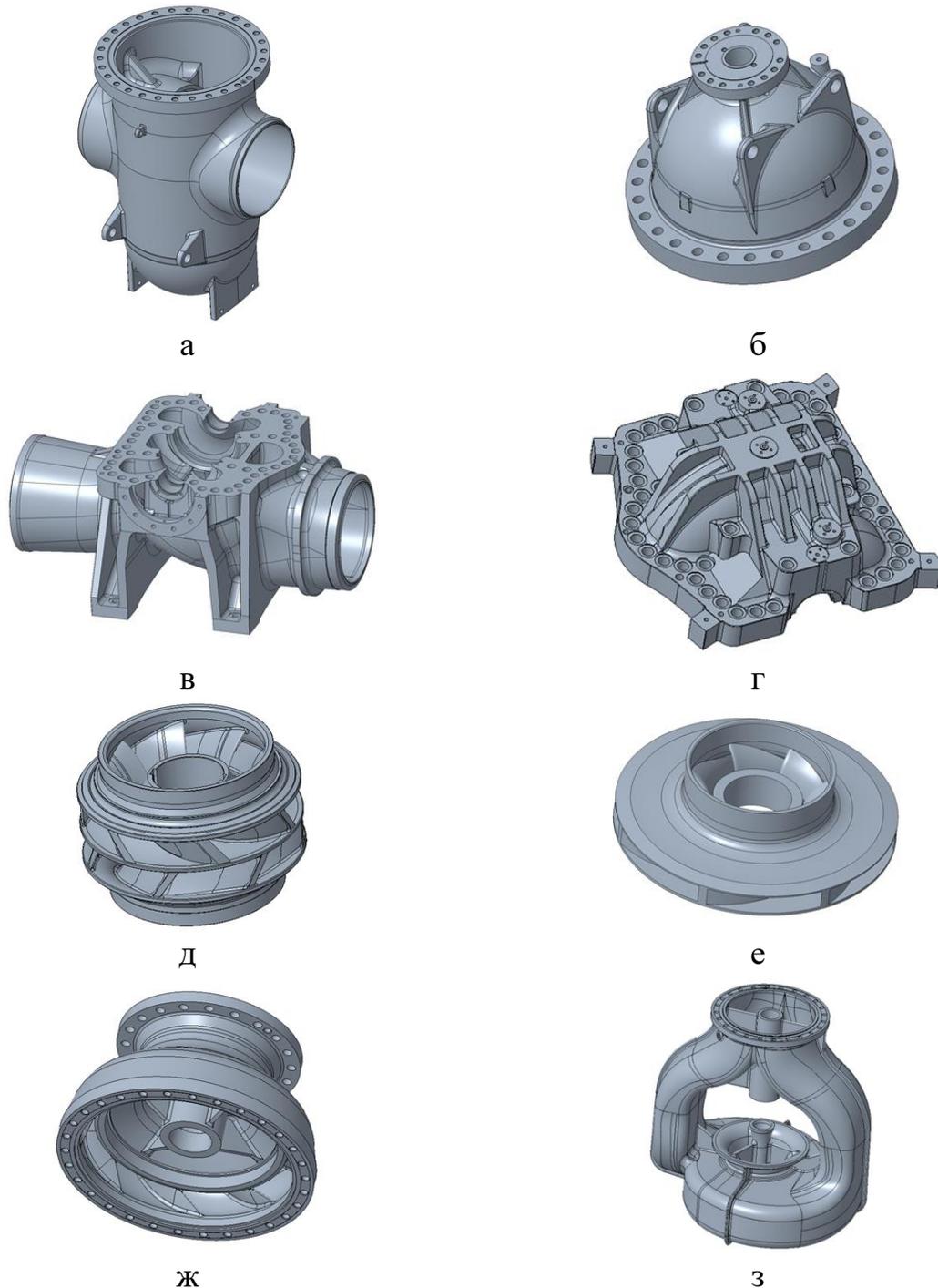


Рисунок 1.5 – Детали запорной арматуры и насосов:

а – корпус шиберной задвижки; б – крышка шиберной задвижки;  
 в – корпус насоса магистрального; г – крышка насоса магистрального;  
 д – колесо рабочее закрытое двухзаходное; е – колесо рабочее закрытое  
 однозаходное; ж – диффузор подпорного насоса; з – корпус спиральный  
 подпорного насоса

Все корпусные детали и рабочие органы перечисленных выше механизмов изготавливаются методами литья. Получение заготовок для этих изделий другими методами не представляется возможным ввиду сложности геометрии и условий работы.

Рассматриваемые механизмы и агрегаты работают под давлением жидкостей или газов, подвергаются существенному износу. При работе насоса жидкость подводится через входной патрубок к рабочему колесу, что приводит его во вращение. В результате воздействия лопаток и боковых стенок (покрывных дисков) колеса на жидкость она выходит из него с более высоким давлением и большей скоростью, чем при входе. Выходная скорость частично преобразуется в корпусе насоса в давление перед выходом жидкости из насоса [4 – 6].

В виду постоянно повышающихся требований к характеристикам насосов и запорной арматуры, таких как подаваемое давление, коэффициент полезного действия, напор и кавитационный запас, постоянно повышаются требования, предъявляемые к материалам и технологиям, применяемым для производства данных изделий.

Можно выделить два основных направления контроля изделий и компонентов, входящих в состав насосных агрегатов и запорной арматуры:

- обеспечение прочности и герметичности;
- обеспечение геометрической точности.

Высокие требования к качеству заготовок неизбежно ведут к увеличению объема контрольных мероприятий. На сегодняшний день при изготовлении деталей методом литья должна применяться система контроля качества (верификация, пооперационный и приемочный контроли), обеспечивающая выполнение работ в соответствии с требованиями на производство и включающая разрушающий и неразрушающий методы.

Верификации подвергается каждая отливка в соответствии с требованиями ГОСТ 24297-2013 и она должна включать в себя подтверждение сертификационных данных [7]. Сертификационные данные подтверждаются

проведением комплекса испытаний, включающих в себя разрушающие испытания на приливных образцах:

- а) контроль химического состава стали отливок;
- б) контроль механических свойств материала:
  - испытание на растяжение;
  - определение ударной вязкости;
  - определение твердости металла;
- в) металлографические исследования:
  - контроль неметаллических включений;
  - оценка балла зерна.

Контроль геометрии отливок осуществляется комплексом мероприятий:

- контроль универсальными мерительными инструментами;
- контроль по шаблонам;
- контроль при помощи КИМ (контрольно-измерительной машины);
- трехмерное лазерное сканирование.

Приемочный контроль изделий осуществляется на основании верификации и неразрушающего контроля.

К неразрушающим методам контроля относятся следующие методы:

- ВИК (визуальный и измерительный контроль);
- ПВК (контроль проникающими веществами, капиллярный);
- МК (магнитопорошковый контроль);
- УЗК (ультразвуковой контроль);
- РК (радиографический контроль).

## **1.2 Способы изготовления заготовок нефтегазового комплекса**

Основным достоинством литейного производства является возможность получения литых заготовок любой конфигурации, любой массы и практически из любого сплава.

Все отливки корпусных деталей и рабочих органов для механизмов нефтегазового комплекса изготавливаются в основном из легированных конструкционных сталей и легированных жаропрочных сталей. Все отливки относятся к пятой группе сложности по геометрии согласно классификации [8] или к шестой группе сложности по ГОСТ 13354-91. Конфигурация изделий имеет закрытую форму коробчатого типа; поверхности наружной геометрии получаются сопряжением нескольких криволинейных поверхностей или криволинейных и прямолинейных поверхностей со сложными переходами, характерно наличие тонких ребер, выступов и углублений различной формы; внутренние поверхности характеризуются особо сложной геометрической формой с криволинейными поверхностями, наличием ленточных и кольцевидных каналов, расположенных в несколько ярусов, а также наличием затрудненного выхода внутренних полостей наружу [9].

Существенное отличие можно выделить по массе и габаритным размерам. По этому признаку все отливки для нефтегазовой отрасли можно разделить на две группы – крупные массой от 1 до 20 т и средние весом от 50 до 300 кг. К крупным отливкам относятся все корпусные детали (корпуса и крышки задвижек, корпуса и крышки насосов), к средним относятся рабочие органы (рабочие колеса и диффузоры).

Подходы к производству и применяемым материалам крупных и средних отливок существенно различаются. Однако все эти изделия изготавливаются по традиционной технологии в разовые песчаные формы. Применение постоянных металлических форм невозможно ввиду сложности геометрии и больших габаритов, а применение технологий с разовыми моделями (литье по выплавляемым моделям, литье по газифицируемым моделям) затруднительно ввиду большой массы и габаритов.

Наиболее широкое распространение для производства крупных корпусных деталей на данный момент получили процессы формообразования на основе холоднотвердеющих смесей. При производстве средних отливок

(рабочих органов) этот метод не обеспечивает необходимые точность геометрии и качество поверхности.

### **1.3 Анализ процессов формообразования для отливок нефтегазового комплекса**

В современном мире научно-техническое развитие затрагивает абсолютно все стороны жизни человека, развитие техники и технологии идет огромными темпами, в том числе в литейном производстве. Современный этап научно-технического прогресса поднимает комплексную проблему разработки и освоения новых технологий в литейном производстве, поиск и применение новых материалов. Кроме того, современные реалии предполагают необходимость импортозамещения, налаживание новых цепочек поставок литейного оборудования и материалов, обновление процессов и оборудования [10, 11].

Развитие стратегических отраслей промышленности, таких как машиностроение, металлургия, нефтегазовая и энергетическая, требуют изучения, разработки и внедрения более совершенных методов производства литых заготовок. Существующие процессы зачастую не в состоянии удовлетворить возросшие требования к качеству литья. Быстрое усложнение машин и механизмов, применяемых в этих отраслях, привело к значительному отставанию научной и технологической базы, которые позволили бы удовлетворить эти требования [12 – 15].

Основные направления ужесточения выражены повышением требований к:

- геометрической сложности отливок. Узлы, ранее изготавливаемые из нескольких частей с последующей сборкой при помощи сварки, на данный момент необходимо получать единой деталью;

- геометрической точности отливок. Допустимые отклонения от номинальной геометрии существенно сужаются для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик будущих машин и механизмов;

– качеству литой поверхности. Для обеспечения проектных показателей уже недостаточно традиционной шероховатости литой поверхности на уровне Rz40...Rz80 (Ra10...Ra20), необходимо получение заготовок с литыми поверхностями шероховатостью Rz12,5...Rz50 (Ra3,2...Ra12,5). Доводка в ручную возможна, но является очень затратной и трудоемкой операцией;

– наличию внутренних дефектов в литых заготовках. Современные методы контроля (порошковая дефектоскопия, ультразвуковой и рентгеновский контроль, контроль проникающими веществами) позволяют выявить как подкорковые, так и глубоко залегающие дефекты в литой структуре.

В свете вышеизложенного крайне актуальным представляется разработка технологических процессов литья, позволяющих изготовить заготовки средней массы высокой геометрической сложности при одновременном обеспечении высокой точности геометрии, низкой шероховатости поверхности и с минимальным количеством внутренних дефектов литой структуры. Наиболее перспективным способом для обеспечения всех этих условий представляется литье в керамические формы.

На сегодняшний день применение литейных керамических форм развивается в двух основных направлениях: многослойные керамические формы для литья по выплавляемым моделям и объемные наливные керамические формы по постоянным моделям. В этих процессах могут использоваться аналогичные материалы, однако каждый из процессов имеет свои особенности, достоинства и недостатки [16].

Для изготовления объемных наливных керамических форм распространение получили самотвердеющие суспензии на гипсовых, цементных, жидкостекольных связующих с кремнеземистым наполнителем. Однако первые непригодны для литья из черных сплавов с высокой температурой заливки из-за разложения гипса при температурах выше 1200 °С, что приводит к поражению отливок газовыми раковинами, а последующие могут использоваться для производства отливок из любых сплавов, но

отличаются длительным циклом формообразования, низкой газопроницаемостью и трещиностойкостью форм в процессе их прокали и заливки расплавом [17].

При изготовлении керамических форм для крупногабаритных отливок из стали методом литья по выплавляемым моделям в основном используются два типа связующих: первый – на основе гидролизованного раствора этилсиликата, где растворителем обычно является этанол или комбинации этанола и изопропанола, а второй – это водный коллоидный раствор кремнезема (кремнезоль) [18].

В настоящее время наблюдается перевод некоторых технологических процессов на использование связующих на основе коллоидного кремнезема на водной основе. Они содержат частицы аморфного  $\text{SiO}_2$ , стабилизированные Na. Гелеобразование кремнезоля и связывание частиц наполнителя в керамической форме достигаются удалением влаги [19, 20].

Для изготовления объемных наливных керамических форм довольно широкое распространение получил Шоу-процесс. Он был разработан в 50-е годы XX столетия. Получение формы базируется на принципе огеливания этилсиликатного связующего.

К недостатку Шоу-процесса следует отнести сложность технологического процесса, требующего скрупулезного соблюдения операций, таких как время, температура, состав и др., а также большой расход формовочных материалов при высокой стоимости, кроме того, применяемые материалы являются опасными или вредными для человека и окружающей среды.

Современные водные связующие, по сравнению со связующими на растворе гидролизованного ЭТС, имеют несколько недостатков: склонность к седиментации, длительное затвердевание суспензии, низкую смачиваемость. По этой причине в состав суспензии, а иногда и непосредственно в связующее добавляются дополнительные компоненты, такие как полимерные добавки, поверхностно-активные вещества (ПАВ), пеногасители, добавки,

препятствующие гелеобразованию, индикаторы для контроля сушки керамических слоев [21].

Таким образом, известные способы изготовления объемных керамических форм характеризуются повышенными трудоемкостью и продолжительностью процессов формообразования, экологической нагрузкой на окружающую среду и в то же время имеют резервы для своего дальнейшего развития на базе использования современных материалов.

Имеющиеся на данный момент технологии не обеспечивают достаточного уровня физико-механических свойств стержней и форм при изготовлении крупногабаритных тонкорельефных и сложнопрофильных отливок, что ведет к низкой геометрической точности получаемых отливок. Известные формовочные массы при их затворении имеют ограниченную продолжительность затвердевания, не позволяющую проводить эффективные внешние воздействия (например, вакуумирование) на соответствующие процессы формообразования при увеличении размеров литых заготовок.

В связи с большим расходом и высокой стоимостью формовочных материалов появились более экономичные процессы, при которых возможно увеличить массу стержня и одновременно снизить расход дорогостоящих материалов керамики. К одному из них относится композит Шоу-процесс [22].

В этом процессе для экономии рабочей керамики введен опорный слой, выполненный из малододефицитных огнеупорных формовочных материалов. Например, применяют шамотную или диасовую крошку на жидком стекле. Для формовки используются две модели, одна из которых (черновая) значительно больше оригинала. Возможна также формовка основной модели, предварительно обмазанной глиной или пластилином. Возможен и другой технологический процесс. В нем основной опорный слой выполняется из шамота на жидком стекле по вспомогательной модели или по основной модели, на которую накладывается слой войлока или фетра. Облицовочный слой получается при заливке рабочей суспензии в зазор между основной моделью и опорным слоем формы.

Проведённый анализ применяемых в точном литье материалов и процессов показал, что существует необходимость создания такого состава и способа приготовления наливной самотвердеющей смеси, которые обеспечили бы ускоренный цикл формообразования, повышенные прочностные характеристики и трещиностойкость керамических стержней при прокатке, их легкую выбиваемость, высокое качество поверхности стержней и получаемых отливок.

Литейная керамика состоит из двух основных компонентов: связующее и огнеупорный наполнитель [16].

Связующие материалы предназначены для обеспечения сил связи между зёрнами наполнителя в формовочной или стержневой смеси. Чтобы смеси обладали необходимыми механическими и технологическими свойствами связующие должны обеспечивать:

- высокую удельную прочность смеси;
- сохранение прочности смеси в процессе ее нагрева после заливки формы на необходимом уровне до тех пор, пока не образуется достаточная с точки зрения обеспечения жесткости твердая корка металла;
- текучесть смеси, обеспечивающую при выбранном способе уплотнения необходимое качество форм при наименьших затратах энергии;
- неприлипаемость смеси к поверхности модели или стержневого ящика;
- получение качественной поверхности отливок без пригара, ужимин и других дефектов;
- максимальное разупрочнение смеси после затвердевания отливки для обеспечения податливости форм и стержней и легкой выбиваемости их из отливок.

Важно также, чтобы связующие имели низкую стоимость и были недефицитными [23 – 26].

Различаются органические и неорганические связующие. Смеси на органических связующих обладают высокой текучестью и удельной прочностью, хорошей выбиваемостью. Однако они имеют повышенную

газотворность и многие из них токсичны, что требует четкого соблюдения правил техники безопасности и охраны окружающей среды при работе с ними.

Неорганические связующие более термостойки, менее газотворны и более благоприятны в санитарно-гигиеническом отношении. Вследствие пластификации при высоких температурах многие неорганические связующие обеспечивают достаточную податливость стержней и форм, что предотвращает образование горячих трещин в отливках. В то же время применение некоторых неорганических связующих создает проблемы с выбиваемостью смесей из отливок и с затрудненной регенерацией возврата.

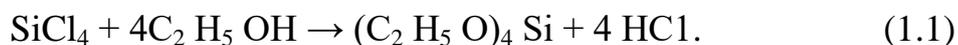
Органические и неорганические связующие принципиально различаются своим поведением при нагреве [27]. Органические связующие разлагаются в интервале температур 300 – 700 °С с выделением газовой фазы (СО, СО<sub>2</sub>, углеводороды, мономеры и пр.) и образованием твердого коксового остатка (исключением являются этилсиликаты, образующие при разложении диоксид кремния). Неорганические связующие могут претерпевать при нагреве (после испарения воды, в основном заканчивающегося при 300 °С) различные химические изменения, как правило, не сопровождающиеся газификацией и завершающиеся переходом в устойчивую форму оксида или соли. Для ряда неорганических связующих характерно образование при высокотемпературном нагреве плавней с выраженной пластификацией формовочных и стержневых смесей.

Наиболее целесообразным для изготовления рабочих органов агрегатов для нефтегазового комплекса является литье в керамические формы с применением гидролизованного раствора этилсиликата.

Этилсиликаты – основные материалы для приготовления связующих. Этилсиликаты относятся к классу кремнийорганических полимеров – полиорганосилоксанов. Это высокомолекулярные соединения с неорганическими главными цепями из чередующихся атомов кремния и кислорода в обрамлении органических групп. Такая структура определяет свойства, которые являются характерными как для неорганических, так и для

органических полимеров. Так, силоксанная связь атомов кремния и кислорода в полимере подобна связи в структуре кварца. Она является прочной и при нагревании на воздухе не разрушается. В то же время наличие органических групп в структуре полимера обеспечивает его пластичность и растворимость в органических растворителях [28].

Этилсиликаты являются продуктом реакции этилового спирта с четыреххлористым кремнием при непрерывном их смешивании и охлаждении в реакторе. При этом происходит реакция этерификации или эфиризации четыреххлористого кремния, которая при условии применения абсолютизированного спирта может быть записана в следующем виде:



Продукт реакции  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$  – этиловый эфир ортокремниевой кислоты, называемый также тетраэтоксисиланом, моноэфиром или мономером. Хлороводород удаляют отгонкой при 120 – 127 °С. Однако процесс отгонки затруднен, поэтому этилсиликат всегда содержит регламентированное количество хлороводорода.

При использовании этилового спирта, содержащего в своем составе некоторое количество воды, состав продуктов реакции изменяется, а их строение усложняется. Это объясняется тем, что вода спирта частично гидролизует тетраэтоксисилан с образованием молекул, которые конденсируются с выделением воды. Эта вода вновь вступает в реакцию гидролиза. В результате гидролиза тетраэтоксисилана (мономера) и продуктов его гидролиза, а также поликонденсации полученных продуктов гидролиза образуется сложная смесь высокомолекулярных соединений, которую называют техническим этилсиликатом. В этом материале отсутствует диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  [29, 30]. Однако связующим керамических форм и стержней является именно твердый неорганический полимер  $\text{SiO}_2$ . Поэтому в обозначении марки этилсиликата принято указывать условное содержание в нем  $\text{SiO}_2$  [31, 32].

В зависимости от количества вводимой при гидролизе воды и методики проведения гидролиза можно получить различные по составу и свойствам связующие. Различают гидролиз малым, средним и большим количеством воды [16]. Часто связующее готовится с применением в качестве разбавителей органических растворителей – спирта, ацетона, которые растворяют и воду и этилсиликат, обеспечивая равномерное протекание процесса гидролиза.

ЭТС обладает рядом недостатков – это один из наиболее дорогостоящих связующих материалов из применяемых на сегодняшний день. Его использование для изготовления керамических стержней требует применения органического гелеобразователя – аммиака, что ведет к повышенной взрыво- и пожароопасности и существенно ухудшает производственные условия работы для сотрудников [33].

Основные служебные свойства керамических форм зависят прежде всего от применяемых огнеупорных наполнителей. Правильный выбор огнеупорного наполнителя определяет такие свойства керамических форм, как огнеупорность, тепловое расширение при нагреве, химическая инертность в контакте с жидким металлом [34].

В качестве огнеупорных наполнителей наиболее широкое применение получили оксиды и силикаты.

При выборе материалов-наполнителей важным является их гранулометрический состав. Для приготовления суспензий можно применять один, два, три сорта материала-наполнителя, но обязательно с двумя или тремя различными по величине зерна фракциями. С помощью гранулометрического состава регулируются газопроницаемость формы, размерная точность отливок и качество их поверхности, расход связующего, прочность материала стержня.

Вредными примесями в огнеупорных материалах-наполнителях являются оксиды щелочных металлов ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), карбонаты ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), железо ( $\text{Fe}$ ) и его оксиды ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), в ряде случаев гидроксиды ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), пирит ( $\text{FeS}_2$ ). Так, в широко применяемом пылевидном кварце содержание железа и щелочей должно быть минимальным. Жесткие

требования к содержанию примесей железа объясняются следующими обстоятельствами.

В кислой среде жидкого связующего происходит окисление железа и нежелательное изменение значения рН связующего, что вызывает преждевременное гелеобразование и, как результат, уменьшение живучести суспензии.

Содержащийся в связующем хлороводород активно взаимодействует с металлическим железом. Интенсивность этого взаимодействия определяется содержанием хлороводорода. Это приводит к вспениванию смеси, повышению ее вязкости под действием выделяющегося водорода, резкому увеличению нестабильности процесса гелеобразования.

При прокаливании керамических форм также происходит окисление металлического железа. Образующиеся при этом оксиды железа ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) вступают во взаимодействие с кварцевым материалом литейной формы. В результате образуются соединения с низкой температурой плавления, которые являются причиной появления на поверхности отливок различных дефектов [16].

Важным показателем также является форма зерна. Согласно ГОСТ 2138-91, по форме зерен формовочные пески разделяются на три группы (округлая, полукруглая и угловатая) [35]. Округлая форма имеет наименьшую площадь поверхности и требует меньшего количества связующего. Угловатая форма требует увеличения количества связующего из-за большей площади поверхности и имеет более низкую текучесть.

В результате струйного помола частицы приобретают остроугольную форму, а при помоле в шаровых или вибрационных мельницах – округлую форму. По этой причине оба материала даже при одинаковой удельной поверхности совершенно различны по своим технологическим свойствам. В суспензиях одинаковой вязкости на  $1 \text{ дм}^3$  гидролизованного раствора этилсиликата содержание пылевидного кварца струйного помола существенно меньше, чем содержание частиц округлой формы.

Другим важным показателем для наполнителя является средний размер зерна. Чем меньше размер зерна применяемого наполнителя, тем выше качество поверхности формы и стержней, а следовательно, и отливки. Но при уменьшении размера зерна наполнителя может существенно увеличиваться потребность в связующем, снизится газопроницаемость и повысится склонность керамики к усадке и образованию крупных трещин.

Удельная (фактическая) площадь поверхности наполнителя является значимым фактором, поскольку связующее распределяется именно по поверхности зерен, следовательно, с увеличением площади требуется больше связующего.

При анализе свойств огнеупорных материалов-наполнителей особое внимание следует уделять коэффициенту линейного расширения.

Кристаллические кварцевые материалы характеризуются весьма высокими коэффициентами линейного расширения ( $13,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) и поэтому не являются в достаточной мере термостойкими с точки зрения требований технологии точного литья. Их применение является одной из основных причин снижения качества и повышения процента брака отливок. Более эффективны зернистые и пылевидные материалы, полученные на основе плавленного кварца, который имеет самый низкий коэффициент линейного расширения ( $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) среди всех огнеупорных материалов-наполнителей, пригодных для изготовления керамических литейных форм. В отличие от кристаллического, плавленный кварц имеет неупорядоченное строение, то есть аморфную структуру. Его получают расплавлением обычного кристаллического кварца и последующим охлаждением.

В качестве алюмосиликатных материалов для керамических форм применяются дистенсиллиманит  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  в зернистом и пылевидном состояниях, а также фракционированный высокоглиноземистый шамот  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ . В дистенсиллиманите при  $1300 - 1350 \text{ }^\circ\text{C}$  происходит процесс образования муллита  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  с выделением  $\text{SiO}_2$  и увеличением его объема до 15 %. По этой причине дистенсиллиманит требует предварительного обжига с целью частичной муллитизации при температуре выше  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ . В

качестве алюмосиликатов используется муллит  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , который характеризуется небольшим коэффициентом линейного расширения, а также устойчивостью при высоких температурах. Его получают при обжиге каолина с содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не менее 36 %. Муллит – аналог очень редкого природного минерала, состоящего из оксидов алюминия и кремния, важнейший технический материал [36, 37]. Это единственный алюмосиликат, устойчивый при высоких температурах, и одна из основных кристаллических фаз во многих керамических материалах, которая имеет, как правило, призматическую или изометрическую морфологию.

Муллит входит в состав высокоглиноземистых огнеупоров, фарфора, шамота и др. Наиболее востребованной для технологии керамики и огнеупоров была и остается система  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ . Обусловлено это обстоятельство не только и не столько тем, что к этой системе принадлежат наиболее массово выпускаемые огнеупоры (шамотные) и керамика (фаянс и фарфор различных видов), но и самые современные функциональные и композиционные материалы. В системе  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  существуют четыре соединения: кианит (дистен), андалузит, силлиманит и муллит.

Фазовая диаграмма системы  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  изучалась многократно. Фаза муллита имеет ширину около 3 мол. %, причем равновесный состав ее смещается при понижении температуры в область меньших содержаний алюминия. Температурная область термодинамической устойчивости фазы муллита 1890 – 1932 °С.

Физико-химические и термические процессы спекания глин и каолинов различного состава в технологии производства шамотных, каолиновых и полукислых изделий происходят согласно диаграмме состояния системы  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  [38].

Единственной твердой фазой, устойчивой при достаточно высоких температурах (>1585 °С), у шамотных и полукислых огнеупоров является муллит  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ . Муллит содержит 72 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 28 %  $\text{SiO}_2$ , кристаллизуется в виде ромбов и призм. Температура плавления муллита 1810 – 1830 °С, в кислотах он не растворяется.

## 1.4 Анализ требований к опытной отливке «Колесо рабочее»

В качестве отливки представителя из номенклатуры рабочих органов для агрегатов нефтегазового комплекса выбрана отливка однозаходного рабочего колеса закрытого типа. Колёса закрытого типа называются так потому, что лопатки у них закрыты диском с обеих сторон, что ведет к образованию частично закрытых полостей и лентовидных каналов в центральной части. Колёса такого типа имеют максимальный КПД и максимальный напор.

Эскиз детали однозаходного колеса закрытого типа показан на рисунке 1.6. Трехмерная модель отливки показана на рисунке 1.7.

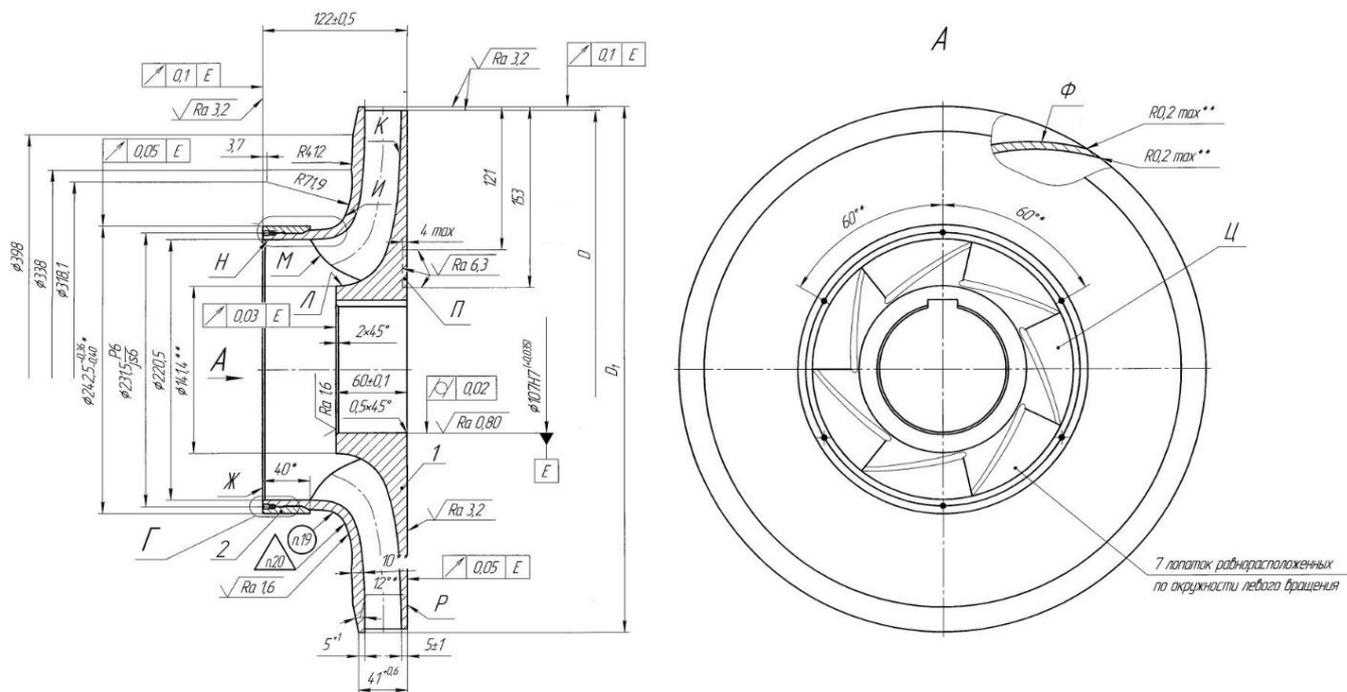


Рисунок 1.6 – Эскиз детали «Колесо рабочее» однозаходное закрытого типа

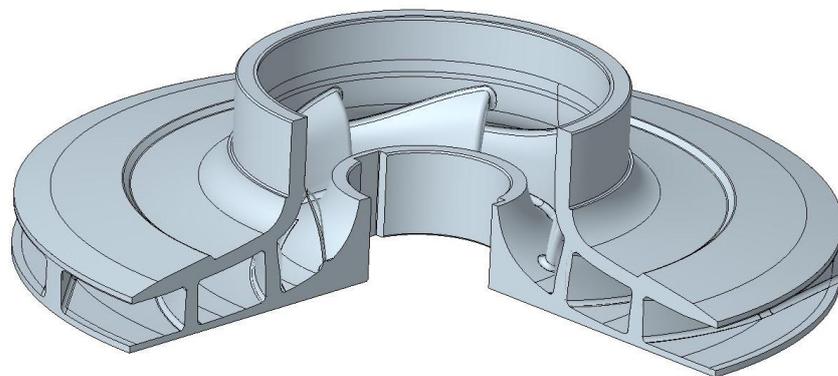


Рисунок 1.7 – Трехмерная модель детали «Колесо рабочее»  
однозаходное закрытого типа

Для производства отливки применяется конструкционная легированная сталь 20ГЛ со следующим химическим составом (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Химический состав стали 20ГЛ (с отклонениями)

Марка стали	Содержание химических элементов в процентах по массовой доле								
	C	Mn	Si	Ni	Mo	V	Cu	S	P
20ГЛ	0,13...0,25	1,0...1,6	0,15...0,70	≤1,5	≤0,3	≤0,3	≤0,3	≤0,02	≤0,02

Загрязнённость неметаллическими включениями (оксиды, сульфиды, силикаты) не должна превышать 3,5 балла по ГОСТ 1778-2022. Балл зерна не крупнее 5 по ГОСТ 5639-82. Значения эквивалента углерода  $C_{\Sigma}$  отливок, характеризующего свариваемость стали, не должны превышать 0,43. Механические свойства стали 20ГЛ представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Механические свойства стали 20ГЛ

Тип материала	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа, не менее	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа, не менее	Относительное удлинение $\delta$ , %, не менее	Относительное сужение $\psi$ , %, не менее	Ударная вязкость $KCV_{-20}$ , Дж/см <sup>2</sup> , не менее	Твёрдость HV, не более	
						Материал отливки	Места исправления сваркой, зоны линии сплавления с основным металлом
20ГЛ	300	500	20	35	24,5	240	275

Отливка 2-й группы ГОСТ 977-88. Точность отливки: проточной части 10-0-0-10, остальных поверхностей 11-0-0-11 ГОСТ Р 53464-2009. Входные кромки лопастей необходимо скруглить в модели радиусом, равным половине толщины лопасти. Шероховатость поверхностей внутренних каналов должна соответствовать шероховатости Ra 3,2. Контроль геометрической точности проточных поверхностей при помощи трехмерного лазерного сканирования с единичными максимальными отклонениями до 2,5 мм, с преобладающим отклонением до 1,5 мм.

Колесо балансируется в динамическом режиме по ГОСТ ИСО 1940-1-2007. Место для снятия металла при балансировке допускается занижать на глубину не более 2 мм. Балансировку допускается производить в составе ротора. Не допускается наличие пригара или других посторонних включений в каналах рабочих колес.

Шероховатость подготовленных под визуальный контроль поверхностей не должна превышать Rz80 (Ra 12,5). Визуально-измерительный контроль проводят по всем доступным поверхностям. Рабочее колесо не допускается к исправлению и бракуется при обнаружении ситовидных раковин, газовых пор, сквозных дефектов, дефектов, находящихся в местах, не позволяющих произвести качественную заварку.

По результатам ВИК к последующим технологическим операциям не допускаются без исправления следующие дефекты: неслитины, пригар, трещины, слоистость.

После допуска по ВИК заготовка передается на ПВК. У рабочих колес капиллярному контролю подвергаются следующие зоны (рисунок 1.8):

- посадочная поверхность вала (зона 1);
- поверхность уплотнительного кольца (зона 1);
- внешние поверхности дисков, внутренние поверхности дисков (зона 2);
- поверхность лицевой и тыльной стороны лопасти (зона 2);
- входные и выходные кромки лопастей (зона 2);
- радиусные переходы лопастей (зона 2).

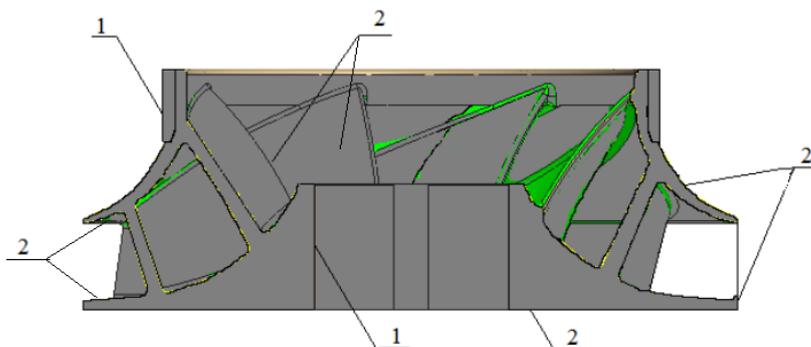


Рисунок 1.8 – Зоны капиллярного контроля рабочего колеса

Ширина контролируемого участка лопасти от входной и выходной кромок определяется технической возможностью проведения ПВК. Шероховатость поверхностей отливки для проведения ПВК должна быть не более Rz 40 (Ra 6,3). Шероховатость поверхностей внутренних каналов рабочего колеса должна соответствовать Ra 3,2.

Признаком дефекта является наличие индикаторного следа, максимальный размер которого в любом направлении превышает 2 мм. Индикаторные следы, расстояния между краями которых меньше протяжённости наименьших из них, оцениваются как один дефект. Цепочкой считаются индикаторные следы, расположенные на одной линии на расстоянии менее 2 мм друг от друга (расстояние измеряется по ближайшим краям индикаторных следов).

Ультразвуковому контролю подвергают следующие зоны литых деталей рабочего колеса:

- радиусные переходы рабочего колеса;
- места срезки (фрезеровки) литейных прибылей;
- зона рабочих лопастей.

Шероховатость поверхностей отливки для проведения УЗК должна быть не более Rz 40 (Ra 6,3). Шероховатость поверхностей внутренних каналов рабочего колеса должна соответствовать Ra 3,2.

### **1.5 Анализ существующих технологий изготовления керамических стержней и форм для изготовления отливки представителя**

Для получения рассматриваемого типа отливок «Колесо рабочее» со сложным профилем лопаток, которые имеют двойную кривизну, на данный момент существует довольно сложная технология изготовления, которая комбинирует технологию наливных керамических форм и стержней с литьем по выплавляемым моделям.

На рисунке 1.9 показана алюминиевая специальная оснастка для изготовления керамических стержней рабочих колес насосов с лопастями

двойной кривизны, при помощи этой же оснастки получается выплавляемая модель на полученный керамический стержень.

Первый этап заключается в получении керамического стержня, для этого в нижнюю часть устанавливают модели лопастей из выплавляемого модельного состава, изготовленные в отдельной пресс-форме. Фиксация достигается за счет двух специальных знаков на каждой лопасти, расположенных на нижнем торце. Все рабочие поверхности оснастки смазывают разделительным составом.

Фиксация лопастей в верхней части обеспечивается отъемной кольцевой частью 8 с отверстиями под центровочные знаки (по одному знаку на каждую лопасть), расположенными по верхним торцам этих моделей. Затем на часть 8 накладывается верхняя половина оснастки, а сверху крышка 7.

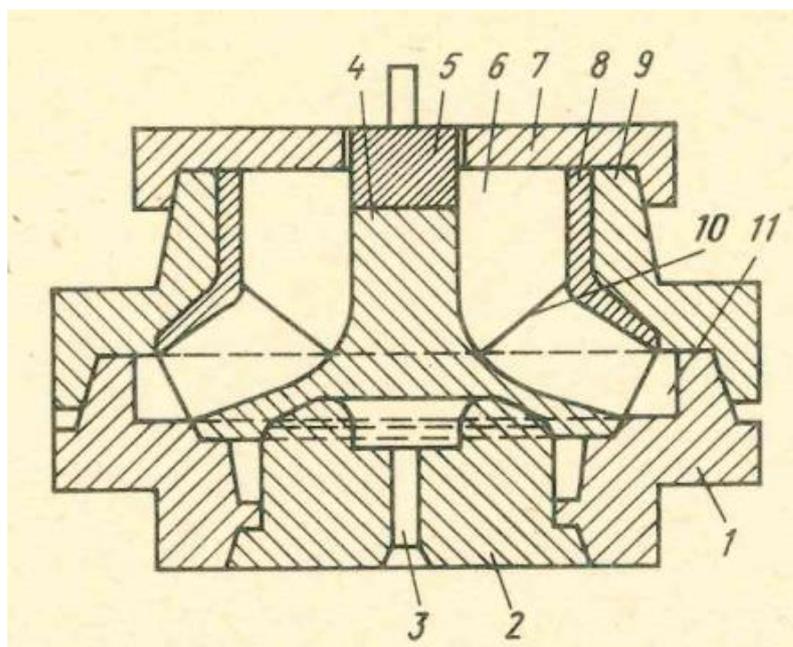


Рисунок 1.9 – Оснастка для получения керамического стержня и цельной выплавляемой модели для получения отливки «Колесо рабочее»:

- 1 – нижняя половина; 2 – центральная вставка нижней половины;
- 3 – литниковый ход для запрессовки выплавляемого модельного состава;
- 4 – отъемная часть; 5 – пробка для выжимания излишков суспензии;
- 6 – полость с моделями лопастей; 7 – крышка; 8 – отъемная кольцевая часть;
- 9 – верхняя половина; 10 – модели лопасти из выплавляемого модельного состава; 11 – кольцевая полость

В подготовленную таким образом оснастку заливается керамическая суспензия. Затем в отверстие в центре крышки 7 устанавливается пробка 5 до контакта с верхним торцом отъемной части 4. Излишек суспензии выдавливается в зазор между крышкой 7 и пробкой 5 на поверхность крышки, откуда после затвердевания суспензии счищается и удаляется.

После полного огеливания керамической суспензии в полости 6 удаляется пробка 5, затем последовательно снимаются крышка 7, верхняя половина 9 и отъемная кольцевая часть 8. При изготовлении стержня центровая вставка 2 не используется, следовательно, извлечение стержня с залитыми в нем моделями лопастей и отъемной частью 4 из оснастки производится путем его выталкивания или выжимания через центральное отверстие в нижней половине 1. Керамический стержень с моделями лопастей 10 освобождают от отъемной части 4 на специальной оправке (на рисунке 1.9 не показана). После соответствующей обработки изготовленный в полости 6 стержень устанавливают с помощью знаковой части 11 в нижнюю половину 1 без отъемных частей 4 и 8, а сверху размещают верхнюю половину 9, затем крышку 7 с пробкой 5. Обе половины оснастки и крышку скрепляют между собой посредством накидных винтов с барашками, оснастку переворачивают на 180° и укладывают на ровную поверхность стола, сверху устанавливают центровую вставку 2 с литниковым ходом 3 для запрессовки на керамический стержень выплавляемого модельного состава. После затвердевания модельной композиции оснастку разбирают в обратном порядке. Извлекают модель рабочего колеса вместе с керамическим стержнем. Затем по центру модели припаивают изготовленный из модельной композиции стояк с литниковой чашой. Далее модель со стержнем направляется на обмазку для формирования на ее поверхности многослойного покрытия по общепринятой технологии изготовления оболочковых керамических форм [16].

При обычном литье по выплавляемым моделям для изготовления таких моделей применяют весьма сложную технологию. Эти модели состоят из восьми отдельных частей, которые соединены в одно целое пайкой. Для

изготовления этих частей применяют три вида оснастки. Использование таких моделей имеет своим следствием пониженную геометрическую точность отливок, так как неизбежное наличие в местах пайки по криволинейным поверхностям непроваров, наплывов и других дефектов. Отрицательно влияет на размерную точность и уровень шероховатости поверхности отливок. Кроме того, трудоемкость изготовления таких моделей высока. В качестве связующего при применении данной технологии используется гидролизированный раствор этилсиликата, а в качестве наполнителя применяется песок кварцевый и пылевидный кварц.

Другой известный способ для получения полуформ и стержней с более простой геометрией также является композиционным с опорной частью из огнеупорного материала. В этих формах слой, непосредственно контактирующий с поверхностью отливки и определяющий ее качество, изготовлен из дорогостоящей керамической смеси, а остальной объем формы заполнен недорогим и доступным формовочным материалом на основе шамота и жидкого стекла, отвержденным продувкой  $\text{CO}_2$ . Композиционные формы сложнее в исполнении, однако дают возможность значительно сократить затраты на формовочные материалы.

Для изготовления таких форм предварительно изготавливают огнеупорный блок, который вкладывают в оснастку. В зазор, образованный между огнеупорным блоком и модельной оснасткой, заливают керамическую суспензию.

Для опорного слоя композиционных форм используют следующие материалы: шамотная крошка, пылевидные циркон или кварц, жидкое стекло и вода. Зернистость шамотной крошки находится в пределах от 0,4 до 2,5 мм.

Технология приготовления наполнительной смеси следующая. Вначале в бегунах смешивают шамот и пылевидный циркон в течение 3 мин, затем добавляют воду и смешивание продолжают еще 2 мин. Вводят жидкое стекло

и все перемешивают 1 мин. Полученная смесь готова к употреблению. Для изготовления наполнительного огнеупорного блока применяют отдельную модельную оснастку.

На базовом предприятии для изготовления керамической суспензии применяется рецептура, приведенная в таблице 1.3 [40].

Таблица 1.3 – Рецептура керамической смеси базовая

Наименование компонента	Содержание, мас. %	Количество, кг
Гидролизированный раствор этилсилката ЭТС-40	31,85	1,00
Наполнитель огнеупорный (мелкий) Kerfalite (0,045 мм)	29,94	0,94
Наполнитель огнеупорный (средний) Kerfalite 0,1 – 0,4 мм	23,90	0,75
Наполнитель огнеупорный (крупный) Kerfalite 0,0 – 1,0 мм	14,31	0,45
Вода аммиачная 6 %		20 мл

Характеристики керамической суспензии и керамических стержней, подготовленных по базовой рецептуре, приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Характеристики стержней и суспензии, полученных на базовом составе

Показатель	Значение
Предел прочности на разрыв в сыром состоянии, Н/см <sup>2</sup>	10,8
Предел прочности на разрыв после прокалки, Н/см <sup>2</sup>	12,8
Склонность керамики к образованию трещин, балл	3
Качество поверхности, балл	1
Жидкотекучесть суспензии по вискозиметру Сутгарда, мм	201

Известными способами получение крупных и сложнопрофильных отливок затруднено. Анализ базовой технологии выявил несколько проблемных этапов изготовления.

Самый распространённый дефект керамических форм и стержней – это образование крупных трещин. Трещины могут появляться и развиваться на всех этапах изготовления, в процессе извлечения изделия из модельно-стержневой оснастки (МСО), после выжигания спирта, в процессе прокалики и в процессе сушки и нагрева формы перед заливкой.

Причина возникновения трещин на этапе извлечения из МСО очевидна. Чем сложнее конфигурация, чем больше перепад толщин стенок, чем больше острых углов в конфигурации, тем большие напряжения возникают в тонких местах, что приводит к образованию трещин.

Трещины в керамических стержнях на этапе изготовления возникают из-за разности в скоростях процесса гелеобразования и удаления растворителя (рисунок 1.10). В процессе прокалики происходит усадка керамики. Чем более мелкий размер наполнителя применяется, тем выше склонность керамики к усадке и тем выше ее склонность к образованию трещин [41].



Рисунок 1.10 – Крупные трещины в полуформе верха

Керамика обладает пористой структурой, что не является дефектом в случае обеспечения необходимой прочности форм и стержней. Однако выход пор на поверхность, особенно крупных (более 1 мм), ведет к существенному снижению качества поверхности будущих отливок и значительному увеличению затрат на обработку. Крупные дефекты возникают в результате «кипения» керамической суспензии после смешивания (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Крупные поры диаметром до 10 мм

Повышенная осыпаемость керамики приводит к искажению геометрии форм и стержней, а следовательно, и к искажению геометрии будущих отливок (рисунок 1.12). Кроме того, в случае повышенной осыпаемости образуется плотный металлизированный пригар.



Рисунок 1.12 – Осыпаемость кромки лопатки

Частичное разрушение стержня при извлечении из модельно-стержневой оснастки показано на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 – Выломы на стержне отливки «Диффузор» при извлечении из МСО

В процессе изготовления отливки часто возникает деформация исходной геометрии стержня (рисунок 1.14). Стержень имеет два знака – боковой и верхний. В этих местах стержень плотно зажат в форме и его деформация невозможна, а профиль между знаками может выгибаться как вверх, так и вниз. Искажение может достигать 5 мм, что существенно превышает допуск на литые изделия. Кроме того, столь значительное искажение рабочего канала приводит к снижению фактически выдаваемых характеристик насоса.

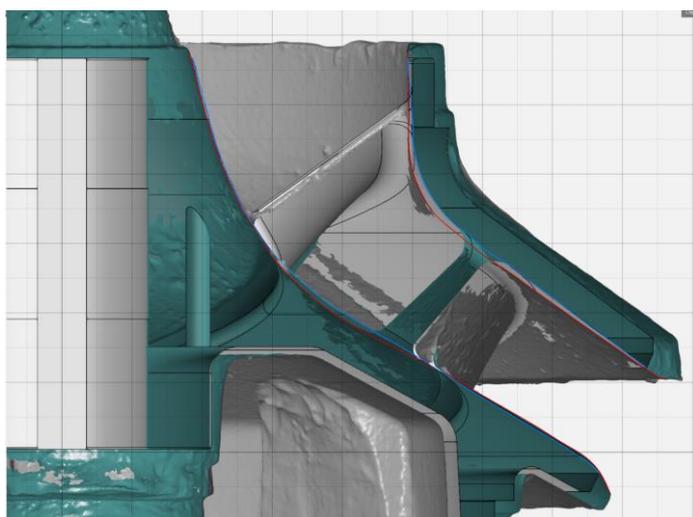


Рисунок 1.14 – Деформация рабочего канала отливки (анализ скана и трехмерной модели, синий – проектная геометрия, красный – фактическая геометрия)

Существенным недостатком базовой технологии является характерное нарушение геометрии внутренней полости, нарушение положения и конфигурации лопаток, которые в абсолютном выражении достигают 4,2 мм, преобладающее отклонение профиля и лопаток составляет  $\pm 2$  мм (рисунок 1.15).

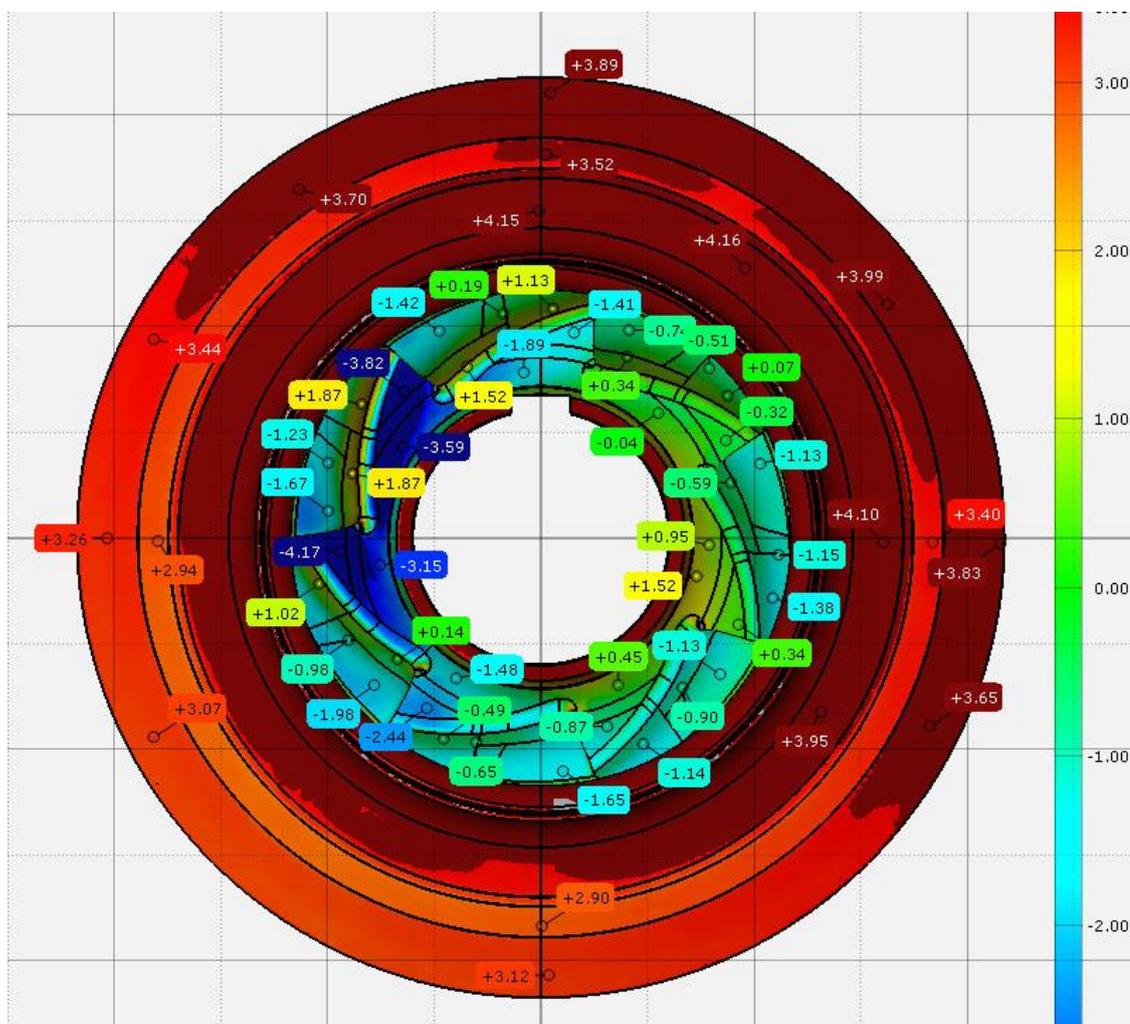


Рисунок 1.15 – Результаты анализа геометрии отливки, полученная по базовой технологии

По базовой технологии получается низкое качество литых поверхностей на уровне шероховатости Rz80... Rz120. Низкие огнеупорность материалов и качество поверхности керамических стержней в базовых технологиях приводит к получению отливок с недостаточным качеством литых поверхностей, которые требуют дальнейшей доработки. Этот процесс существенно увеличивает цикл производства и повышает себестоимость литья.

Остальные требования, предъявляемые к отливкам (требования к химическому составу, механическим свойствам и критерию отбраковки по неразрушающему контролю), обеспечиваются применением базовой технологии в полном объеме.

### **1.6 Цель и задачи исследования**

Таким образом, анализ литературных источников и существующих технологий показывает, что получение керамических суспензии и стержней на ее основе является узким местом при производстве сложных ответственных изделий для нефтегазового комплекса. По мере увеличения габаритных размеров и массы изделий повышаются требования к прочности и термостойкости стержней при сохранении высоких требований к качеству поверхности. Имеющиеся на данный момент технологии не отвечают этим требованиям.

Изучение литературы, связанной с этой проблематикой, показывает, что наиболее простой и доступный способ повышения прочности – отработка рационального фракционного состава наполнителя формовочной смеси. Вторым важным фактором является сохранение геометрической точности керамических форм и стержней в процессе сборки и прокалики. Обеспечение геометрической точности возможно только в случае применения в качестве наполнителя формовочного материала с минимальным коэффициентом термического линейного расширения (КТЛР).

В связи с вышеизложенным целью работы является разработка технологии изготовления литейной формы из керамических стержней для стальных отливок нефтегазового комплекса, обеспечивающей высокую точность геометрии отливок и их требуемые физико-механические свойства, а также низкую шероховатость литых поверхностей.

Для реализации этой цели были поставлены следующие задачи:

- анализ процесса гидролиза этилсилката ЭТС-40 для определения рационального времени гелеобразования;
- анализ структуры и свойств огнеупорных наполнителей;

- анализ структуры и свойств полученных керамических смесей;
- изучение зависимостей прочности и качества поверхности литейной керамики от фракционного и фазового состава наполнителя;
- разработка технологии производства отливки «Колесо рабочее» с подбором формовочных материалов;
- проведение опытных работ по изготовлению отливок «Колесо рабочее»;
- анализ полученных отливок по геометрической точности и шероховатости;
- оценка качества полученных отливок и соответствие их свойств заданным параметрам;
- анализ экономической эффективности разработанной технологии.

## **2 ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **2.1 Приборы**

#### Определение свойств наполнителей суспензии

Для определения среднего размера зерна, коэффициента однородности, теоретической удельной поверхности песка ситовым методом применяется методика по ГОСТ 29234.3-91 [42].

Для проведения испытаний применяется следующее лабораторное оборудование:

- весы лабораторные электронные Pioneer мод. PA4102C, зав. № 1280430985;
- лабораторный просеиватель LPzE-2e, зав. № 5946;
- набор сит с диаметром отверстий в мм: 2,5; 1,6; 1,0; 0,63; 0,425; 0,315; 0,2; 0,16; 0,1; 0,063; поддон.

За результат испытания принимают среднее арифметическое трех определений.

#### Определение реологических свойств суспензии

Для определения условной вязкости применяется методика по ГОСТ 9070-75 [43 – 45]. Для проведения испытаний применяется вискозиметр ВЗ-246П с диаметром сопла 6 мм и вместимостью  $100 \pm 1$  см<sup>3</sup>.

За результат испытания принимают среднее арифметическое трех определений, допускаемые расхождения между которыми не должны превышать 1 с.

Для определения жидкотекучести суспензии применяется определение вязкости по вискозиметру Суттарда [44].

Для определения времени огеливания и гелеобразования этилсиликата применяется методика, приведенная в источнике [16].

При помощи мерной мензурки отмеряется 100 мл гидролизованного раствора этилсиликата, вводится заданное количество гелеобразователя, засекается время на секундомере. Сначала необходимо определить время начала огеливания, состав перестает течь, затем на этом же образце определяется время гелеобразования, то есть время полного затвердевания образца.

Для каждой рецептуры проводится не менее трех опытов. Допустимое отклонение между результатами измерений составляет не более 10 %, при более значительном отклонении замеры проводят повторно.

#### Определение свойств керамических стержней

Для определения прочности керамической смеси на разрыв применяется методика по ГОСТ 23409.7-78 [46, 47].

Для проведения испытаний применяется следующее лабораторное оборудование:

- аппарат для определения прочности формовочных и стержневых смесей LRu-2e/r с оснасткой;
- стержневые ящики для формовки образцов – «восьмерок».

За результат испытания принимают среднее арифметическое минимум трех определений.

#### Рентгенофазовый анализ и микроструктура

Современный рентгенофазовый анализ является значимым инструментом в изучении структуры различных веществ [48]. Основная задача рентгенофазового анализа состоит в идентификации различных фаз в смеси на основе анализа дифракционной картины, получаемой от исследуемого образца [49].

Исследование фазового состава проведено с помощью порошкового рентгеновского дифрактометра RigakuUltimaIV на излучении  $\text{CuK}\alpha$ .

Дифрактометр высокого разрешения «Ultima IV» Rigaku с медным анодом предназначен для прецизионного определения качественного и количественного фазового состава поликристаллических и керамических материалов, в том числе с высоким содержанием железа.

Для исследования микроструктуры керамических стержней применялся растровый электронный микроскоп JEOL-JSM-6460 LV, оборудованный энергодисперсионным анализатором для микроспектрального анализа фирмы Qxford instruments. Для исследования применялся катод из вольфрамовой проволоки, напыление платиновое.

#### Дилатометрия и дериватография

Дилатометрия и дериватография исследуемых материалов проведены на дериватографе с дилатометрической приставкой Q-1500D.

Прибор «Дериватограф Q1500D» представляет собой дифференциальный термический анализатор (ДТА) со следующими характеристиками:

- температура – до 1500 °С;
- чувствительность весов – 20 мг/на всю шкалу;
- интервал измерения от 0 – 10 °С;
- шкала чувствительности – 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 мг/на всю шкалу;
- точность измерения – 20 мг (1 %), 50...100 мг (0,5 %), 20...2000 (0,2 %).

В приборе есть системы автоматизированного перемещения печи и продувки печи инертным газом. Прибор позволяет работать в квазиизотермическом и квазиизобарическом режимах [50 – 52].

#### Исследование свойств сплава

Для анализа химического состава сплава применялся оптический эмиссионный спектрометр с автоматическим анализатором OBLF модели GS1000-II. Методика по ГОСТ 18895 и ГОСТ Р 54153.

Металлографические испытания по определению неметаллических включений (методика по ГОСТ 1778-2022) и определение величины зерна (методика по ГОСТ 5639-82) проведены на инвертированном металлографическом микроскопе Olimpus GX-51.

Испытания механических свойств проведены с применением машины универсальной WDW-100 (испытания на растяжение с определением  $\sigma_B, \sigma_{0,2}, \delta_5, \psi$  по ГОСТ 1497-2023), копра маятникового модификации JB-W300 (испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454-78 с определением KCV при  $T = -20$  °C) и твердомера цифрового LV-700 (измерение твердости по ГОСТ 2999-75).

Неразрушающий контроль отливок опытной партии проведен с применением следующего оборудования и материалов.

Для капиллярного контроля (методика контроля по ГОСТ 18442-80):

- очиститель ОС-41 для предварительной очистки поверхности;
- пенетрант универсальный ПС-42 для заполнения дефектов для дальнейшего их выявления по индикаторным следам;
- проявитель ПС-43 для выявления поверхностных дефектов;
- контрольный образец для капиллярной дефектоскопии 2 класс чувствительности по ГОСТ 18442-80.

Для ультразвукового контроля (методика по КН-25210-14001):

- ультразвуковой дефектоскоп USM 36 или USM GO+;
- настроечные образцы СО-2 и СО-3;
- контрольные образцы с плоскодонными отражателями для прямых и наклонных ПЭП;
- для наклонных ПЭП (при толщине контролируемой зоны до 30 мм) контрольный образец с зарубкой;
- прямой отдельно-совмещенный ПЭП 4 МГц;
- наклонный совмещенный или наклонный отдельно-совмещенный ПЭП 4 МГц.

Для контроля геометрической точности изготовления модельно-стержневой оснастки и готовых отливок применено трехмерное лазерное сканирование. На данный момент все большее применение получают методы анализа геометрии, основанные на совмещении идеальной трехмерной модели с цифровым двойником реального изделия. Технологии получения цифрового двойника имеет несколько подходов, которые различаются по способу взаимодействия измерительного устройства и измеряемого объекта (контактный и бесконтактный или оптический).

Современные сканеры способны одновременно определить положение множества точек измеряемого объекта. К недостаткам метода относят необходимость матирования изделий, поскольку оптический прибор не может работать с прозрачными, блестящими и черными объектами. Еще одним недостатком метода является невозможность получения облака точек в глубоких отверстиях и узких каналах [53 – 56].

Для анализа геометрии был использован ручной 3D-сканер Creaform HandySCAN 700, который поставляется с программным обеспечением VXelements, полностью интегрированным для технологий 3D-сканирования и измерений.

### Анализ шероховатости литых поверхностей

Ввиду геометрической сложности исследуемых изделий применение профилометров для определения шероховатости поверхности затруднено. В исследовании применяется анализ шероховатости по сравнению с эталоном.

## **2.2 Материалы**

В работе исследуются материалы наполнителя керамической суспензии (пылевидные и зернистые), материалы для получения связующего и технологическая добавка (пеногаситель).

Наполнитель огнеупорный Kerfalite (0,045 мм) пылевидный (рисунок 2.1)

*Kerfalite* – это коммерческое название, материал представляет собой андалузит ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ) с химическим составом, представленным в таблице 2.1.



Рисунок 2.1 – Наполнитель огнеупорный Kerfalite (0,045 мм) пылевидный

Таблица 2.1 – Химический состав Kerfalite (0,045 мм)

Массовая доля на прокаленное вещество, %	Норма	Фактически
$\text{Al}_2\text{O}_3$ , не менее	60,0	62,3
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ , не более	1,5	1,0
$\text{TiO}_2$ , не более	1,5	0,8
$\text{SiO}_2$ , не более	38,0	34,9
$\text{CaO}$ , не более	0,5	0,4
$\text{MgO}$ , не более	0,5	0,1
Массовая доля влаги, не более	1,0	0,5

Наполнитель огнеупорный ШК-42 ТУ 5729-002-31199308-2016 (0,0 – 0,063 мм) пылевидный (рисунок 2.2)



Рисунок 2.2 – Наполнитель огнеупорный ШК-42 (0,0 – 0,063 мм)  
пылевидный

Муллит ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) – минерал из группы алюмосиликатов. Обладает высокими огнеупорными свойствами (температура плавления 1825 – 1850 °С), плотность на 3100 – 3200 кг/м<sup>3</sup>; химически стоек и имеет небольшой коэффициент теплового расширения. Муллитизированный наполнитель получают прокалкой каолинового сырья и его рассевом по фракциям на Кыштымском каолиновом комбинате (Челябинская область). Химический состав представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Химический состав ШК-42 (0,0 – 0,063 мм)

Массовая доля на прокаленное вещество, %	Норма	Фактически
$\text{Al}_2\text{O}_3$ , не менее	42,0	42,2
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ , не более	1,5	1,4
$\text{TiO}_2$ , не более	1,5	0,1
$\text{SiO}_2$ , не более	56,0	55,5
$\text{CaO}$ , не более	0,5	0,4
$\text{MgO}$ , не более	0,5	0,4
Массовая доля влаги, не более	1,0	0,0

#### Концентрат дистен-силлиманитовый пылевидный (КДСП) (рисунок 2.3)

Дистен-силлиманит состоит из двух минералов – дистена и силлиманита. Дистен имеет формулу  $\text{Al}_2[\text{SiO}_4]\text{O}$ , при нагреве до 1385 – 1410 °С превращается в муллит с выделением избыточного  $\text{SiO}_2$ . Силлиманит  $\text{Al}[\text{AlSiO}_5]$ , так же как и дистен, при нагреве превращается в муллит (1530 °С). Химический состав КДСП приведен в таблице 2.3.

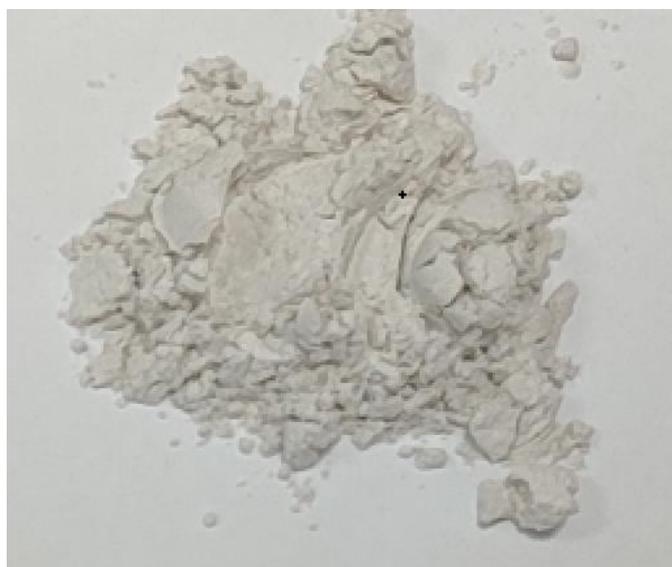


Рисунок 2.3 – Концентрат дистен-силлиманитовый пылевидный (КДСП)

Таблица 2.3 – Химический состав КДСП

Массовая доля на прокаленное вещество, %	Норма	Фактически
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не менее	57,0	59,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не более	0,8	0,7
TiO <sub>2</sub> , не более	2,0	0,6
SiO <sub>2</sub> , не более	41,0	38,6
CaO, не более	0,2	0,1
MgO, не более	0,4	0,2
Массовая доля влаги, не более	0,5	0,1

Для зернистых наполнителей выполнены опыты по определению среднего размера зерна, коэффициента однородности, теоретической удельной поверхности песка ситовым методом.

Наполнитель огнеупорный Kerfalite (0,1 – 0,4 мм) (рисунки 2.4, 2.5, таблицы 2.4, 2.6)



Рисунок 2.4 – Наполнитель огнеупорный Kerfalite (0,1 – 0,4 мм)

Таблица 2.4 – Результаты определения среднего размера зерна, коэффициента однородности, теоретической удельной поверхности Kerfalite (0,1 – 0,4 мм)

Наименование испытаний	Результат
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1527
Средний размер зерна, мм	0,198
AFS GFN	67
Тонкодисперсные фракции (<0,16 мм), %	20,95
Теоретическая удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	11,6

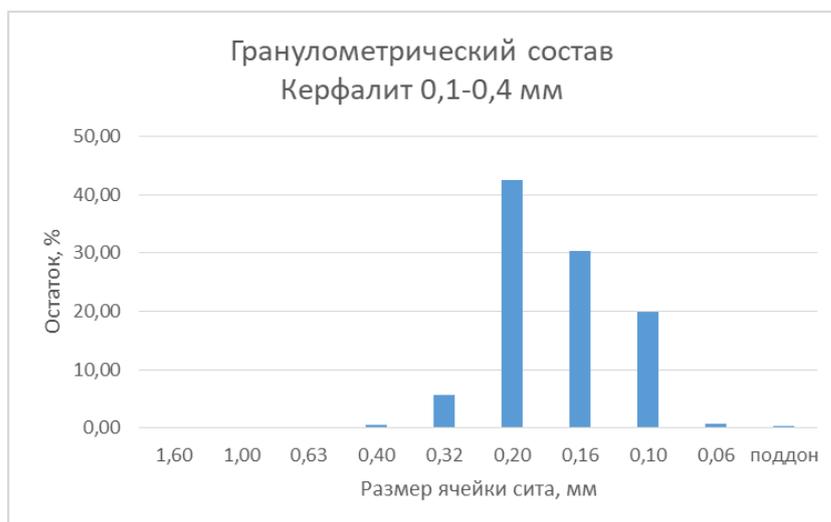


Рисунок 2.5 – Распределение по размеру зерна пробы Kerfalite (0,1 – 0,4 мм)

Таблица 2.5 – Гранулометрический состав Kerfalite (0,1 – 0,4 мм)

Марка песка	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
	1,6	1	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	Поддон
	Остаток на сите, %									
Керfalite 0,1 – 0,4	0,00	0,00	0,00	0,58	5,68	42,50	30,28	19,94	0,74	0,28
Сумма на двух/трех ситах (<70 %/>70 %)										
73/93										

Наполнитель огнеупорный Kerfalite (0 – 1,0 мм) (рисунки 2.6, 2.7, таблицы 2.6, 2.7)



Рисунок 2.6 – Наполнитель огнеупорный Kerfalite (0 – 1,0 мм)

Таблица 2.6 – Результаты определения среднего размера зерна, коэффициента однородности, теоретической удельной поверхности Kerfalite (0 – 1,0 мм)

Наименование испытаний	Результат
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1654
Средний размер зерна, мм	0,432
AFS GFN	42
Коэффициент однородности, %	–
Тонкодисперсные фракции (<0,16 мм), %	7,56
Тонкодисперсные фракции (<0,1 мм), %	1,32
Теоретическая удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	6,7

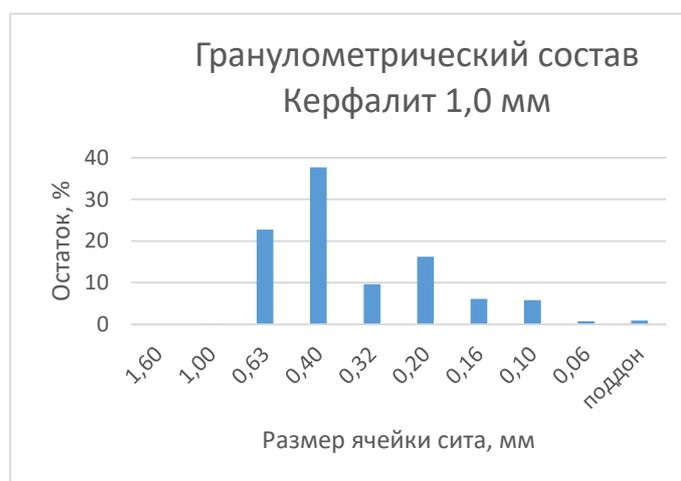


Рисунок 2.7 – Распределение по размеру зерна пробы Kerfalite (0 – 1,0 мм)

Таблица 2.7 – Гранулометрический состав Kerfalite (0 – 1,0 мм)

Марка песка	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
	1,6	1	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	Поддон
	Остаток на сите, %									
Kerfalite 1,0	0,00	0,14	22,75	37,72	9,61	16,22	6,14	5,80	0,74	0,84
Сумма на двух/трех ситах (<70 %/>70 %)										
61/77										

### Кварц плавленный фракция 0,125 – 0,3 мм (рисунок 2.8)

Природный пылевидный кварц имеет нестабильный химический состав и различные примеси (таблица 2.8). Одним из лучших огнеупорных материалов на основе кварца является плавленный кварц, который получают из обычного кварца при нагреве выше температуры плавления. Плавленный кварц имеет аморфную структуру, не претерпевает полиморфных превращений при нагреве, а термический коэффициент линейного расширения в двадцать раз

меньше, чем у природного кристаллического кварца. Плавленный кварц намного дороже природного кварца, однако использование плавленного кварца позволяет увеличить термостойкость, прочность и размерно-геометрическую точность форм и отливок [42].

Таблица 2.8 – Химический состав кварца плавленного фракции 0,125 – 0,3 мм

Наименование показателей	Норма	Результаты испытаний
Массовая доля оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), %	Не менее 98,00	99,800
Массовая доля металлического железа ( $\text{Fe}_{\text{мет}}$ ), %	Не более 0,25	–
Массовая доля оксида железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), %	Не более 0,15	0,023
Массовая доля оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), %	Не более 1,00	0,145
Массовая доля оксида кальция ( $\text{CaO}$ ), %	Не более 0,15	–
Потери при прокаливании, %	0,10 – 0,20	0,150
Массовая доля влаги, %	Не более 2,00	0,120
Реакция водной вытяжки	Нейтральная	Нейтральная



Рисунок 2.8 – Наполнитель огнеупорный кварц плавленный, фракция 0,125 – 0,3 мм

Результаты определения среднего размера зерна, коэффициента однородности, теоретической удельной поверхности кварца плавленого фракции 0,125 – 0,3 мм представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты определения среднего размера зерна, коэффициента однородности, теоретической удельной поверхности кварца плавленого фракции 0,125 – 0,3 мм

Наименование испытаний	Результат
Средний размер зерна, мм	0,189
AFS GFN	79
Тонкодисперсные фракции (<0,16 мм), %	33,43
Тонкодисперсные фракции (<0,1 мм), %	8,84
Теоретическая удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	13,0

Гранулометрический состав кварца плавленого фракции 0,125 – 0,3 мм представлен в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Гранулометрический состав кварца плавленого фракции 0,125 – 0,3 мм

Марка песка	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
	1,6	1	0,63	0,425	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	Поддон
	Остаток на сите, %									
Кварц плавленный 016С	0,00	0,00	0,00	0,00	1,61	42,86	22,10	24,59	7,29	1,55
Сумма на двух/трех ситах (<70 %/>70 %)										
65/91										

Распределение по размеру зерна пробы кварца плавленого фракции 0,125 – 0,3 мм представлено на рисунке 2.9.

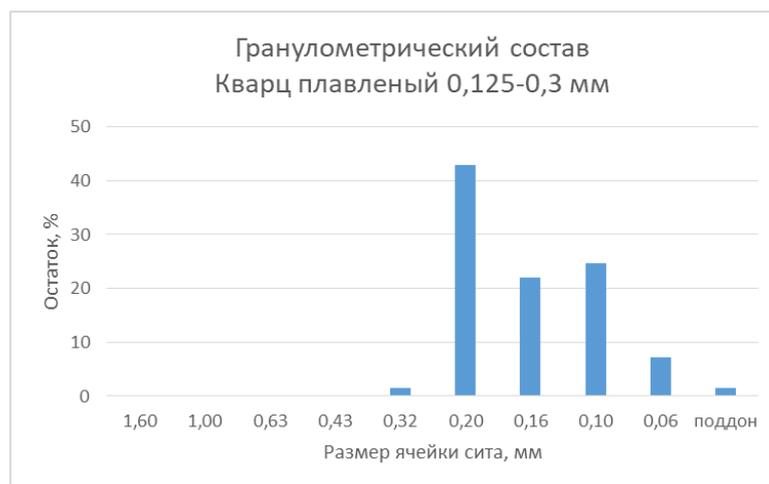


Рисунок 2.9 – Распределение по размеру зерна пробы кварца плавленного, фракции 0,125 – 0,3 мм

Кварц плавленный, фракция 0,25 – 0,4 мм (рисунки 2.10, 2.11, таблицы 2.11, 2.12)

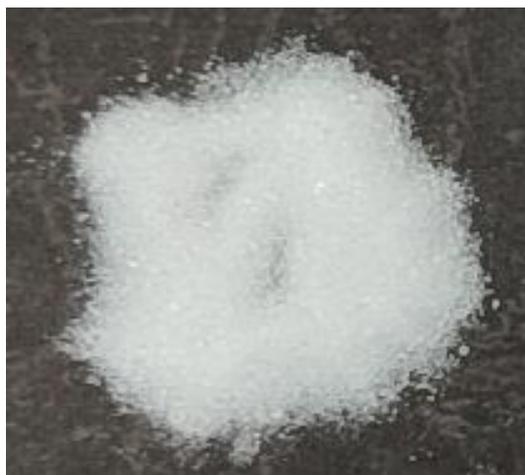


Рисунок 2.10 – Наполнитель огнеупорный кварц плавленный, фракция 0,25 – 0,4 мм

Таблица 2.11 – Результаты определения среднего размера зерна, коэффициента однородности, теоретической удельной поверхности кварца плавленного фракции 0,25 – 0,4 мм

Наименование испытаний	Результат
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1118
Средний размер зерна, мм	0,296
AFS GFN	48
Тонкодисперсные фракции (<0,16 мм), %	2,90
Тонкодисперсные фракции (<0,1 мм), %	0,50
Теоретическая удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	8,0
Массовая доля влаги, %	0,1

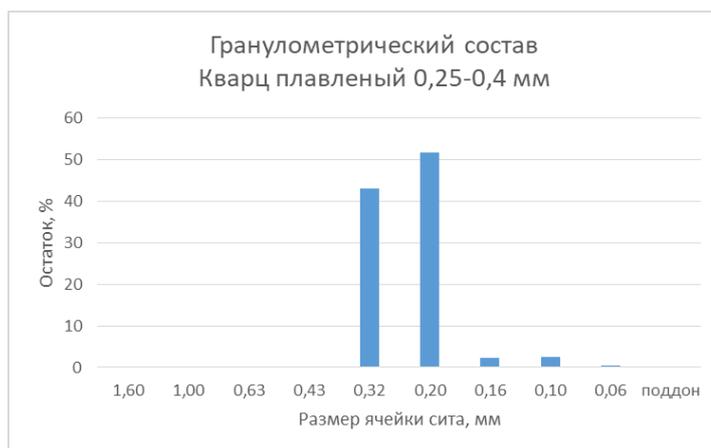


Рисунок 2.11 – Распределение по размеру зерна пробы кварца плавленного фракции 0,25 – 0,4 мм

Таблица 2.12 – Гранулометрический состав кварца плавленного фракции 0,25 – 0,4 мм

Марка песка	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
	1,6	1	0,63	0,425	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	Поддон
	Остаток на сите, %									
Кварц плавленный 0,25 – 0,4 мм	0,00	0,00	0,00	0,00	43,09	51,69	2,32	2,40	0,48	0,02
Сумма на двух/трех ситах (<70 %/>70 %)										
95/97										

Кварц плавленный, фракция 0,5 – 1,0 мм (рисунки 2.12, 2.13, таблицы 2.13, 2.14)



Рисунок 2.12 – Наполнитель огнеупорный кварц плавленный, фракция 0,5 – 1,0 мм

Таблица 2.13 – Результаты определения среднего размера зерна, коэффициента однородности, теоретической удельной поверхности

Наименование испытаний	Результат
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1075
Средний размер зерна, мм	0,741
AFS GFN	20
Тонкодисперсные фракции (<0,16 мм), %	0,00
Теоретическая удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	3,2

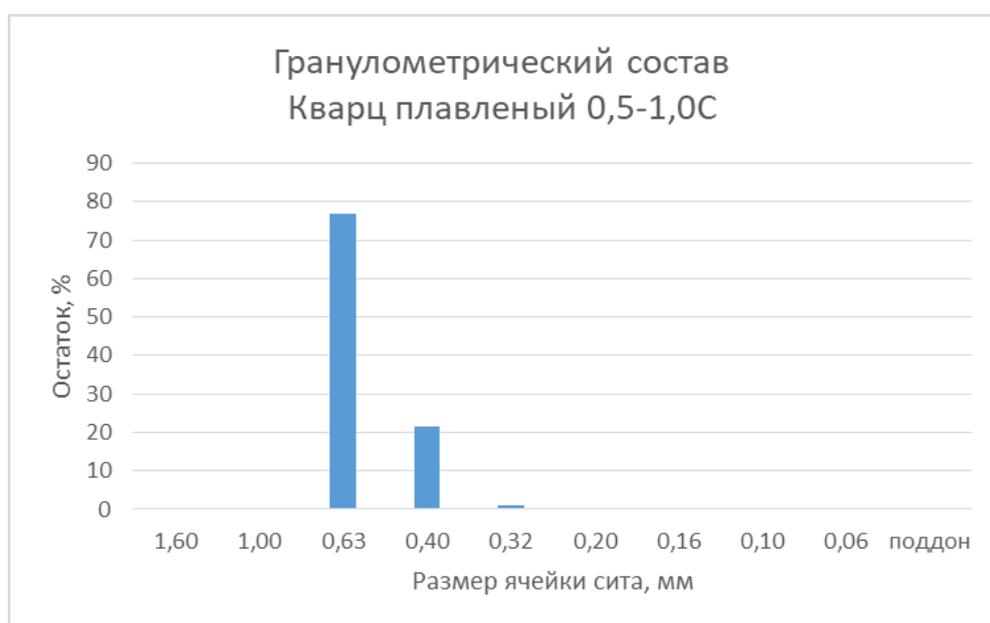


Рисунок 2.13 – Распределение по размеру зерна пробы кварца плавленного фракции 0,5 – 1,0 мм

Таблица 2.14 – Гранулометрический состав кварца плавленного фракции 0,5 – 1,0 мм

Марка песка	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
	1,6	1	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	Поддон
	Остаток на сите, %									
Кварц плавленный 0,5 – 1,0С	0,00	0,10	76,99	21,49	1,04	0,34	0,04	0,00	0,00	0,00
Сумма на двух/трех ситах (<70 %/>70 %)										
98/99										

Наполнитель огнеупорный ШК-42 ТУ 5729-002-31199308-2016  
(0,2 – 0,63 мм) (рисунки 2.14, 2.15, таблицы 2.15, 2.16)



Рисунок 2.14 – Наполнитель огнеупорный ШК-42 (0,2 – 0,63 мм)

Таблица 2.15 – Результаты определения среднего размера зерна, коэффициента однородности, теоретической удельной поверхности наполнителя огнеупорного ШК-42 (0,2 – 0,63 мм)

Наименование испытаний	Результат
Средний размер зерна, мм	0,418
AFS GFN	35
Тонкодисперсные фракции (<0,16 мм), мас. %	0,06
Тонкодисперсные фракции (<0,1 мм), мас. %	0,05
Теоретическая удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	5,5

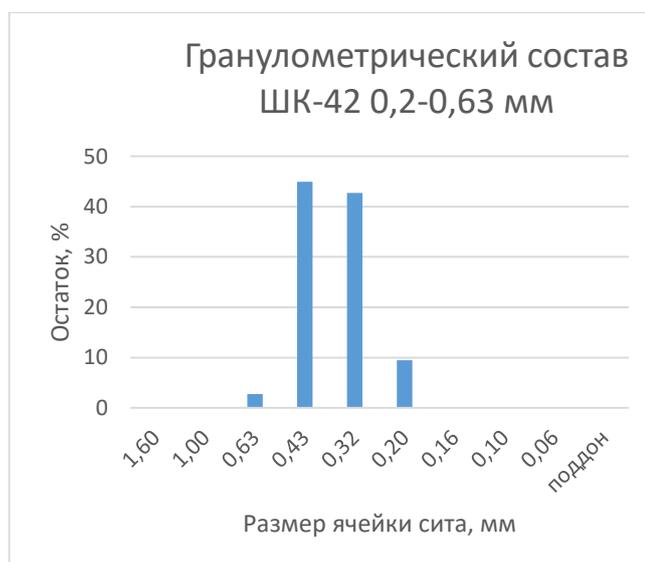


Рисунок 2.15 – Распределение по размеру зерна пробы ШК-42 (0,2 – 0,63 мм)

Таблица 2.16 – Гранулометрический состав кварц ШК-42 (0,2 – 0,63 мм)

Марка песка	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
	1,6	1	0,63	0,425	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	Поддон
	Остаток на сите, %									
ШК-42 (0,2 – 0,63 мм) от 06.09.22 П414	0,00	0,00	2,75	44,95	42,74	9,50	0,00	0,00	0,00	0,06
Сумма на двух/трех ситах (<70 %/>70 %)										
88/97										

Наполнитель огнеупорный ШК-42 (0,5 – 1,25 мм) (рисунки 2.16, 2.17, таблицы 2.17, 2.18)



Рисунок 2.16 – Наполнитель огнеупорный ШК-42 (0,5 – 1,25)

Таблица 2.17 – Результаты определения среднего размера зерна, коэффициента однородности, теоретической удельной поверхности наполнителя огнеупорного ШК-42 (0,5 – 1,25 мм)

Наименование испытаний	Результат
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1222
Средний размер зерна, мм	0,708
AFS GFN	21
Тонкодисперсные фракции (<0,16 мм), мас. %	0,00
Тонкодисперсные фракции (<0,1 мм), мас. %	0,00
Теоретическая удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	3,2

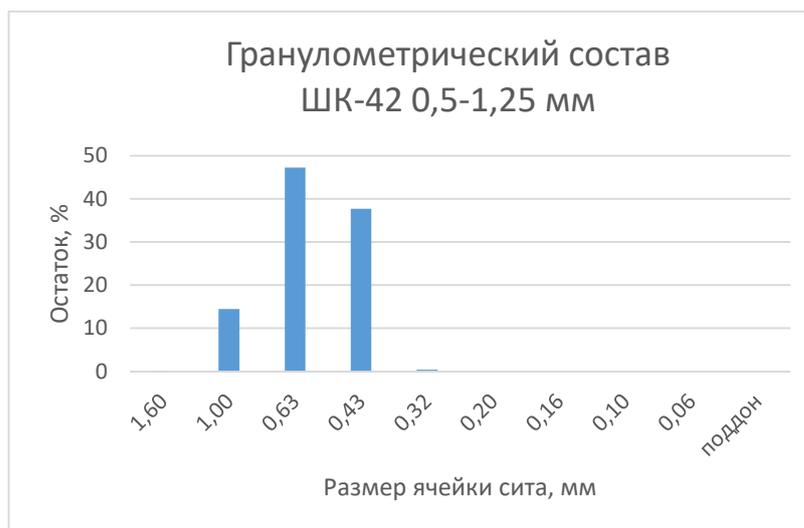


Рисунок 2.17 – Распределение по размеру зерна пробы ШК-42 (0,5 – 1,25)

Таблица 2.18 – Гранулометрический состав ШК-42 (0,5 – 1,25)

Марка песка	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
	1,6	1	0,63	0,425	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	Поддон
Остаток на сите, %										
ШК-42 (0,5 – 1,25 мм)	0,12	14,50	47,26	37,68	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Сумма на двух/трех ситах (<70 %/>70 %)										
85/99										

Для проведения экспериментов использовались следующие компоненты для изготовления гидролизованного раствора этилсиликата (таблица 2.19): ЭТС-40 (ТУ 2435-427-05763441-2004), вода дистиллированная, кислота соляная (химический чистый (х.ч. ОКП 26 1234 0013 04), спирт изопропиловый и 6 %-й водный раствор аммиака [57, 58].

Таблица 2.19 – Технические характеристики этилсиликата

Наименование	Показатели
Маркировка	ЭТС-40
Внешний вид	Прозрачная жидкость без механических примесей
Массовая доля двуокиси кремния, %, не более	38 – 42
Массовая доля хлористого водорода, %, не более	0,05
Массовая доля этилового спирта, %, не более	1,5
Массовая доля тетраэтоксисилана, %, не более	10 – 15
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	1,04 – 1,07

Для опытов был выбран силиконовый пеногаситель марки «Пента-462 А» (таблица 2.20, 2.21). Этот материал – высокоэффективная 20 %-я силиконовая антипенная эмульсия низкой вязкости, он химически инертен к большинству веществ – действует независимо от компонентов, вызывающих вспенивание. Применяется в широком диапазоне температур: от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отличается малой токсичностью, нелетучестью, способностью работать в различных средах, пожаровзрывобезопасностью.

Таблица 2.20 – Состав пеногасителя марки «Пента-462 А» [59]

Компоненты	Массовая доля, %		
	А	Б	В
Поли [диметил (силоксан и силикон)]	25	30	35
Октадециловый спирт этоксилированный	3	4	5
Загуститель ксантановая смола	1 – 3		
Вода	72	66	60

Таблица 2.21 – Качественные показатели пеногасителя марки «Пента-462 А» [60, 59]

Наименование показателей	Норма по ТУ/ГОСТ	Результаты испытаний
Внешний вид	Жидкость белого цвета без запаха	Соответствует
Пеногасящие свойства: объем пены, мл, не более	80	20
Пеногасящие свойства: время разрушения пены, с, не более	10	2
Реакция среды (рН 1 % водного раствора)	5,0 – 8,0	6,8
Вязкость кинематическая при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	300 – 2000 мм <sup>2</sup> /с;	
Смешиваемость с водой	В любых соотношениях, образуя эмульсию	Соответствует

### 2.3 Программное обеспечение (ПО)

Для построения трехмерных моделей отливки, формы в сборе, модельно-стержневой оснастки, вспомогательных приспособлений и выпуска

конструкторской документации применяется программный комплекс CREO PARAMETRIC.

Для анализа процесса заливки и затвердевания отливки, а также для прогнозирования дефектов применяется программный комплекс MAGMASoft.

Для анализа геометрической точности оснастки, стержней и отливок с помощью трехмерного лазерного сканирования применяется программный комплекс GOMInspect.

## 2.4 Методики проведения исследований

### Определение склонности к образованию трещин и качества поверхности керамических стержней

Анализ литературных источников показывает, что на данный момент не существует общепринятой методики определения склонности материала к образованию трещин [61 – 65].

Данная проблема встречается в различных отраслях промышленности и при производстве различных изделий. Склонность материала к образованию трещин имеет важную роль при производстве строительных материалов, огнеупоров, различных керамических изделий, а также при производстве отливок.

Можно выделить общую классификацию трещин:

- температурные трещины, вызванные разностью температур в различных частях изделия при нагреве и охлаждении;
- фазовые трещины, вызванные неоднородно или неравномерно протекающими фазовыми превращениями в различных частях изделия;
- усадочные трещины, обусловленные усадочными процессами.

Как правило, для всех изделий появление любых трещин является нежелательным, но при изготовлении керамических форм и стержней для последующей заливки сталью носит неоднозначный характер. Это связано с тем, что керамические формы и стержни обладают низкой

газопроницаемостью, а образование на поверхности керамического изделия сетки мелких трещин приводит к ее увеличению, тем самым снижая вероятность образования в отливке газовых дефектов, но при этом не ведет к ухудшению качества поверхности будущей отливки. Образование крупных трещин является нежелательным явлением, которое ведет к образованию просечек в отливках, нарушению геометрии, полному разрушению форм и стержней, уходу металла в трещины.

Для анализа склонности исследуемых видов керамики к образованию крупных трещин и качества поверхности предлагается экспериментальная методика. Для проведения испытаний разработана и изготовлена из пластика модельная оснастка для получения образца (рисунок 2.18).

Полученный образец оценивается по двум характеристикам: склонность к образованию трещин и качество поверхности.

Методика определения склонности керамики к образованию трещин предполагает оценку по 5-бальной шкале (чем меньше балл, тем ниже склонность керамики к образованию трещин):

- 1 – очень низкая склонность к образованию трещин;
- 2 – низкая склонность к образованию трещин;
- 3 – средняя склонность к образованию трещин;
- 4 – высокая склонность к образованию трещин;
- 5 – очень высокая склонность к образованию трещин.

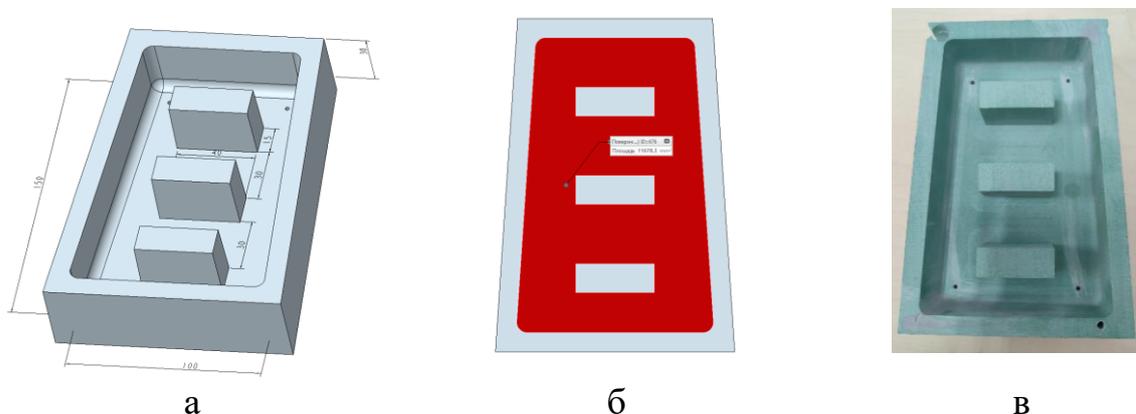


Рисунок 2.18 – Оснастка для получения образца:

а – трехмерная модель; б – модель определяющей площади поверхности ( $11678 \text{ мм}^3$ ); в – оснастка из пластика модельного

1. Трещины на поверхности полностью отсутствуют или очень мелкие. Протяженность трещин до 5 мм. Трещины в концентрационных углах отсутствуют или не превышают протяженность 10 мм (рисунок 2.19).



Рисунок 2.19 – Образец 1 балла склонности к образованию трещин

2. На поверхности равномерная сетка мелких трещин протяжённостью до 10 мм. Трещины в концентрационных углах не превышают протяженность 15 мм (рисунок 2.20).



Рисунок 2.20 – Образец 2 балла склонности к образованию трещин

3. На поверхности равномерная сетка средних трещин протяжённостью до 15 мм. Трещины в концентрационных углах протяженностью от 5 до 20 мм (рисунок 2.21).



Рисунок 2.21 – Образец 3 балла склонности к образованию трещин

4. На поверхности сетка крупных трещин протяжённостью до 30 мм, глубина трещин до 50 % толщины образца. Трещины в концентрационных углах крупные и соединяются с другими трещинами (рисунок 2.22).



Рисунок 2.22 – Образец 4 балла склонности к образованию трещин

5. На образце имеются крупные трещины с глубиной более 50 % толщины образца, сквозные трещины или разрушение образца вследствие растрескивания (рисунок 2.23).



Рисунок 2.23 – Образец 5 баллов склонности к образованию трещин

Методика определения качества поверхности керамики предполагает оценку по 3-бальной шкале (чем выше балл, тем хуже качество поверхности):

- 1 – высокое качество поверхности;
- 2 – среднее качество поверхности;
- 3 – низкое качество поверхности.

За основу берется визуальная оценка качества боковой поверхности образца, полученной при контакте керамики со стенками оснастки. При наличии на образце участков с различным качеством за основу принимается наихудший участок.

1. Поверхность ровная, без дефектов, которые способны повлиять на качество поверхности отливки, допускается наличие мелких пор диаметром до 1 мм (рисунок 2.24).

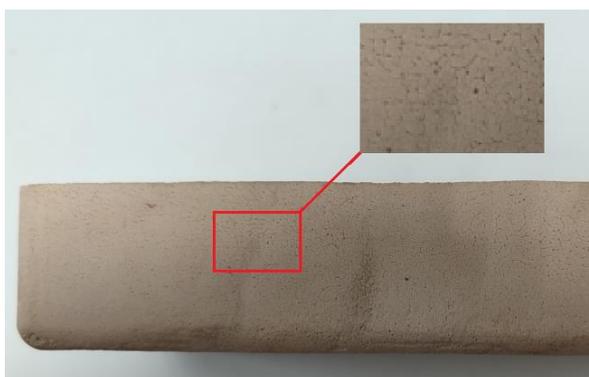


Рисунок 2.24 – Образец 1 балл качество поверхности

2. Поверхность ровная с незначительными неровностями, которые могут повлиять на качество поверхности будущей отливки. Могут присутствовать поры до 2 мм (рисунок 2.25).



Рисунок 2.25 – Образец 2 балла качество поверхности

3. На поверхности большое количество шероховатостей, неровностей, крупные пузыри. Либо поверхность образца не воспроизводит поверхность и конфигурацию оснастки (рисунок 2.26).



Рисунок 2.26 – Образец 3 балла качество поверхности

### **3 РАЗРАБОТКА СОСТАВА СУСПЕНЗИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ СВОЙСТВ**

#### **3.1 Влияния процесса гидролиза на качество этилсиликатного связующего**

Связующее играет ключевую роль в процессе изготовления керамической суспензии и последующем изготовлении форм и стержней. На сегодняшний день для изготовления керамических наливных и оболочковых форм наиболее широко применяются связующие на основе гидролизованного раствора этилсиликата. Разработана и группа водно-коллоидных связующих, которые обладают большим количеством преимуществ [56, 66 – 71]. Неорганические связующие более безопасные с экологической точки зрения и более дешёвые, кроме того оболочки и формы, полученные на их основе, имеют гораздо большую прочность. Но применение этого класса связующих для производства крупногабаритных изделий со сложной конфигурацией сильно затруднено.

Керамическая суспензия при изготовлении стержня с момента ввода гелеобразователя и до полного затвердевания проходит несколько последовательных стадий. Они включают в себя жидкое, вязкое, вязкопластичное, упругопластичное, упругое и твердое состояния. При применении неорганических связующих на алюмоборфосфатном концентрате в суспензии отсутствуют вязкопластичное, упругопластичное, упругое состояния. Суспензия длительное время остается в жидком состоянии, затем проходит очень короткий период вязкого состояния и сразу переходит в твердое состояние. Отсутствие упругопластичного и упругого периода при изготовлении стержней сложной конфигурации не позволяет произвести извлечение вкладышей, оформляющих лопатки и другие элементы оснастки [72].

Для изготовления рассматриваемого класса изделий принято решение использовать связующее на основе гидролизованного раствора этилсиликата.

Применение гидролизованного раствора этилсиликата подробно рассмотрено в нескольких работах [16, 30, 34, 73 – 76].

Основное влияние на качество гидролизованного раствора этилсиликата оказывают следующие факторы:

- условное содержание  $\text{SiO}_2$  в гидролизованном растворе ЭТС;
- качество исходного этилсиликата;
- количество воды, вводимое при гидролизе ( $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5$ );
- тип и количество гелеобразователя;
- интенсивность перемешивания суспензии;
- длительность хранения гидролизованного раствора этилсиликата.

Большинство исследований в области процесса гидролиза этилсиликата проведено для последующего применения в литье по выплавляемым моделям. Для применения в наливных формах по постоянным моделям необходимо уточнение. В рассматриваемом процессе требуется очень четкое регулирование времени огеливания (момент перехода из жидкого в вязкое состояние) и времени гелеобразования (переход в твердое состояние).

Для проведения экспериментов использовались следующие компоненты: ЭТС-40 (ТУ 2435-427-05763441-2004 изм. 1-б), вода дистиллированная, кислота соляная (химический чистый (х.ч.) ОКП 26 1234 0013 04), спирт изопропиловый и 6 %-й водный раствор аммиака [57, 58].

В зависимости от количества вводимой при гидролизе воды и методики проведения гидролиза можно получить различные по составу и свойствам связующие. Различают гидролиз с малым, средним и большим количеством воды [16]. Для проведения экспериментов применяется вода дистиллированная.

Этилсиликат и вода являются взаимно нерастворимыми жидкостями, их прямое смешивание приводит к расслоению, что ведет к гидролизу только на поверхности раздела между двумя жидкостями. Для проведения объемного гидролиза необходим разбавитель, в котором хорошо растворяются обе жидкости и продукты их взаимодействия [77].

Вода и этилсиликаты обладают хорошими показателями растворимости в различных спиртах и ацетоне. В данной работе для проведения всех опытов использовался спирт изопропиловый.

В качестве катализатора, который ускоряет процесс гелеобразования, применяются различные органические и неорганические материалы. В данной работе в качестве гелеобразователя применялся 6 %-й водный раствор аммиака.

Реакция гидролиза заключается в замещении в молекулах моно- и полиэтоксисилоксанов этоксильных групп ( $\text{OC}_2\text{H}_5$ ), непосредственно связанных с атомами кремния, на гидроксильные группы ( $\text{OH}$ ). В зависимости от количества добавляемой воды к этилсиликату полнота такого замещения, то есть степень гидролиза, может быть различной. Степень гидролиза выражается в процентах и представляет собой отношение замещенных водой этоксильных групп к их общему числу в этилсиликате. С увеличением количества добавляемой воды к этилсиликату и, следовательно, мольного отношения  $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5$  степень гидролиза этилсиликата увеличивается.

Связующие растворы первого типа характеризуются соотношением  $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5=0,25 - 0,35$ , они представляют собой истинный раствор полиэтоксисилоксанов. При таком соотношении этилсиликатов и воды реакция гидролиза сразу же сопровождается реакцией поликонденсации, поэтому без специальных реакций невозможно разделить эти два процесса и выделить продукты гидролиза. Связующие растворы второго типа характеризуются соотношением  $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5=0,40 - 0,70$ . При таком соотношении образуется смесь истинных растворов полиэтоксисилоксанов и коллоидных зольей  $\text{SiO}_2$ . Связующие растворы третьего типа характеризуются соотношением  $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5=0,70 - 1,00$ . При таком соотношении образуются коллоидная система, а именно силикозоль в водноспиртовой среде.

Согласно данным [16], существует общая закономерность, связывающая прочность керамических образцов с содержанием  $\text{SiO}_2$  и с уменьшением количества воды, использованного для гидролиза этилсиликата.

Для эксперимента проводился гидролиз ЭТС-40 с различным количеством воды,  $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5=0,30 - 0,60$  при постоянном условном содержании  $\text{SiO}_2 = 28 \%$  по рецептурам, приведенным в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Экспериментальные рецептуры для гидролиза с разным Н

Наименование компонента	Содержание, об. %			
	Образец №1 Н=0,3	Образец №2 Н=0,4	Образец №3 Н=0,5	Образец №4 Н=0,6
Этилсиликат ЭТС-40	65,00	65,00	65,00	65,00
Спирт изопропиловый	30,00	28,00	26,00	24,00
Вода дистиллированная	5,00	7,00	9,00	11,00
Кислота соляная ХЧ (сверх 100 %)	0,65	0,65	0,65	0,65

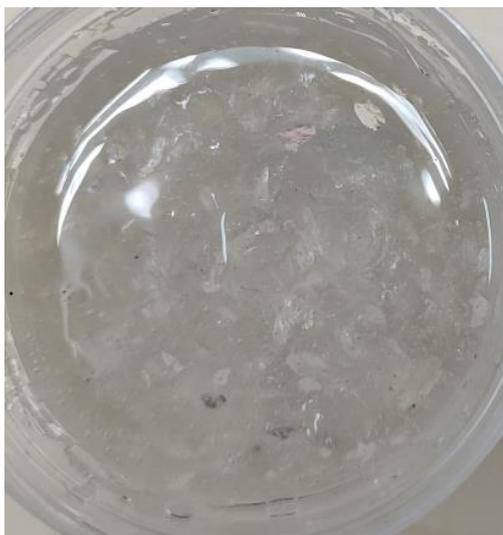
Результаты определения условной вязкости образцов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Условная вязкость гидролизованного раствора этилсиликата по ВЗ-6

Номер образца	Вязкость условная (сопло 6 мм), с
1	15
2	16
3	18
4	24

Исследование проводилось через 24 часа после смешивания компонентов для гидролиза. В мерные пластиковые емкости наливали по 100 мл гидролизованного раствора этилсиликата и добавляли различное количество огеливателя (6 %-й раствор аммиака). На рисунке 3.1 представлены результаты гелеобразования в образцах 3 и 4.

Полученные результаты приведены в таблицах 3.3 и 3.4 и на рисунках 3.2 и 3.3. Анализ вязкости проводился по методике, описанной в главе 2.



а



б

Рисунок 3.1 – Гелеобразование в образцах 3 и 4:

а – гель образца 3 при 4 мл катализатора; б – гель образца 4 при 4 мл катализатора

Таблица 3.3 – Результаты определения продолжительности огеливания с различным соотношением Н

Номер образца	Время огеливания в зависимости от содержания катализатора (6 %-й раствор аммиака) в %, с								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1			720	350	80	45	35	28	20
2	290	180	90	42	30	25	20	17	15
3	180	110	50	26	18	12	8	7	6
					Неравномерное выпадение геля				
4	2								

Таблица 3.4 – Результаты определения продолжительности гелеобразования с различным соотношением Н

Номер образца	Время гелеобразования в зависимости от содержания катализатора (6 %-й раствор аммиака) в %, с								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1			900	400	100	52	42	35	30
2	500	300	160	70	44	35	30	25	20
3	340	190	65	35	23	16	10	8	7
					Затвердевание с небольшим количеством жидкости				
4	2								
	Неравномерное выпадение разрозненных осадков в большом количестве жидкости								

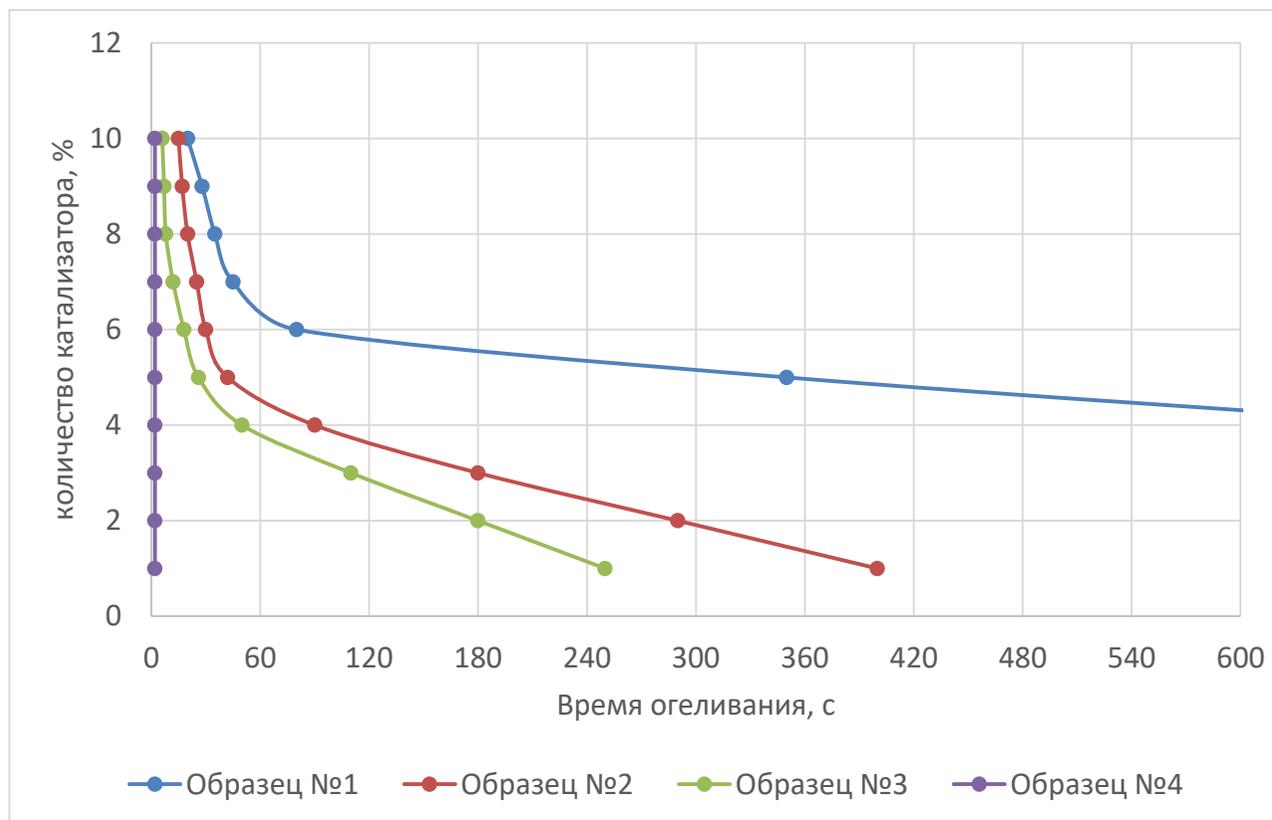


Рисунок 3.2 – Продолжительность огеливания в зависимости от соотношения  $H=H_2O/OC_2H_5$  и количества катализатора

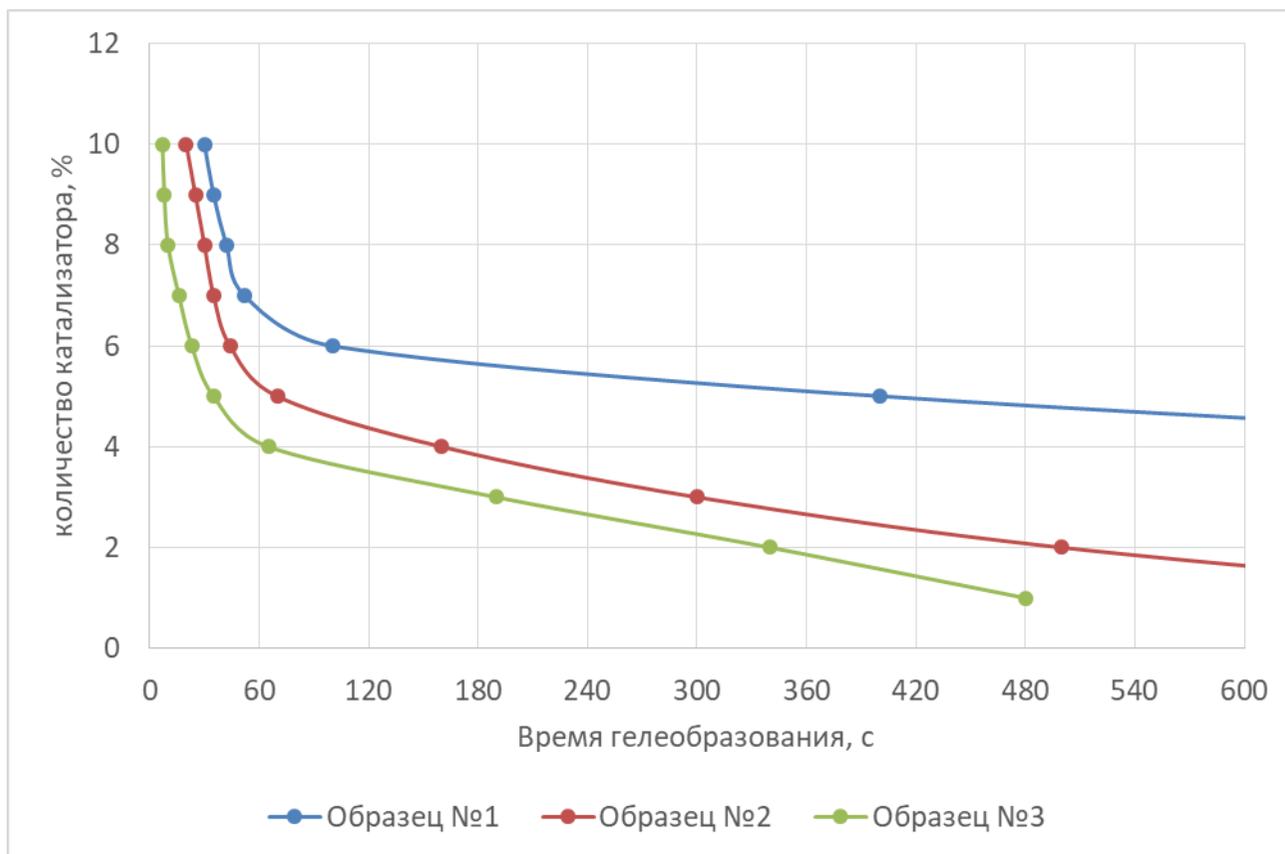


Рисунок 3.3 – Продолжительность гелеобразования в зависимости от соотношения  $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5$  и количества катализатора

Результаты опыта показывают, что применение гидролизованного раствора с соотношением  $N=H_2O/OC_2H_5$  более 0,5 не представляется возможным для приготовления керамической суспензии, поскольку наблюдается неравномерное огеливание, неконтролируемое местное выпадение геля и выделение жидкости. Уменьшение количества воды, введенной для гидролиза, требует значительного увеличения количества катализатора. Поскольку катализатор представляет собой водный раствор, то его количество желательно минимизировать. Для дальнейших опытов рационально использование соотношения  $N=H_2O/OC_2H_5=0,4 - 0,45$ .

Наиболее часто встречающиеся данные в литературе свидетельствуют о том, что гидролиз целесообразно рассчитывать на условное содержание  $SiO_2 = 16 - 20 \%$ . Но данные рекомендации, в большинстве случаев, относятся к изготовлению керамических оболочек для литья по выплавляемым моделям.

Был проведен опыт с различным условным содержанием  $SiO_2$  и постоянным отношением  $N=H_2O/OC_2H_5=0,45$ . Для этого изготовили 4 образца гидролизованного раствора этилсиликата по рецептурам, приведенным в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Экспериментальные рецептуры для гидролиза этилсиликата с разным  $SiO_2$

Наименование компонента	Содержание, об. %			
	Образец №1 $SiO_2=16$	Образец №2 $SiO_2=20$	Образец №3 $SiO_2=24$	Образец №4 $SiO_2=28$
Этилсиликат ЭТС-40	37,00	47,00	56,00	65,00
Спирт изопропиловый	60,00	48,00	37,50	27,00
Вода дистиллированная	3,00	5,00	6,50	8,00
Кислота соляная ХЧ (сверх 100 %)	0,37	0,47	0,56	0,65

Полученные результаты приведены в таблицах 3.6 и 3.7 и на рисунках 3.4 и 3.5.

Таблица 3.6 – Результаты определения продолжительности огеливания с различным условным содержанием SiO<sub>2</sub>

Номер образца	Время огеливания в зависимости от содержания катализатора (6 %-й раствор аммиака) в %, с								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	–	–	–	–	–	450	220	120	70
2	–	–	1200	450	250	160	100	70	52
3	450	240	150	96	65	46	35	24	21
4	220	135	64	32	22	16	12	10	9

Таблица 3.7 – Результаты определения продолжительности гелеобразования с различным условным содержанием SiO<sub>2</sub>

Номер образца	Время гелеобразования в зависимости от содержания катализатора (6 %-й раствор аммиака) в %, с								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	–	–	–	–	–	750	310	180	110
2	–	–	–	800	400	240	153	100	79
3	500	330	240	170	120	82	58	44	36
4	380	230	120	58	38	30	24	20	16

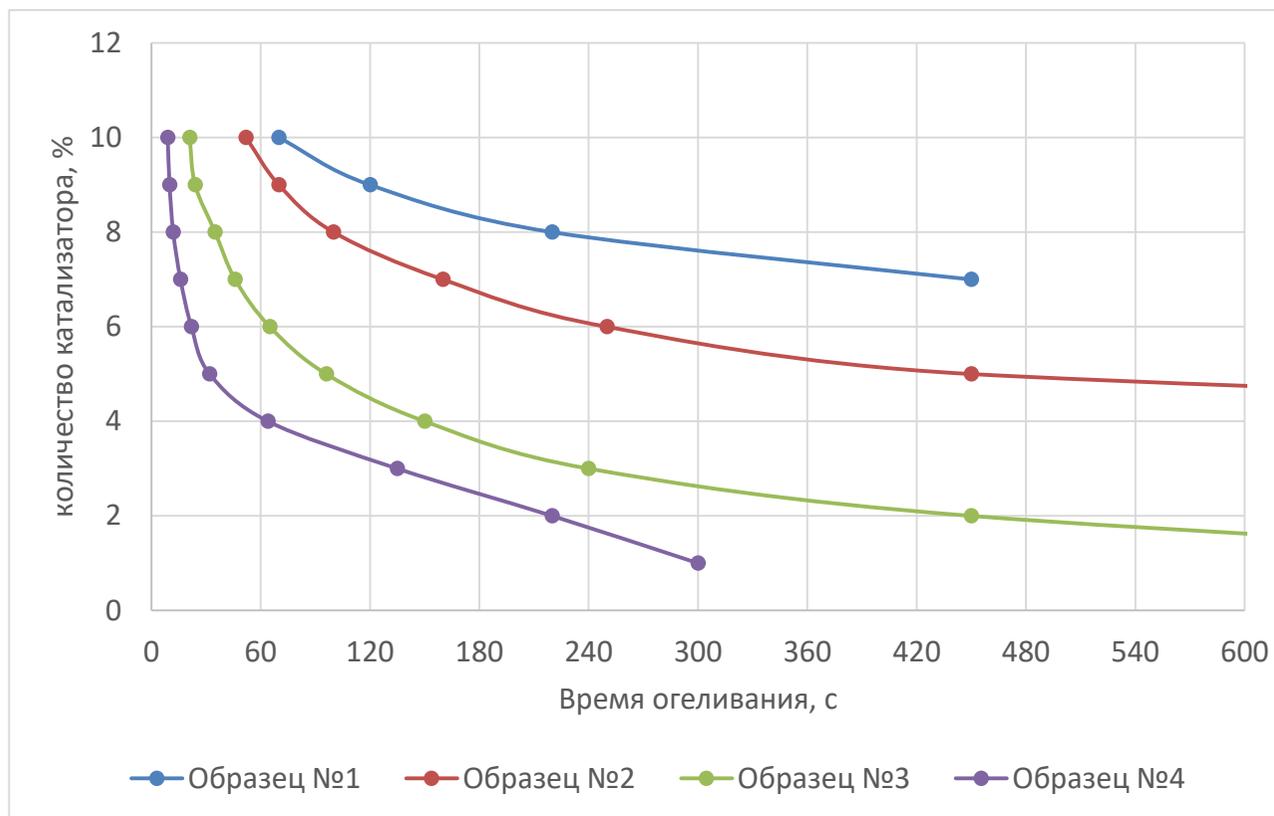


Рисунок 3.4 – Продолжительность огеливания в зависимости от условного содержания  $\text{SiO}_2$  и количества катализатора



### 3.2 Определение рационального состава гидролизованного раствора этилсиликата

Полученные экспериментальные данные были сведены в одну таблицу 3.8:

$X_1$  – условное содержание  $\text{SiO}_2$ , %;

$X_2$  – соотношение молей воды и этоксильных групп  $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5$ ;

$X_3$  – содержание катализатора, мл;

$Y_1$  – время огеливания, с;

$Y_2$  – время гелеобразования, с.

Таблица 3.8 – Исходные данные для расчета регрессии

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$Y_1$	$Y_2$
28,00	0,30	4,00	8,40	112,00	1,20	32,30	720	900
28,00	0,30	5,00	8,40	140,00	1,50	33,30	350	400
28,00	0,30	6,00	8,40	168,00	1,80	34,30	80	100
28,00	0,30	7,00	8,40	196,00	2,10	35,30	45	52
28,00	0,30	8,00	8,40	224,00	2,40	36,30	35	42
28,00	0,30	9,00	8,40	252,00	2,70	37,30	28	35
28,00	0,30	10,00	8,40	280,00	3,00	38,30	20	30
28,00	0,40	1,00	11,20	28,00	0,40	29,40	400	800
28,00	0,40	2,00	11,20	56,00	0,80	30,40	290	500
28,00	0,40	3,00	11,20	84,00	1,20	31,40	180	300
28,00	0,40	4,00	11,20	112,00	1,60	32,40	90	160
28,00	0,40	5,00	11,20	140,00	2,00	33,40	42	70
28,00	0,40	6,00	11,20	168,00	2,40	34,40	30	44
28,00	0,40	7,00	11,20	196,00	2,80	35,40	25	35
28,00	0,40	8,00	11,20	224,00	3,20	36,40	20	30
28,00	0,40	9,00	11,20	252,00	3,60	37,40	17	25
28,00	0,40	10,00	11,20	280,00	4,00	38,40	15	20
28,00	0,50	1,00	14,00	28,00	0,50	29,50	250	480
28,00	0,50	2,00	14,00	56,00	1,00	30,50	180	340
28,00	0,50	3,00	14,00	84,00	1,50	31,50	110	190
28,00	0,50	4,00	14,00	112,00	2,00	32,50	50	65
28,00	0,50	5,00	14,00	140,00	2,50	33,50	26	35
28,00	0,50	6,00	14,00	168,00	3,00	34,50	18	23
28,00	0,50	7,00	14,00	196,00	3,50	35,50	12	16
28,00	0,50	8,00	14,00	224,00	4,00	36,50	8	10
28,00	0,50	9,00	14,00	252,00	4,50	37,50	7	8
28,00	0,50	10,00	14,00	280,00	5,00	38,50	6	7
16,00	0,45	7,00	7,20	112,00	3,15	23,45	450	750
16,00	0,45	8,00	7,20	128,00	3,60	24,45	220	310

Окончание таблицы 3.8

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
16,00	0,45	9,00	7,20	144,00	4,05	25,45	12	180
16,00	0,45	10,00	7,20	160,00	4,50	26,45	70	110
20,00	0,45	5,00	9,00	100,00	2,25	25,45	450	800
20,00	0,45	6,00	9,00	120,00	2,70	26,45	250	400
20,00	0,45	7,00	9,00	140,00	3,15	27,45	160	240
20,00	0,45	8,00	9,00	160,00	3,60	28,45	100	153
20,00	0,45	9,00	9,00	180,00	4,05	29,45	70	100
20,00	0,45	10,00	9,00	200,00	4,50	30,45	52	79
24,00	0,45	1,00	10,80	24,00	0,45	25,45	900	900
24,00	0,45	2,00	10,80	48,00	0,90	26,45	450	500
24,00	0,45	3,00	10,80	72,00	1,35	27,45	240	330
24,00	0,45	4,00	10,80	96,00	1,80	28,45	150	240
24,00	0,45	5,00	10,80	120,00	2,25	29,45	96	170
24,00	0,45	6,00	10,80	144,00	2,70	30,45	65	120
24,00	0,45	7,00	10,80	168,00	3,15	31,45	46	82
24,00	0,45	8,00	10,80	192,00	3,60	32,45	35	58
24,00	0,45	9,00	10,80	216,00	4,05	33,45	24	44
24,00	0,45	10,00	10,80	240,00	4,50	34,45	21	36
28,00	0,45	1,00	12,60	28,00	0,45	29,45	300	600
28,00	0,45	2,00	12,60	56,00	0,90	30,45	220	380
28,00	0,45	3,00	12,60	84,00	1,35	31,45	135	230
28,00	0,45	4,00	12,60	112,00	1,80	32,45	64	120
28,00	0,45	5,00	12,60	140,00	2,25	33,45	32	58
28,00	0,45	6,00	12,60	168,00	2,70	34,45	22	38
28,00	0,45	7,00	12,60	196,00	3,15	35,45	16	30
28,00	0,45	8,00	12,60	224,00	3,60	36,45	12	24
28,00	0,45	9,00	12,60	252,00	4,05	37,45	10	20
28,00	0,45	10,00	12,60	280,00	4,50	38,45	9	16

Для построения математической модели воспользовались стандартным пакетом анализа данные Microsoft Excel. Для построения регрессионной модели в нем применяется МНК (метод наименьших квадратов), который обеспечивает получение математической модели, то есть зависимости типа  $Y = F(X)$  на основании экспериментальных данных [78, 79].

Уравнение регрессии в общем случае для  $n$  факторов имеет вид:

$$\hat{Y} = B_0 + B_1X_1 + \dots + B_nX_n + B_{12}X_1X_2 + \dots + B_{n,n-1}X_{n-1}X_n + B_{123}X_1X_2X_3 + \dots + B_{12\dots n}X_1X_2 \dots X_n + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + \dots + B_{nn}X_n^2 + \dots \quad (3.1)$$

или:

$$\hat{Y} = B_0 + \sum_{j=1}^n B_j X_j + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k B_{ji} X_j X_i + \dots + \sum_{j=1}^n B_{jj} X_j^2 + \dots, \quad (3.2)$$

где члены вида  $B_i$ ,  $B_j$ ,  $B_{jj}$  – коэффициенты регрессии;

члены вида  $B_j X_j$  – линейная регрессия;

взаимодействия факторов типа  $B_{ijk} X_i X_j X_k$  – неполная квадратичная регрессия;

члены вида  $B_{jj} X_j^2$  – квадратичная регрессия.

Первым этапом регрессионного анализа является проверка гипотезы об адекватности постулированного уравнения регрессии, то есть насколько удачно постулирована математическая модель (уравнение регрессии) для аппроксимации экспериментального материала. При расчете задается уровень надежности  $\alpha = 0,05$ .

На втором этапе определяется значимость коэффициентов  $B$ , входящих в уравнение регрессии, то есть насколько значимо их значения отличны от нуля. Результаты по регрессионной статистике по параметру  $Y_2$  представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты по регрессионной статистике по параметру  $Y_2$

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,840716392
R-квадрат	0,706804052
Нормированный R-квадрат	0,678059352
Стандартная ошибка	139,7162321
Наблюдения	57

Коэффициент корреляции  $R=0,84$ , множественный коэффициент детерминации  $R^2=0,707$ ; что говорит о высокой адекватности полученного уравнения, его можно использовать в технологических расчетах. Проверка значимости R осуществляется сравнением расчётного критерия Фишера F из таблицы 3.10 результатов дисперсионного анализа с табличным Fт.

Таблица 3.10 – Результаты дисперсионного анализа по параметру  $Y_2$ 

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	7	2399965,362	342852,1945	24,58902108	5,39917E-14
Остаток	51	995551,9015	19520,62552	–	–
Итого	58	3395517,263	–	–	–

Для  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $k_1 = p - 1 = 7 - 1 = 6$  и  $k_2 = n - k_1 = 57 - 6 = 51$   $F_T(4; 51) = 2,282$ . Поскольку  $F = 24,589 > 2,282$ , то коэффициент множественной корреляции  $R$  значим.

Рассчитанный уровень значимости  $5,399E-14 < 0,05$  также подтверждает значимость  $R^2$ .

Коэффициенты регрессии и их статистические оценки приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Коэффициенты регрессии и их статистические оценки по параметру  $Y_2$ 

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
$X_0$	2671,51	552,23	4,84	0,000013	1562,85	3780,16	1562,85	3780,16
$X_1$	326,52	91,16	3,58	0,000761	143,51	509,53	143,51	509,53
$X_2$	0,00	0,00	0,00	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,00
$X_3$	0,00	0,00	0,00	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,00
$X_{12}$	-99,24	31,58	-3,14	0,002786	-162,64	-35,85	-162,64	-35,85
$X_{13}$	5,46	2,47	2,21	0,031450	0,51	10,42	0,51	10,42
$X_{23}$	317,92	136,30	2,33	0,023655	44,29	591,55	44,29	591,55
$X_{123}$	-354,78	93,70	-3,79	0,000404	-542,89	-166,67	-542,89	-166,67

Проверку значимости коэффициентов регрессии  $B_0, B_1, B_2, B_3, B_{12}, B_{13}, B_{23}$  и  $B_{123}$  провели сравнением абсолютных значений коэффициентов с их стандартной ошибкой. Если значение свободного члена больше его стандартной ошибки, то он значим. Кроме того, о значимости коэффициентов

судят по значениям показателя «Р-Значение», которые должны быть меньше заданного уровня значимости  $\alpha = 0,05$ .

Другой распространенный способ проверки значимости коэффициентов регрессии основан на проверке попадания показателя t-статистика в критическую область. Критерий Стьюдента  $t_p$  можно легко вычислить с помощью функции СТЬЮДРАСПОБР (0,05; 57-7-1), где 0,05 – заданный уровень значимости; 57 – количество наблюдений (измерений) Y; 7 – количество переменных; 1 – количество свободных членов в уравнении регрессии. Для нашего расчета  $t_p (0,05; 57-7-1) = 2,009$ . Так как  $t_p = 2,009$ , то критический интервал составит  $(-\infty; -2,009) \cup (+2,009; +\infty)$ .

Таким образом, все коэффициенты кроме  $B_2, B_3$  являются значимыми, уравнение регрессии имеет вид:

$$Y_2 = 2671,51 + 326,52X_1 - 99,24 X_1 \cdot X_2 + 5,46 X_1 \cdot X_3 + 317,92 X_2 \cdot X_3 - 354,78 X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (3.3)$$

Аналогичным образом построим и проанализируем уравнение для  $Y_1$ :

$$Y_1 = 2435,54 + 307,01X_1 - 81,14 X_1 \cdot X_2 + 6,69 X_1 \cdot X_3 + 266,07 X_2 \cdot X_3 - 341,98 X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (3.4)$$

Согласно построенной регрессионной зависимости прямое влияние на время огеливания и гелеобразования оказывает только условное содержание  $SiO_2$  в гидролизованном растворе этилсиликата. Два оставшихся фактора варьирования (соотношение молей воды и количества этоксильных групп  $N=H_2O/OC_2H_5$  и содержание катализатора) в эксперименте имеют только совместное влияние. С повышением условного содержания  $SiO_2$  время огеливания и гелеобразования увеличивается.

Поиск рационального значения основывается на использовании математической модели и оптимизационного метода (в нашем случае используется метод оптимизации, который реализован в Excel в процедуре «Поиск решения» – это метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ)).

Поскольку в технологическом процессе необходимо выполнение определенных процедур, то проводится не оптимизация по максимуму или

минимуму, а определение рационального значения целевой функции. Задается время огеливания 3,5 мин, а время гелеобразования 7 мин.

Для этих значений в результате расчета получены следующие параметры:

- условное содержание  $\text{SiO}_2$  составляет 24,3 %;
- соотношение молей воды и этоксильных групп  $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5$  составляет 0,45;
- содержание катализатора составляет 2,3 об. % от гидролизованного раствора этилсиликата.

### 3.3 Влияния огнеупорного наполнителя на структуру и свойства керамических стержней

На базовом предприятии в качестве огнеупорного наполнителя для керамической суспензии использовался дорогостоящий песок зарубежного производства Kerfalite трех различных фракций. Гранулометрический состав смеси из трех фракции представлен в таблице 3.12 и на рисунке 3.6.

Таблица 3.12 – Гранулометрический состав смеси из трех фракции Kerfalite

Наполнитель	Кол-во	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм										
		1,60	1,00	0,63	0,40	0,32	0,20	0,16	0,10	0,06	Поддон	
Kerfalite (0,045 мм)	0,44	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
Kerfalite (0,1 – 0,4 мм)	0,35	0,0	0,0	0,0	0,6	5,7	42,5	30,3	19,9	0,7	0,3	
Kerfalite (0 – 1,0 мм)	0,21	0,0	0,1	22,8	37,7	9,6	16,9	6,1	5,8	0,7	0,2	
Всего	1,00	0,0	0,0	4,8	8,1	4,0	18,4	11,9	8,2	0,4	44,1	
Распределение по фракциям		Крупная фракция			Средняя фракция			Мелкая фракция				
		4,8069			30,5543			64,6353				

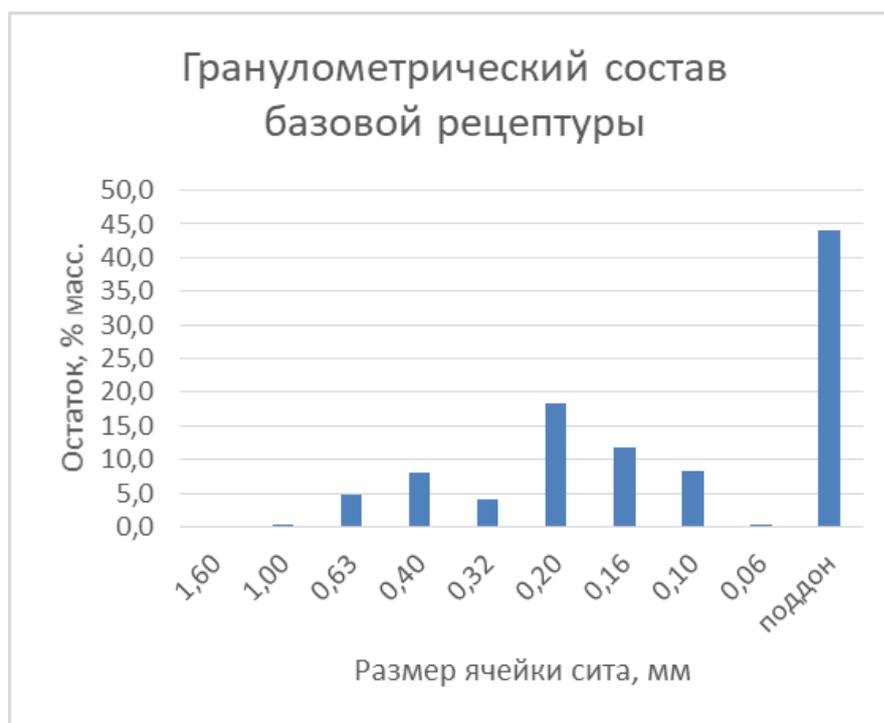


Рисунок 3.6 – Общий гранулометрический состав базовой рецептуры

В исследовании к крупной фракции наполнителя керамической смеси относятся гранулы сит с размерами 1,60, 1,00, 0,63, к средней фракции гранулы сит с размерами 0,40, 0,32, 0,20 (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Распределение наполнителя базовой смеси по фракциям

Результаты испытаний смеси базовой рецептуры с 31,85 % связующего гидролизованного раствора этилсиликата с условным содержанием  $\text{SiO}_2=24\%$  и соотношением  $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5=0,45$  (таблица 3.13).

Таблица 3.13 – Результаты исследований образцов базовой рецептуры

Испытание	Результат
Предел прочности на разрыв в сыром состоянии после выжигания спирта, Н/см <sup>2</sup>	12,5
Предел прочности на разрыв после прокалки, Н/см <sup>2</sup>	17,4
Склонность к образованию трещин, балл	3
Качество поверхности, балл	1
Жидкотекучесть суспензии по вискозиметру Суттарда, мм	200

По результатам опыта образцы имеют высококачественную поверхность, но очень низкую прочность.

Для проведения дальнейших экспериментов и исследования свойств различных огнеупорных наполнителей были разработаны несколько опытных рецептов с содержанием связующего 25 % и условным содержанием SiO<sub>2</sub>=24 %, а также с соотношением  $N=H_2O/OC_2H_5=0,45$  (таблица 3.14). Результаты опытов представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.14 – Опытные рецептуры огнеупорных наполнителей

Номер образца	Содержание, мас. %		
	Мелкая фракция	Средняя фракция	Крупная фракция
Образец №1	Кварц плавленный		
	25	25	25
Образец №2	Кварц плавленный		
	35	20	20
Образец №3	Кварц плавленный		
	45	15	15
Образец №4	Кварц плавленный		
	55	10	10
Образец №5	Кварц плавленный		
	65	5	5
Образец №6	КДСП	Кварц плавленный	
	25	25	25
Образец №7	КДСП	Кварц плавленный	
	35	20	20
Образец №8	КДСП	Кварц плавленный	
	45	15	15
Образец №9	КДСП	Кварц плавленный	
	55	10	10

Окончание таблицы 3.14

Номер образца	Содержание, мас. %		
	Мелкая фракция	Средняя фракция	Крупная фракция
Образец №10	КДСП	Кварц плавленный	
	65	5	5
Образец №11	Муллитизированный материал ШК-42		
	25	25	25
Образец №12	Муллитизированный материал ШК-42		
	35	20	20
Образец №13	Муллитизированный материал ШК-42		
	45	15	15
Образец №14	Муллитизированный материал ШК-42		
	55	10	10
Образец №15	Муллитизированный материал ШК-42		
	65	5	5
Образец №16	КДСП	Муллитизированный материал ШК-42	
	25	25	25
Образец №17	КДСП	Муллитизированный материал ШК-42	
	35	20	20
Образец №18	КДСП	Муллитизированный материал ШК-42	
	45	15	15
Образец №19	КДСП	Муллитизированный материал ШК-42	
	55	10	10
Образец №20	КДСП	Муллитизированный материал ШК-42	
	65	5	5

Таблица 3.15 – Результаты опытов

Номер образца	Предел прочности на разрыв в сыром состоянии, Н/см <sup>2</sup>	Предел прочности на разрыв после прокалки, Н/см <sup>2</sup>	Склонность керамики к образованию трещин, балл	Качество поверхности, балл
Образец №1	17,0	26,2	3	3
Образец №2	19,2	30,2	3	3
Образец №3	21,0	34,5	3	2
Образец №4	20,5	33,1	3	2
Образец №5	19,0	30,5	3	2
Образец №6	10,4	16,2	3	3
Образец №7	11,5	18,6	3	2
Образец №8	12,2	20,3	3	2
Образец №9	11,2	17,1	4	2

Окончание таблицы 3.15

Номер образца	Предел прочности на разрыв в сыром состоянии, Н/см <sup>2</sup>	Предел прочности на разрыв после прокалки, Н/см <sup>2</sup>	Склонность керамики к образованию трещин, балл	Качество поверхности, балл
Образец №10	10,0	15,1	4	2
Образец №11	12,0	18,7	2	2
Образец №12	15,8	25,1	2	2
Образец №13	18,5	30,8	2	2
Образец №14	20,0	32,1	3	1
Образец №15	17,3	27,0	3	1
Образец №16	11,1	17,3	2	2
Образец №17	14,6	23,0	2	2
Образец №18	16,5	27,0	2	2
Образец №19	16,2	25,4	3	1
Образец №20	13,0	20,1	3	1

Графическая зависимость предела прочности образцов на разрыв в сыром состоянии после выжигания спирта от содержания мелкой фракции в огнеупорном наполнителе приведена на рисунке 3.8. Графическая зависимость предела прочности образцов на разрыв после прокалки от содержания мелкой фракции в огнеупорном наполнителе представлена на рисунке 3.9. Графическая зависимость склонности керамических образцов к образованию трещин от содержания мелкой фракции в огнеупорном наполнителе приведена на рисунке 3.10. Графическая зависимость качества поверхности керамических образцов от содержания мелкой фракции в огнеупорном наполнителе приведена на рисунке 3.11.

Полученные данные показывают, что во всех образцах наблюдается увеличение предела прочности в сыром состоянии и после прокалки с увеличением содержания в составе наполнителя мелкой фракции, однако после превышения определенного предела прочность начинает снижаться, это говорит о том, что на первый план выходят усадочные процессы и образование крупных трещин, которые снижают прочность образцов.

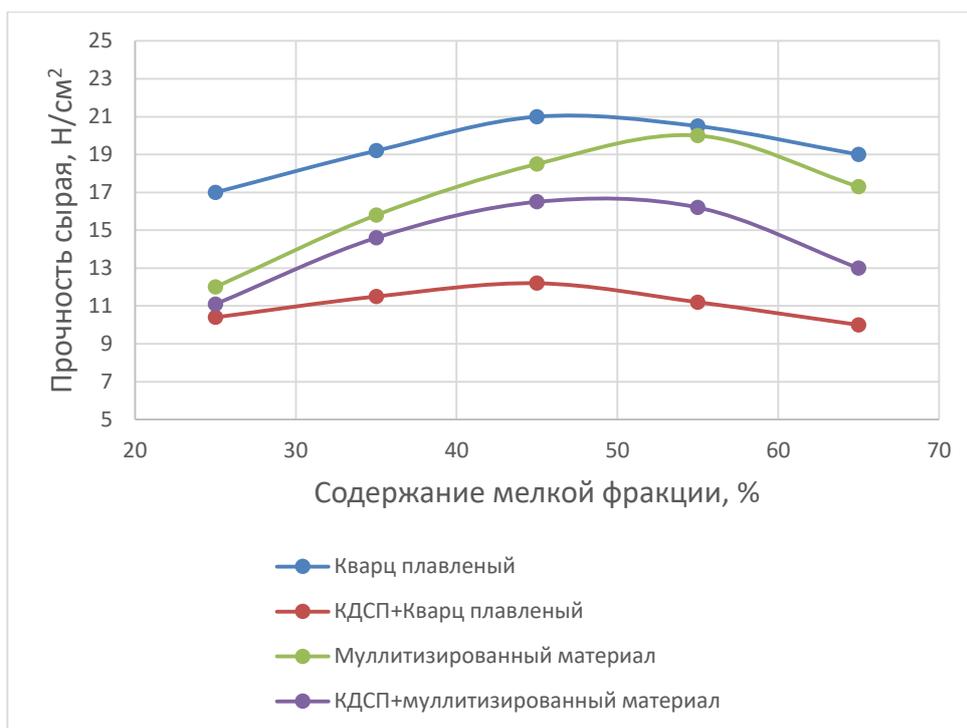


Рисунок 3.8 – Предел прочности образцов на разрыв в сыром состоянии после выжигания спирта в зависимости от содержания мелкой фракции в огнеупорном наполнителе

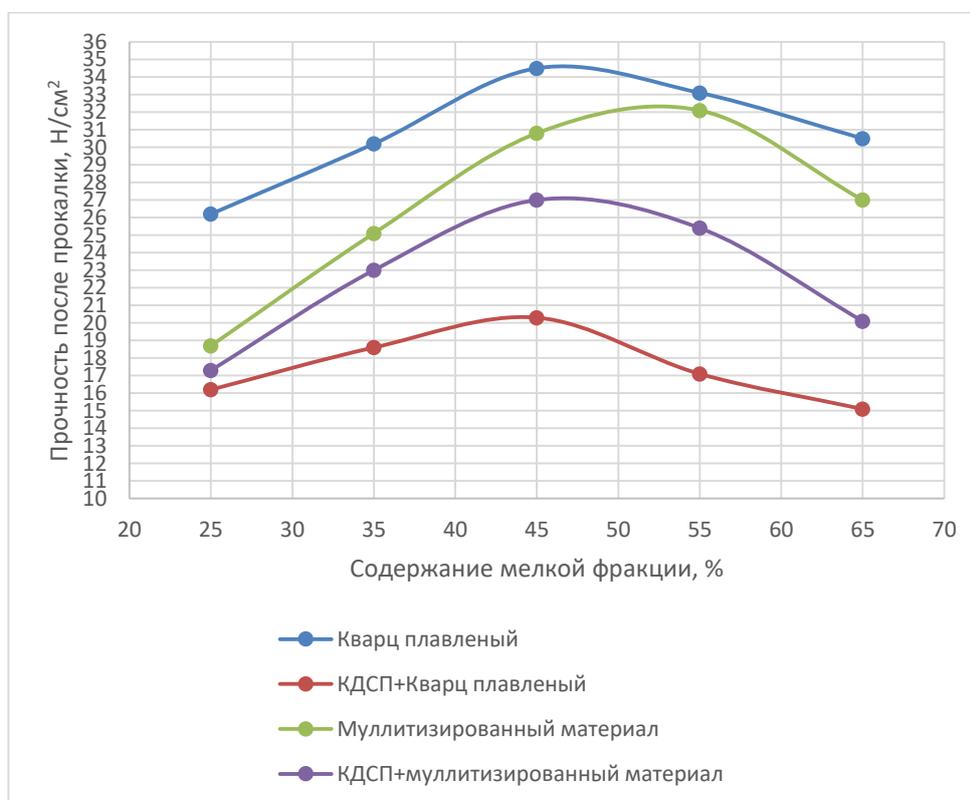


Рисунок 3.9 – Предел прочности образцов на разрыв после прокалики в зависимости от содержания мелкой фракции в огнеупорном наполнителе

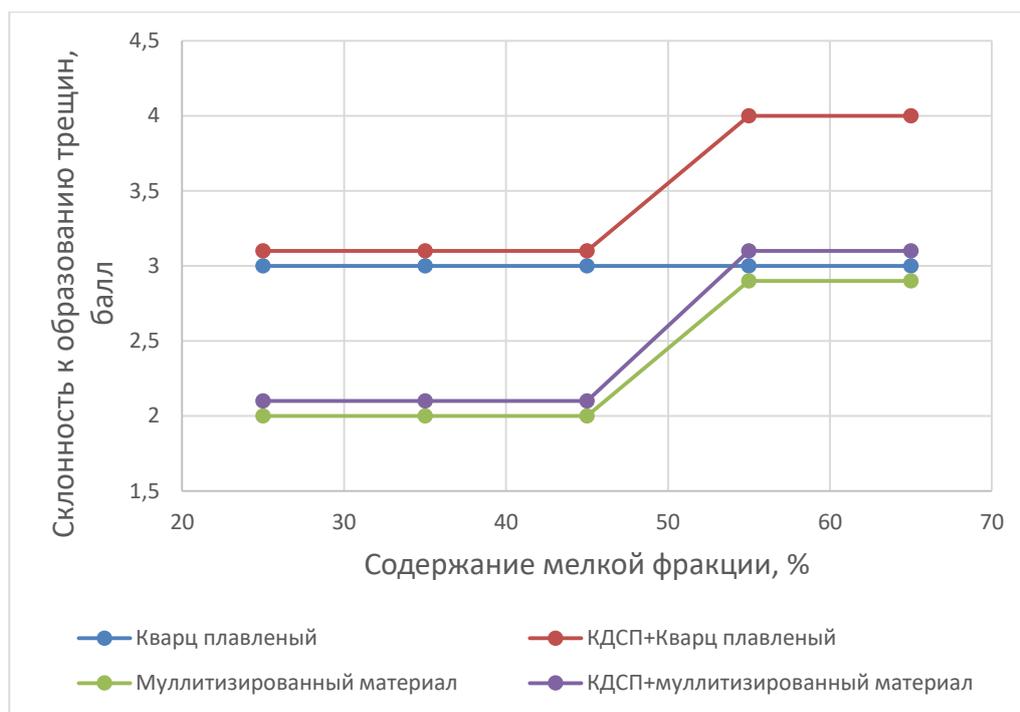


Рисунок 3.10 – Склонность литейной керамики к образованию трещин

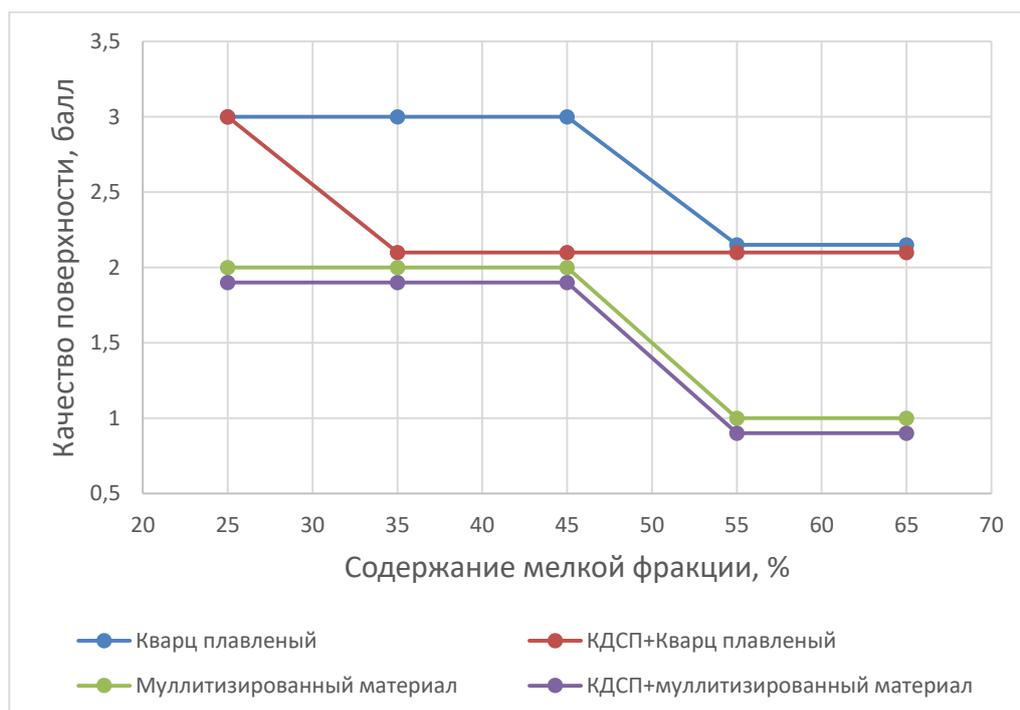


Рисунок 3.11 – Качество поверхности образцов

Наибольшая прочность в сыром состоянии  $20,5 \text{ Н/см}^2$  и в прокаленном состоянии  $34,5 \text{ Н/см}^2$  наблюдается на образцах, полученных на основе плавленного кварца, однако все они имеют низкое качество поверхности, что, вероятно, связано с полным отсутствием в мелкой фракции пылевидной составляющей.

На образцах с применением в качестве мелкой фракции КДСП и средней-крупной фракций плавленного кварца качество поверхности образцов улучшается, но снижается общий уровень прочности.

Наилучшее сочетание прочности, качества поверхности и минимальной склонности к образованию трещин наблюдается на образцах, изготовленных на основе трех фракции муллитизированного материала. В дальнейшем проведены его дополнительные исследования.

### **3.4 Количественный рентгенофазовый анализ муллитизированных материалов**

Результаты рентгенофазового анализа приведены на рисунке 3.12. Исследование проведено на оборудовании и по методике, приведенной в главе 2. Фазовый состав исследуемого огнеупорного наполнителя приведен в таблице 3.16, химический анализ приведен в таблице 3.17. Исследование проведено на смеси наполнителей. Снимки зерен отечественного формовочного муллитизированного материала ШК-42 представлены на рисунке 3.13.

Таблица 3.16 – Фракционный состав исследуемого наполнителя

Образец №14	Муллитизированный материал, мас. %		
	Мелкая фракция	Средняя фракция	Крупная фракция
	55	10	10

Таблица 3.17 – Химический состав формовочного муллитизированного материала ШК-42, мас. %

O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe	Cu	Total
58,92	0,06	0,12	19,07	19,82	0,05	0,04	0,50	0,06	0,42	0,56	0,39	100,00

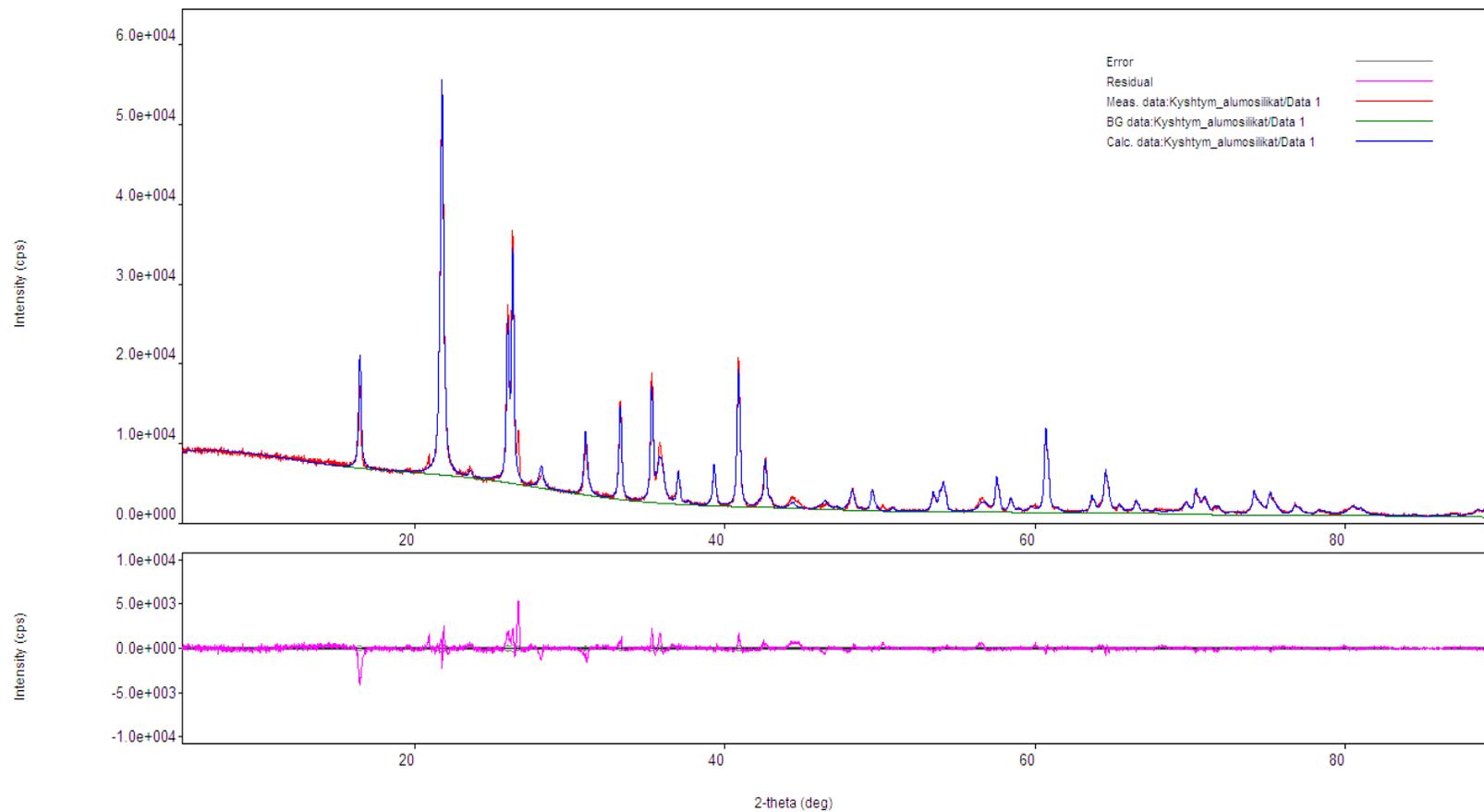


Рисунок 3.12 – Рентгенограмма образца отечественного формовочного муллитизированного материала ШК-42:  
зеленая линия – экспериментальная рентгенограмма образца; желтая линия – расчетная рентгенограмма;  
розовая линия – разность между ними

Фазовый состав образца, мас. %: муллит – 72, кристобалит высок. – 28.

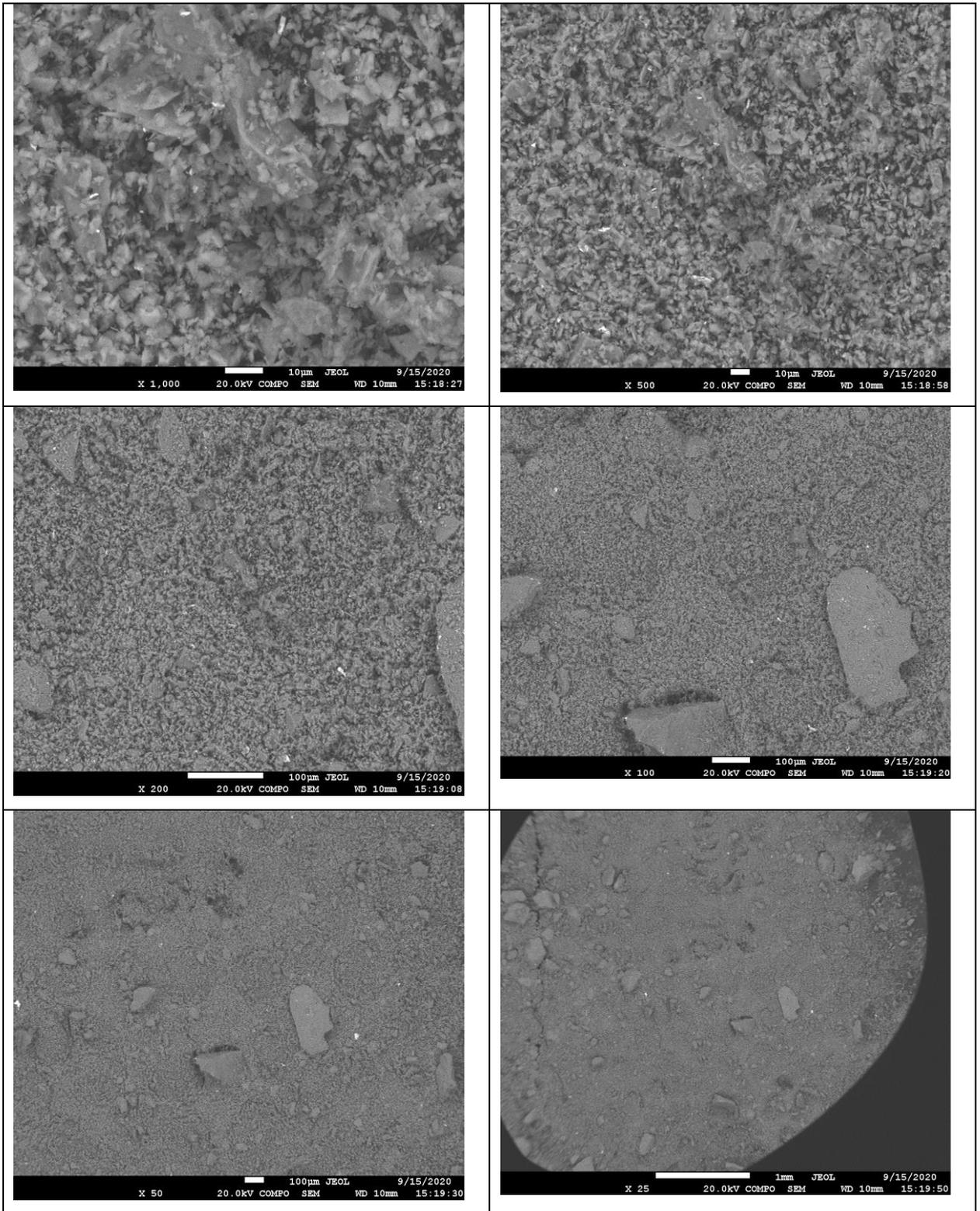


Рисунок 3.13 – Снимки зерен отечественного формовочного муллитизированного материала ШК-42

### 3.5 Влияние муллитизированных материалов на свойства суспензии и керамических стержней

На качество получаемого керамического стержня имеет непосредственное влияние качество керамической суспензии, которая должна обладать целым комплексом технологических свойств. Суспензия должна содержать качественное связующее, обеспечивающее надежное и равномерное скрепление зерен наполнителя. Количество и фракционный состав огнеупорного наполнителя по отношению к жидкому связующему должно быть рациональным. Совокупность всех этих факторов должна приводить к получению суспензии:

- имеющей высокую жидкотекучесть, необходимую для заполнения стержневого ящика сложной конфигурации;
- теряющей текучесть в определенный момент, что не позволит огнеупорному наполнителю осесть или привести к расслаиванию керамики;
- затвердевающей в определенный момент, что обеспечивает необходимый период упругого состояния стержня для проведения необходимых технологических операций;
- обеспечивающей получение керамических стержней с низкой склонностью к образованию трещин, высоким качеством поверхности, высокой прочностью в сыром и прокаленном состоянии.

Учитывая вышеизложенное, в качестве факторов варьирования для эксперимента выбираем количество жидкой фазы в составе суспензии (%), условное содержание  $\text{SiO}_2$  в гидролизованном растворе этилсиликата (%), количество мелкой фракции наполнителя огнеупорной суспензии (%) (таблица 3.18).

Для всех опытов оставшееся количество наполнителя делится в равных частях между мелкой и крупной фракциями.

Расчёт состава огнеупорного наполнителя по гранулометрическому составу на фракции приведен в таблицах 3.19 – 3.24. Распределение по фракциям для каждого образца показано на рисунках 3.14 – 3.19.

Таблица 3.18 – Опытные факторы варьирования при подстановке рецептур суспензий

Номер образца	Условное содержание SiO <sub>2</sub> , %	Количество жидкой фазы, мас. %	Количество мелкой фракции, мас. %
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Образец №1	16	20	52
Образец №2	16	30	46
Образец №3	16	20	28
Образец №4	16	30	24
Образец №5	20	20	52
Образец №6	20	30	46
Образец №7	20	20	28
Образец №8	20	30	24
Образец №9	24	24	52
Образец №10	24	24	46

Результаты испытаний представлены в таблице 3.25.

Таблица 3.19 – Фракционный состав наполнителя для образцов №1 и №5

Наполнитель	Количество	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
		1,60	1,00	0,63	0,40	0,32	0,20	0,16	0,10	0,06	Поддон
Муллитизированный наполнитель (0,0 – 0,063 мм)	0,520	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	50,000	50,000
Муллитизированный наполнитель (0,2 – 0,63 мм)	0,050	0,000	0,000	2,750	44,950	42,740	9,500	0,000	0,000	0,000	0,060
Муллитизированный наполнитель (0,5 – 1,25 мм)	0,230	0,120	14,500	47,260	37,680	0,440	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Всего	0,800	0,000	3,300	11,000	10,900	2,200	0,500	0,000	0,000	26,000	26,000
Распределение по фракциям		Крупная фракция			Средняя фракция			Мелкая фракция			
		14			14			52			

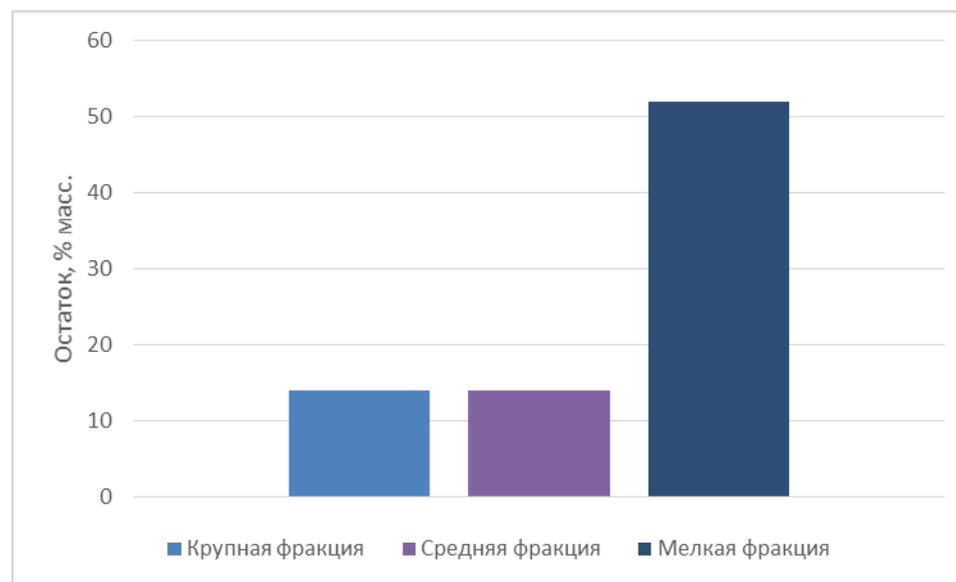


Рисунок 3.14 – Фракционный состав наполнителя для образцов №1 и №5

Таблица 3.20 – Фракционный состав наполнителя для образцов №2 и №6

Наполнитель	Количество	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
		1,60	1,00	0,63	0,40	0,32	0,20	0,16	0,10	0,06	Поддон
Мультифракционный наполнитель (0,0 – 0,063 мм)	0,460	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	50,000	50,000
Мультифракционный наполнитель (0,2 – 0,63 мм)	0,050	0,000	0,000	2,750	44,950	42,740	9,500	0,000	0,000	0,000	0,060
Мультифракционный наполнитель (0,5 – 1,25 мм)	0,190	0,120	14,500	47,260	37,680	0,440	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Всего	0,700	0,000	2,800	9,100	9,400	2,200	0,500	0,000	0,000	23,000	23,000
Распределение по фракциям		Крупная фракция			Средняя фракция			Мелкая фракция			
		12			12			46			

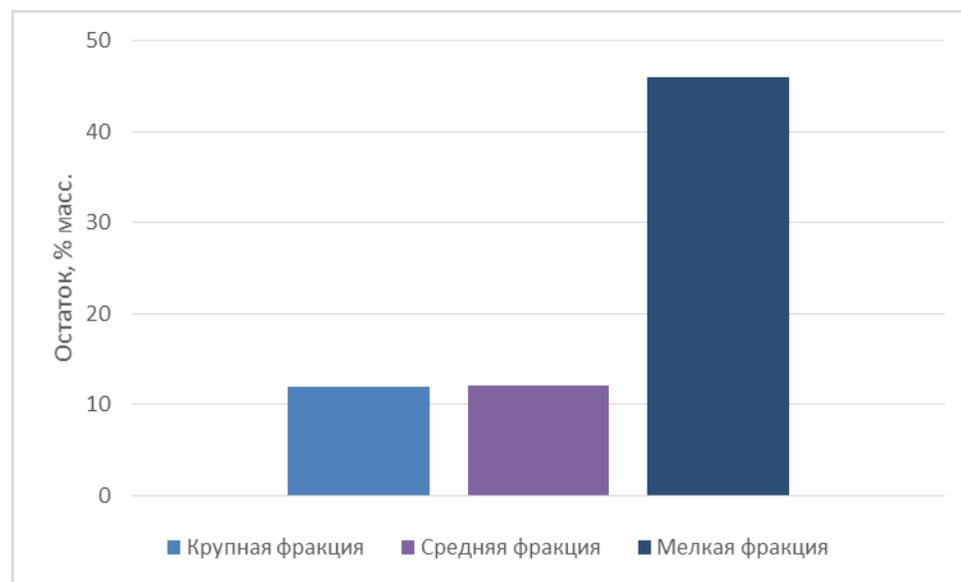


Рисунок 3.15 – Фракционный состав наполнителя для образцов №2 и №6

Таблица 3.21 – Фракционный состав наполнителя для образцов №3 и №7

Наполнитель	Количество	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
		1,60	1,00	0,63	0,40	0,32	0,20	0,16	0,10	0,06	Поддон
Муллитизированный наполнитель (0,0 – 0,063 мм)	0,280	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	50,000	50,000
Муллитизированный наполнитель (0,2 – 0,63 мм)	0,105	0,000	0,000	2,7500	44,950	42,740	9,500	0,000	0,000	0,000	0,060
Муллитизированный наполнитель (0,5 – 1,25 мм)	0,415	0,120	14,500	47,260	37,680	0,440	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Всего	0,800	0,000	6,000	19,900	20,300	4,600	1,000	0,000	0,000	14,000	14,000
Распределение по фракциям		Крупная фракция			Средняя фракция			Мелкая фракция			
		26			26			28			

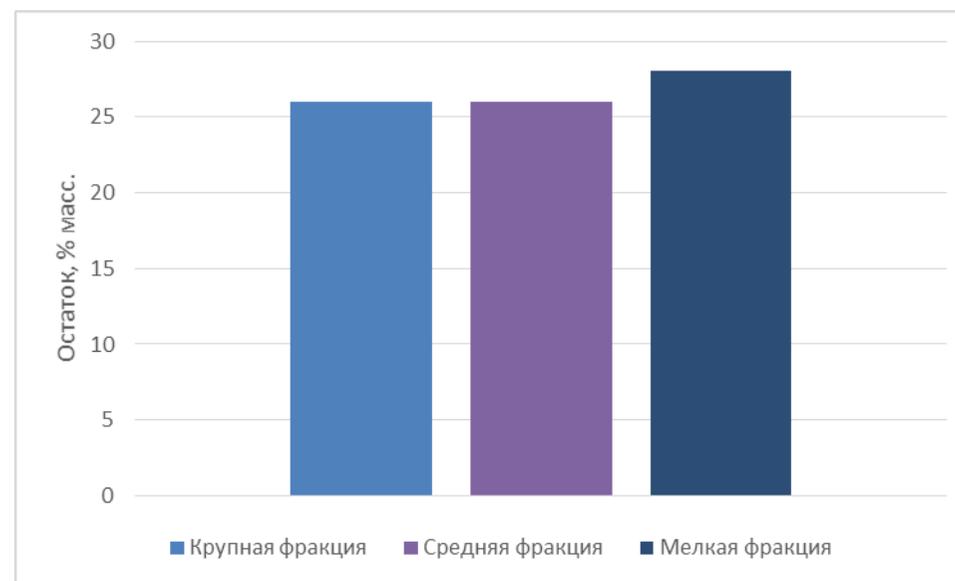


Рисунок 3.16 – Фракционный состав наполнителя для образцов №3 и №7

Таблица 3.22 – Фракционный состав наполнителя для образцов №4 и №8

Наполнитель	Количество	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
		1,60	1,00	0,63	0,40	0,32	0,20	0,16	0,10	0,06	Поддон
Муллитизированный наполнитель (0,0 – 0,063 мм)	0,240	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	50,000	50,000
Муллитизированный наполнитель (0,2 – 0,63 мм)	0,093	0,000	0,000	2,750	44,950	42,740	9,500	0,000	0,000	0,000	0,060
Муллитизированный наполнитель (0,5 – 1,25 мм)	0,367	0,120	14,500	47,260	37,680	0,440	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Всего	0,700	0,000	5,300	17,600	18,000	4,100	0,900	0,000	0,000	12,000	12,000
Распределение по фракциям		Крупная фракция			Средняя фракция			Мелкая фракция			
		23			23			24			

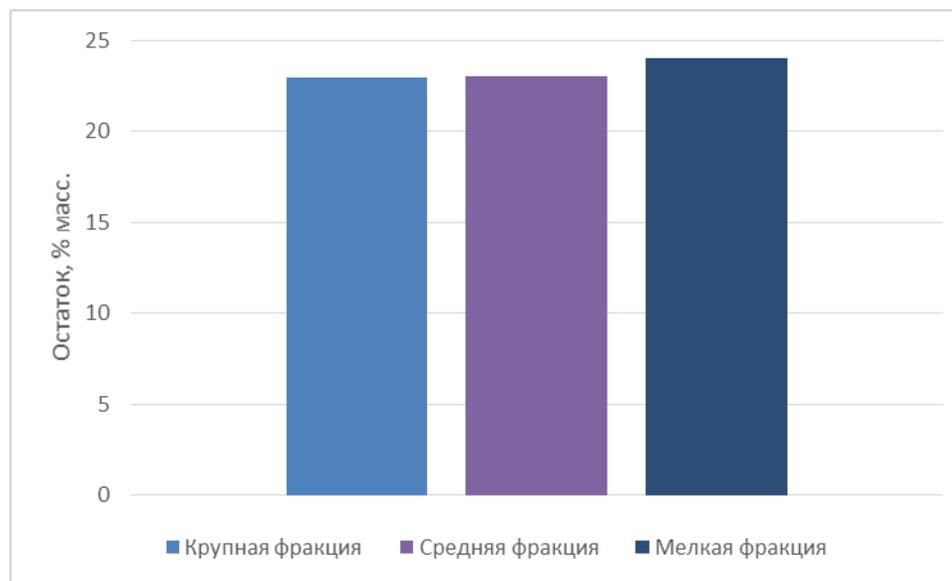


Рисунок 3.17 – Фракционный состав наполнителя для образцов №4 и №8

Таблица 3.23 – Фракционный состав наполнителя для образца №9

Наполнитель	Количество	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613, мм									
		1,60	1,00	0,63	0,40	0,32	0,20	0,16	0,10	0,06	Поддон
Муллитизированный наполнитель (0,0 – 0,063 мм)	0,520	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	50,000	50,000
Муллитизированный наполнитель (0,2 – 0,63 мм)	0,050	0,000	0,000	2,750	44,950	42,740	9,500	0,000	0,000	0,000	0,060
Муллитизированный наполнитель (0,5 – 1,25 мм)	0,190	0,120	14,500	47,260	37,680	0,440	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Всего	0,760	0,000	2,800	9,100	9,400	2,200	0,500	0,000	0,000	26,000	26,000
Распределение по фракциям		Крупная фракция			Средняя фракция			Мелкая фракция			
		12			12			52			

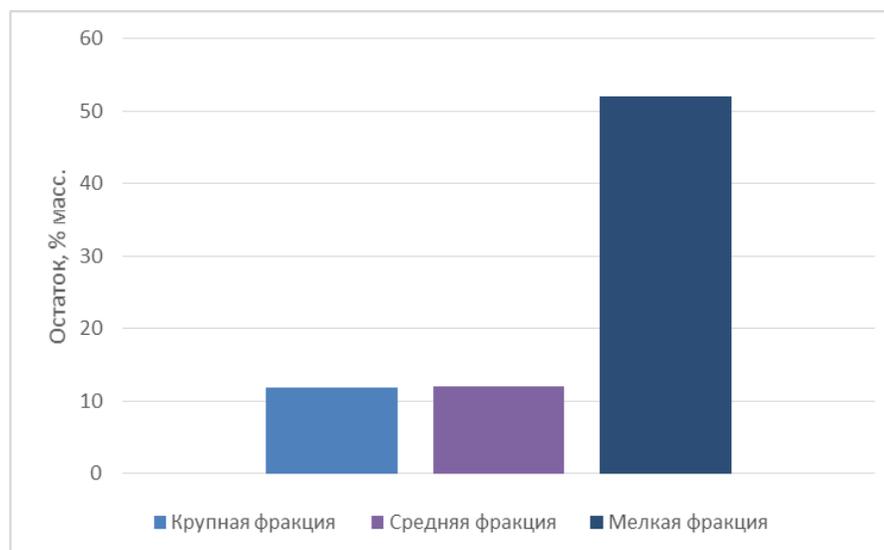


Рисунок 3.18 – Фракционный состав наполнителя для образца №9

Таблица 3.24 – Фракционный состав наполнителя для образца №10

Наполнитель	Количество	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
		1,60	1,00	0,63	0,40	0,32	0,20	0,16	0,10	0,06	Поддон
Мультифракционный наполнитель (0,0 – 0,063 мм)	0,460	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	50,000	50,000
Мультифракционный наполнитель (0,2 – 0,63 мм)	0,060	0,000	0,000	2,750	44,950	42,740	9,500	0,000	0,000	0,000	0,060
Мультифракционный наполнитель (0,5 – 1,25 мм)	0,240	0,120	14,500	47,260	37,680	0,440	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Всего	0,760	0,000	3,500	11,500	11,700	2,700	0,600	0,000	0,000	23,000	23,000
Распределение по фракциям		Крупная фракция			Средняя фракция			Мелкая фракция			
		15			15			46			

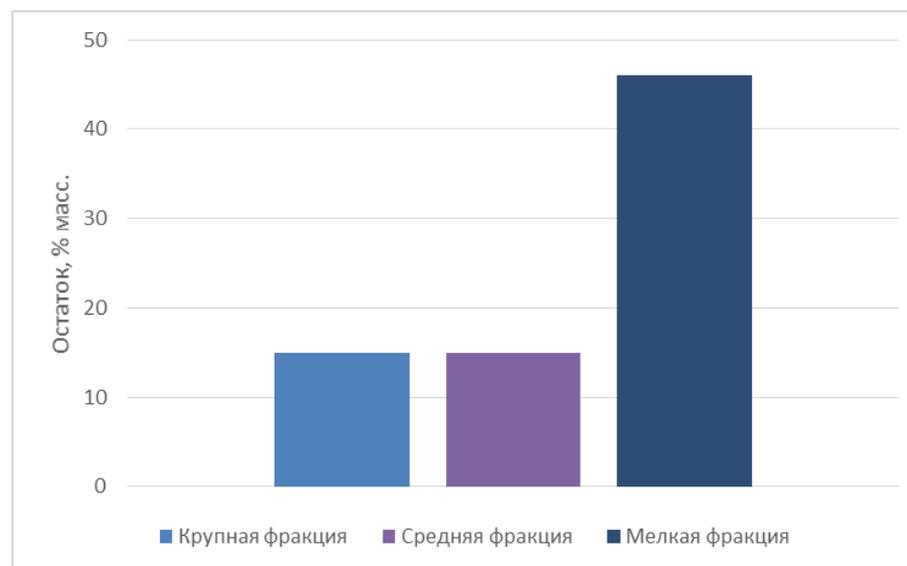


Рисунок 3.19 – Фракционный состав наполнителя для образца №10

Таблица 3.25 – Результаты испытаний

Номер образца	Предел прочности на разрыв в сыром состоянии, Н/см <sup>2</sup>	Предел прочности на разрыв после прокалки, Н/см <sup>2</sup>	Склонность керамики к образованию трещин, балл	Качество поверхности, балл	Жидкотекучесть суспензии по вискозиметру Суттарда, мм
Образец №1	11,4	15,1	4	1	220
Образец №2	4,1	6,1	5	1	240
Образец №3	7,5	14,1	4	3	210
Образец №4	3,6	3,9	5	3	220
Образец №5	15,7	22,5	4	1	210
Образец №6	11,0	13,9	4	1	220
Образец №7	9,3	16,0	4	2	200
Образец №8	4,1	4,8	4	2	200
Образец №9	21,9	31,6	3	1	190
Образец №10	15,7	30,0	3	1	190

### 3.6 Определение рационального состава суспензии с муллитизированными материалами

На основании полученных данных при помощи статистического анализа данных построили регрессионные зависимости. Приняли факторы:

$X_1$  – условное содержание  $\text{SiO}_2$ , %;

$X_2$  – количество жидкой фазы в керамической суспензии, %;

$X_3$  – количество мелкой фракции в керамической суспензии, %;

$Y_1$  – предел прочности керамических образцов на разрыв после прокалки, Н/см<sup>2</sup>;

$Y_2$  – склонность литейной керамики к образованию трещин, балл;

$Y_3$  – качество поверхности керамических образцов, балл;

$Y_4$  – жидкотекучесть суспензии по вискозиметру Суттарда, мм.

В таблицах 3.26 – 3.29 приведены расчеты регрессий.

Таблица 3.26 – Регрессионный анализ данных по пределу прочности керамических образцов на разрыв после прокалки, Н/см<sup>2</sup>

ВЫВОД ИТОГОВ								
<i>Регрессионная статистика</i>								
Множественный R	0,955							
R-квадрат	0,912							
Нормированный R-квадрат	0,868							
Стандартная ошибка	2,186							
Наблюдения	10							
Дисперсионный анализ								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>			
Регрессия	3	296,359	98,786	20,680	0,001			
Остаток	6	28,662	4,777					
Итого	9	325,021						
	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>
Y-пересечение	-9,078	6,416	-1,415	0,207	-24,777	6,621	-24,777	6,621
Переменная X 1	1,104	0,244	4,532	0,004	0,508	1,700	0,508	1,700
Переменная X 2	-0,424	0,158	-2,680	0,037	-0,810	-0,037	-0,810	-0,037
Переменная X 3	0,222	0,065	3,433	0,014	0,064	0,379	0,064	0,379

Анализ регрессионной зависимости по пределу прочности на разрыв после прокалки

Коэффициент корреляции  $R=0,955$ , множественный коэффициент детерминации  $R^2=0,912$ , что говорит о высокой адекватности полученного линейного уравнения и его можно использовать в технологических расчетах. Проверка значимости  $R$  осуществляется сравнением расчётного критерия Фишера  $F$  результатов дисперсионного анализа с табличным  $F_T$ .

Для  $\alpha = 0,05$  и числа степеней свободы  $k_1 = p - 1 = 3 - 1 = 2$  и  $k_2 = n - k_1 = 10 - 2 = 8$   $F_T(0,05;2;8) = 4,459$ . Поскольку  $F = 20,680 > 4,459$ , то коэффициент множественной корреляции  $R$  значим. Рассчитанный уровень значимости  $0,001 < 0,05$  также подтверждает значимость  $R^2$ .

Все коэффициенты регрессии  $B_0, B_1, B_2, B_3$  значимы, поскольку их абсолютные значения больше их стандартной ошибки. Кроме того, о значимости коэффициентов судят по значениям показателя «Р-значение», которые должны быть меньше заданного уровня значимости  $\alpha = 0,05$ . Данное условие не выполняется для свободного члена, что указывает на наличие одного или нескольких неучтенных в зависимости факторов.

Другой распространенный способ проверки значимости коэффициентов регрессии основан на проверке попадания показателя  $t$ -статистика в критическую область. Критерий Стьюдента вычисляется при помощи функции СТЬЮДРАСПОБР (0,05; 10-3-1), где 0,05 – заданный уровень значимости; 10 – количество наблюдений (измерений); 3 – количество переменных; 1 – количество свободных членов в уравнении регрессии.

В данном случае  $t_p(0,05; 6) = 2,446$ , критический интервал составит  $(-\infty; -2,446) \cup (+2,446; +\infty)$ . Данное условие не выполняется для свободного члена.

Уравнение регрессии зависимости предела прочности на разрыв после прокалки имеет следующий вид:

$$Y_1 = 1,104 \cdot X_1 - 0,424 \cdot X_2 + 0,222 \cdot X_3. \quad (3.5)$$

Согласно уравнению регрессии наибольшее влияние на предел прочности на разрыв оказывает условное содержание  $SiO_2$ , при его увеличении прочность увеличивается. Следующий по значимости фактор – количество жидкой фазы в керамической суспензии – оказывает обратное влияние, при увеличении жидкой фазы прочность снижается. Наименьшее влияние оказывает количество мелкой фракции наполнителя в составе керамической суспензии.

Таблица 3.27 – Регрессионный анализ данных по склонности литейной керамики к образованию трещин, балл

ВЫВОД ИТОГОВ									
<i>Регрессионная статистика</i>									
Множественный R	0,921								
R-квадрат	0,848								
Нормированный R-квадрат	0,772								
Стандартная ошибка	0,318								
Наблюдения	10								
Дисперсионный анализ									
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>				
Регрессия	3	3,392	1,131	11,148	0,007				
Остаток	6	0,608	0,101						
Итого	9	4,000							
	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>	
Y-пересечение	6,126	0,935	6,553	0,000604183	3,839	8,413	3,839	8,413	
Переменная X 1	-0,170	0,035	-4,795	0,003016025	-0,257	-0,083	-0,257	-0,083	
Переменная X 2	0,050	0,023	2,170	0,073097013	-0,006	0,106	-0,006	0,106	
Переменная X 3	-0,002	0,009	-0,262	0,802430433	-0,025	0,021	-0,025	0,021	

Анализ регрессионной зависимости по склонности литейной керамики к образованию трещин

Коэффициент корреляции  $R=0,921$ , множественный коэффициент детерминации  $R^2=0,848$ , что говорит о высокой адекватности полученного линейного уравнения и его можно использовать в технологических расчетах. Проверка значимости  $R$  осуществляется сравнением расчётного критерия Фишера  $F$  результатов дисперсионного анализа с табличным  $F_T$ .

Для  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $k_1 = p - 1 = 3 - 1 = 2$  и  $k_2 = n - k_1 = 10 - 2 = 8$   $F_T(0,05;2;8) = 4,459$ . Поскольку  $F = 11,148 > 4,459$ , то коэффициент множественной корреляции  $R$  значим.

Рассчитанный уровень значимости  $0,007 < 0,05$  также подтверждает значимость  $R^2$ .

Все коэффициенты регрессии кроме  $B_3$  значимы, поскольку их абсолютные значения больше их стандартной ошибки.

Кроме того о значимости коэффициентов судят по значениям показателя «Р-Значение», которые должны быть меньше заданного уровня значимости  $\alpha = 0,05$ . Данное условие не выполняется для коэффициента  $B_2$ .

Проверка коэффициентов по показателю t-статистика. Критерий Стьюдента вычисляется при помощи функции СТЬЮДРАСПОБР (0,05; 10-3-1)

В данном случае  $t_p(0,05; 6) = 2,446$ , критический интервал составит  $(-\infty; -2,446) \cup (+2,446; +\infty)$ . Данное условие не выполняется для коэффициентов  $B_2$  и  $B_3$ .

Уравнение регрессии зависимости склонности керамики к образованию трещин имеет следующий вид:

$$Y_2 = 6,126 - 0,170 \cdot X_1. \quad (3.6)$$

Согласно уравнения регрессии на склонность керамики к образованию трещин оказывает влияние только один фактор из исследуемых, а именно условное содержание  $SiO_2$  в этилсиликатном связующем. С увеличением этого фактора склонность литейной керамики к образованию трещин снижается.

Таблица 3.28 – Регрессионный анализ данных по качеству поверхности, балл

ВЫВОД ИТОГОВ									
<i>Регрессионная статистика</i>									
Множественный R	0,931								
R-квадрат	0,867								
Нормированный R-квадрат	0,801								
Стандартная ошибка	0,376								
Наблюдения	10								
<i>Дисперсионный анализ</i>									
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>				
Регрессия	3	5,551	1,850	13,077	0,005				
Остаток	6	0,849	0,141						
Итого	9	6,400							
	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>	
Y-пересечение	5,830	1,104	5,279	0,002	3,128	8,532	3,128	8,532	
Переменная X 1	-0,054	0,042	-1,295	0,243	-0,157	0,048	-0,157	0,048	
Переменная X 2	-0,032	0,027	-1,175	0,285	-0,099	0,035	-0,099	0,035	
Переменная X 3	-0,070	0,011	-5,416	0,002	-0,087	-0,033	-0,087	-0,033	

### Анализ регрессионной зависимости по качеству поверхности

Коэффициент корреляции  $R=0,931$ , множественный коэффициент детерминации  $R^2=0,867$ ; что говорит о высокой адекватности полученного линейного уравнения и его можно использовать в технологических расчетах. Проверка значимости  $R$  осуществляется сравнением расчётного критерия Фишера  $F$  результатов дисперсионного анализа с табличным  $F_t$ .

Для  $\alpha = 0,05$  и числа степеней свободы  $k_1 = p - 1 = 3 - 1 = 2$  и  $k_2 = n - k_1 = 10 - 2 = 8$   $F_t(0,05;2;8) = 4,459$ . Поскольку  $F = 13,077 > 4,459$ , то коэффициент множественной корреляции  $R$  значим.

Рассчитанный уровень значимости  $0,005 < 0,05$  также подтверждает значимость  $R^2$ .

При сравнении абсолютных значений коэффициентов с их стандартной ошибкой все коэффициенты значимы.

Однако при сравнении значений показателя «Р-значение», которые должны быть меньше заданного уровня значимости  $\alpha = 0,05$ , коэффициенты  $B_1$  и  $B_2$  не соответствуют этому критерию.

Проверка коэффициентов по показателю t-статистика. Критерий Стьюдента вычисляется при помощи функции СТЬЮДРАСПОБР (0,05; 10-3-1).

В данном случае  $t_p(0,05; 6) = 2,446$ , критический интервал составляет  $(-\infty; -2,446) \cup (+2,446; +\infty)$ . Данное условие не выполняется для коэффициентов  $B_1$  и  $B_2$ .

Уравнение регрессии зависимости качества поверхности имеет следующий вид:

$$Y_3 = 5,830 - 0,070 \cdot X_3. \quad (3.7)$$

Согласно уравнению регрессии, на качество поверхности керамики оказывает влияние только один фактор из исследуемых, а именно количество мелкой фракции в наполнителе керамической суспензии. С увеличением этого фактора качество поверхности керамических образцов улучшается.

Таблица 3.29 – Регрессионный анализ данных жидкотекучести суспензии по вискозиметру Сутгарда, мм

ВЫВОД ИТОГОВ								
<i>Регрессионная статистика</i>								
Множественный R	0,963							
R-квадрат	0,928							
Нормированный R-квадрат	0,891							
Стандартная ошибка	5,151							
Наблюдения	10							
<i>Дисперсионный анализ</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>			
Регрессия	3	2040,805	680,268	25,639	0,001			
Остаток	6	159,195	26,533					
Итого	9	2200,000						
	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>
Y-пересечение	242,389	15,121	16,030	0,000004	205,390	279,388	205,390	279,388
Переменная X 1	-4,597	0,574	-8,008	0,000202	-6,002	-3,193	-6,002	-3,193
Переменная X 2	1,315	0,373	3,529	0,012379	0,403	2,227	0,403	2,227
Переменная X 3	0,585	0,152	3,844	0,008518	0,213	0,957	0,213	0,957

Анализ регрессионной зависимости жидкотекучести суспензии по вискозиметру Сутгарда

Коэффициент корреляции  $R=0,963$ , множественный коэффициент детерминации  $R^2=0,928$ , что говорит о высокой адекватности полученного линейного уравнения и его можно использовать в технологических расчетах. Проверка значимости  $R$  осуществляется сравнением расчётного критерия Фишера  $F$  результатов дисперсионного анализа с табличным  $F_T$ .

Для  $\alpha = 0,05$  и числа степеней свободы  $k_1 = p - 1 = 3 - 1 = 2$  и  $k_2 = n - k_1 = 10 - 2 = 8$   $F_T(0,05;2;8) = 4,459$ . Поскольку  $F = 25,639 > 4,459$ , то коэффициент множественной корреляции  $R$  значим.

Рассчитанный уровень значимости  $0,001 < 0,05$  также подтверждает значимость  $R^2$ .

Все коэффициенты регрессии  $B_0, B_1, B_2, B_3$  значимы, поскольку их абсолютные значения больше их стандартной ошибки.

Кроме того, о значимости коэффициентов судят по значениям показателя «Р-значение», которые должны быть меньше заданного уровня значимости  $\alpha = 0,05$ . Данное условие выполняется для всех коэффициентов.

Другой распространенный способ проверки значимости коэффициентов регрессии основан на проверке попадания показателя  $t$ -статистика в критическую область. Критерий Стьюдента вычисляется при помощи функции СТЬЮДРАСПОБР  $(0,05; 10-3-1)$ , где  $0,05$  – заданный уровень значимости;  $10$  – количество наблюдений (измерений);  $3$  – количество переменных;  $1$  – количество свободных членов в уравнении регрессии.

В данном случае  $t_p(0,05; 6) = 2,446$ , критический интервал составляет  $(-\infty; -2,446) \cup (+2,446; +\infty)$ . Данное условие также выполняется для всех коэффициентов.

Уравнение регрессии зависимости жидкотекучести по вискозиметру Сутгарда имеет следующий вид:

$$Y_4 = 242,389 - 4,597 \cdot X_1 + 1,315 \cdot X_2 + 0,585 \cdot X_3. \quad (3.8)$$

Согласно уравнению регрессии наибольшее влияние на жидкотекучесть оказывает условное содержание  $SiO_2$ , при его увеличении жидкотекучесть суспензии снижается. Следующий по значимости фактор – количество жидкой

фазы в керамической суспензии – оказывает прямое влияние, при увеличении жидкой фазы жидкотекучесть увеличивается. Наименьшее влияние оказывает количество мелкой фракции наполнителя в составе керамической суспензии.

В результате анализа экспериментальных данных получена система из четырех уравнений:

$$\begin{cases} Y_1 = 1,104 \cdot X_1 - 0,424 \cdot X_2 + 0,222 \cdot X_3; \\ Y_2 = 6,126 - 0,170 \cdot X_1; \\ Y_3 = 5,830 - 0,070 \cdot X_3; \\ Y_4 = 242,389 - 4,597 \cdot X_1 + 1,315 \cdot X_2 + 0,585 \cdot X_3. \end{cases} \quad (3.9)$$

При помощи данной системы можно найти переменные параметры, задавая необходимые значения целевых функций.

Для трех уравнений зададим желаемые показатели и определим искомые неизвестные:

$$\begin{aligned} 2 &= 6,126 - 0,170 \cdot X_1; \\ 2 &= 5,830 - 0,070 \cdot X_3; \\ 200 &= 242,389 - 4,597 \cdot X_1 + 1,315 \cdot X_2 + 0,585 \cdot X_3. \end{aligned}$$

Решая систему уравнений, получили:

$$\begin{aligned} X_1 &= 24,270; \\ X_2 &= 27,641; \\ X_3 &= 54,715. \end{aligned}$$

При помощи найденных переменных определили прочность керамики на разрыв в прокаленном состоянии:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 1,104 \cdot X_1 - 0,424 \cdot X_2 + 0,222 \cdot X_3; \\ Y_1 &= 1,104 \cdot 24,270 - 0,424 \cdot 27,641 + 0,222 \cdot 54,715; \\ Y_1 &= 27,221. \end{aligned}$$

По данным исследований условное содержание  $\text{SiO}_2$  в ГРЭТС должно находиться в пределах от 24 до 25 %. Уменьшение этого показателя ведет к повышению склонности керамики к образованию трещин ( $Y_2$ ), повышение снижает жидкотекучесть суспензии ( $Y_4$ ).

Количество жидкой фазы в керамической суспензии должно находиться в пределах от 24 до 28 %. Уменьшение этого показателя ведет к снижению жидкотекучести ( $Y_4$ ), однако повышает прочность ( $Y_1$ ).

Количество мелкой фракции в керамической суспензии должно находиться в интервале от 52 до 55 %. Уменьшение этого показателя снижает жидкотекучесть суспензии ( $Y_4$ ) и прочность керамических образцов ( $Y_1$ ).

Значение предела прочности керамических образцов при найденных пределах составит:

$$Y_1=25,231 - 27,938 \text{ Н/см}^2.$$

### **3.7 Влияние пеногасителя на свойства суспензий и керамических стержней**

В процессе изготовления керамической суспензии наблюдается нежелательный эффект – бурное образование пены. Этот процесс приводит к выделению на поверхности керамического стержня сыпи в виде схлопнувшихся пузырьков, а это, в свою очередь, приводит к ухудшению качества поверхности получаемых отливок.

Пены – это высококонцентрированные гетерогенные системы, в которых дисперсная фаза состоит из пузырьков газа, а дисперсионная среда образует тонкие пленки между пузырьками газа. Такая структура пен сближает их с высококонцентрированными эмульсиями. Однако, несмотря на сходство структуры, устойчивость пен значительно ниже, чем эмульсий [80].

Пенообразование является нежелательным в производственных процессах. В таких случаях применяют способы пеногашения, в основе которых лежит разрушение адсорбционных слоев, стабилизирующих пену. В качестве пеногасителей используют вещества с высокой поверхностной активностью. Существуют также механические, термические, ультразвуковые и другие способы пеногашения.

При изготовлении мелких стержней (масса до 10 кг) для устранения этого эффекта возможно применение вакуумирования, которое производится после введения гелеобразователя, но в случае увеличения габаритов и массы производимых стержней применение вакуумирования становится невозможным. Для эффективного удаления всех пузырьков время вакуумирования требуется увеличить до 2 – 2,5 минут, за это время суспензия

переходит в вязкое состояние и не может качественно заполнять полость стержневого ящика.

Для производства крупных керамических стержней массой более 10 кг принято решение применять введение пеногасителя.

Пеногасители – это химические добавки, используемые в различных отраслях промышленности для устранения пены. Их можно разделить на две категории – органические (масла) и силиконовые (полимеры), причем каждый тип имеет свои преимущества и недостатки. Масла и полимеры имеют разные физико-химические свойства, что означает, что они по-разному реагируют при добавлении в продукты или растворы, подверженные пенообразованию.

Пеногасители работают через различные механизмы в зависимости от их ингредиентов и природы поверхностного натяжения на границе раздела между жидкостью и газом.

Однако все типы значительно снижают поверхностное натяжение, чтобы предотвратить образование воздушных карманов, создающих пену. Они также содержат гидрофобные или липофильные компоненты, которые защищают от вспенивания, когда они диспергированы в воде или других растворах.

Пеногасители смачивают все доступные поверхности как можно быстрее, одновременно уменьшая места зарождения пузырьков. Этот процесс предотвращает образование пузырьков, поскольку снижает поверхностное натяжение между воздухом и жидкостью, тем самым удаляя устойчивые воздушные карманы, которые инициируют образование пены. Как только это достигнуто, процесс значительно уменьшает образование пены со временем, предотвращая дальнейший рост пузырьков.

Стоит заметить, что органические гасители срабатывают значительно медленнее, а срок действия довольно мал. Этому лишены составы на силиконовой основе. Плёнка на силиконовой основе более плотная, это позволяет сделать гашение более быстрым и довольно долго препятствовать возникновению нового пенообразования. По данным источника [81] пеногасители применяются в составе смесей для изготовления керамических оболочек в художественном литье. Также в некоторых источниках упоминается применение ПАВ, пеногасителей и других добавок в

керамические суспензии для улучшения их технологических характеристик [82].

Для опытов был выбран силиконовый пеногаситель марки «Пента-462 А». Свойства материала приведены в главе 2.

Исследование подтверждает нейтральную рН-среду пеногасителя «Пента-462 А», кислотность связующего раствора гидролизованного этилсиликата не изменяется. Проведен опыт, основанный на найденном ранее рациональном составе керамической суспензии и максимально рекомендованном количестве пеногасителя 1 % от объема керамической суспензии. Сначала необходимо было определить наиболее целесообразный момент введения пеногасителя. Рассмотрены три варианта:

- введение в пеногасителя непосредственно в гидролизованный раствор этилсиликата до введения огнеупорного наполнителя;
- введение пеногасителя в суспензию после огнеупорного наполнителя до введения гелеобразователя;
- введение пеногасителя в суспензию после гелеобразователя.

Результаты опыта показывают, что при введении пеногасителя непосредственно в гидролизованный раствор этилсиликата при перемешивании образуется равномерно распределенная взвесь частиц пеногасителя (таблица 3.20). В течение 5 мин происходит постепенное расслоение связующего и пеногасителя и он поднимается на поверхность.



Рисунок 3.20 – Смесь гидролизованного раствора этилсиликата и пеногасителя:

а – сразу после смешивания; б – через 5 минут после смешивания

Опытные рецепты керамической смеси представлены в таблице 3.30, а результаты испытаний – в таблице 3.31.

Таблица 3.30 – Опытные рецепты керамической смеси

Номер образца	Условное содержание SiO <sub>2</sub> , %	Количество жидкой фазы, мас. %	Количество мелкой фракции, мас. %	Момент введения
Образец №1	24	24	54	1
Образец №2	24	24	54	2
Образец №3	24	24	54	3

Таблица 3.31 – Результаты испытаний

Номер образца	Эффективность подавления образования пены	Предел прочности на разрыв после прокалки, Н/см <sup>2</sup>	Жидкотекучесть по вискозиметру Сутгарда, мм
Образец №1	Высокая	27,3	203
Образец №2	Высокая	26,9	205
Образец №3	Высокая	27,1	201

Поскольку результаты, полученные во всех трех опытах, практически идентичны, то можно сделать вывод о том, что момент введения пеногасителя не оказывает на них влияния. С технологической точки зрения самым удобным моментом является ввод пеногасителя после огнеупорного наполнителя и до добавления гелеобразователя (вариант №2).

Для определения необходимого количества пеногасителя и возможности его разбавления водой изготовили образцы по рецептуре предыдущего опыта с различным количеством пеногасителя (таблица 3.32). Результаты испытаний представлены в таблице 3.33.

Таблица 3.32 – Опытные рецепты керамической смеси с различным количеством пеногасителя

Номер образца	Условное содержание SiO <sub>2</sub> , %	Количество жидкой фазы, мас. %	Количество мелкой фракции, мас. %	Количество пеногасителя, % от массы суспензии	Разбавление водой
Образец №1	24	24	54	0,0	Нет
Образец №2	24	24	54	0,5	Нет
Образец №3	24	24	54	0,5	50 %
Образец №4	24	24	54	1,0	Нет
Образец №5	24	24	54	1,0	50 %

Таблица 3.33 – Результаты испытаний

Номер образца	Эффективность подавления образования пены	Предел прочности на разрыв после прокалки, Н/см <sup>2</sup>	Жидкотекучесть по вискозиметру Сутгарда, мм
Образец №1	Нет	27,2	205
Образец №2	Средняя	27,3	200
Образец №3	Средняя	26,9	210
Образец №4	Высокая	27,8	205
Образец №5	Высокая	27,5	210

При введении пеногасителя не наблюдается существенного изменения прочности керамических образцов на разрыв или жидкотекучести смеси по вискозиметру Сутгарда. Введение пеногасителя в количестве 0,8 – 1 % обеспечивает эффективное подавление пенообразования в смеси. Необходимый эффект достигается примерно через 10 с после перемешивания.

На рисунке 3.21 показан вид керамической смеси с различным количеством пеногасителя.

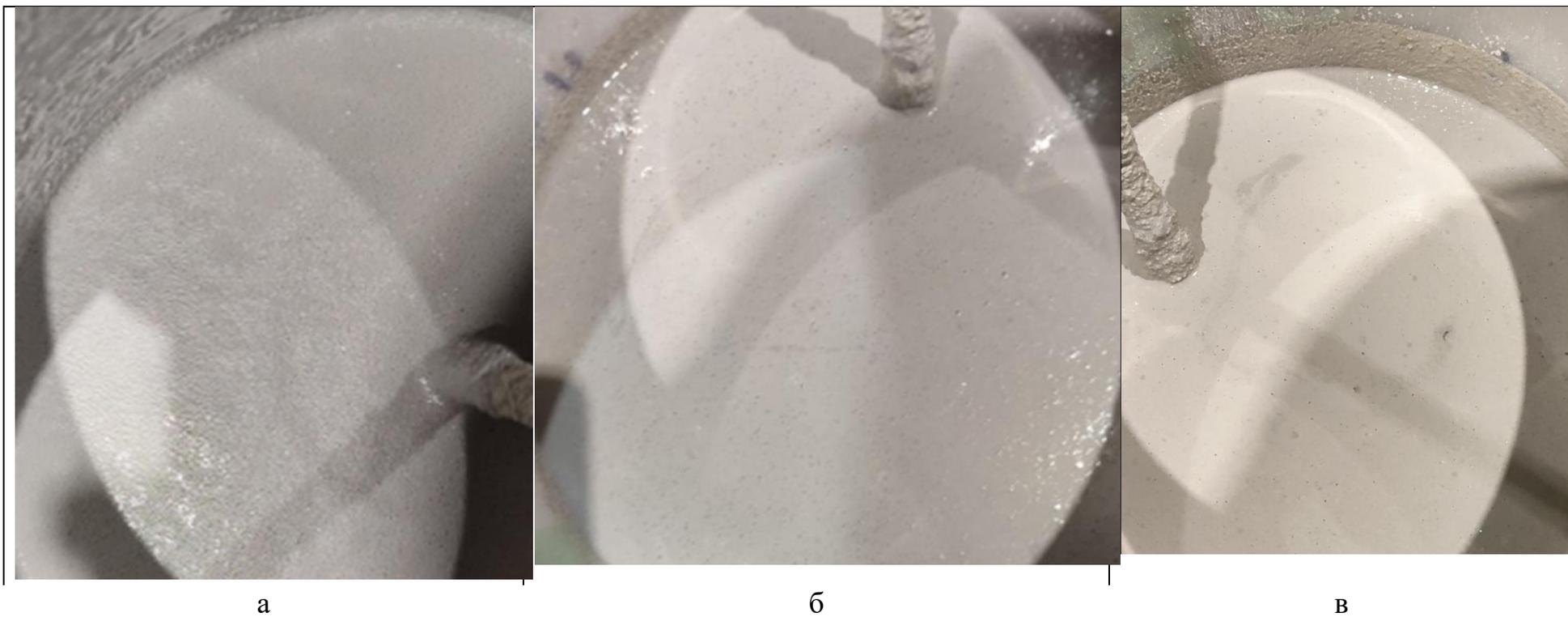


Рисунок 3.21 – Вспенивание керамической суспензии: а – без пеногасителя; б – с добавлением 0,5 % пеногасителя; в – с добавлением 1 % пеногасителя

### 3.7.1 Микроструктура керамических стержней, изготовленных по рациональному составу с пеногасителем

Вместе со стержнем изготовили стандартные образцы для испытания стержневой смеси на разрыв, один из образцов исследован при помощи растровой микроскопии. Характеристики оборудования приведены в главе 2.

Изучение образца показало, что отсутствуют крупные трещины, на поверхности образца наблюдалась сетка мелких трещин, которые не снижают прочность, но существенно повышают газопроницаемость стержней. Преобладающий размер трещин – 30 мкм, преобладающий размер пор – 2 мкм. Расположение трещин и распределение пор равномерное.

На рисунке 3.22 приведены изображения образца керамического с различным разрешением и указанием размеров зерен и пор.

В таблице 3.34 приведены результаты спектрального анализа для трех различных точек на образце.

Таблица 3.34 – Результаты спектрального анализа, мас. %

Спектр	O	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Итого
Спектр 1	40,09	14,68	42,66	0,65	0,64	–	1,27	100,00
Спектр 2	46,39	17,12	35,16	0,70	–	0,62	–	100,00
Спектр 3	49,74	16,44	32,36	0,58	–	–	0,88	100,00

На рисунке 3.23 приведены результаты спектрального анализа исследованного образца в трех различных точках. На рисунке 3.24 приведено цветовое распределение по различным элементам. На фотографии можно видеть включения железа (голубым цветом).

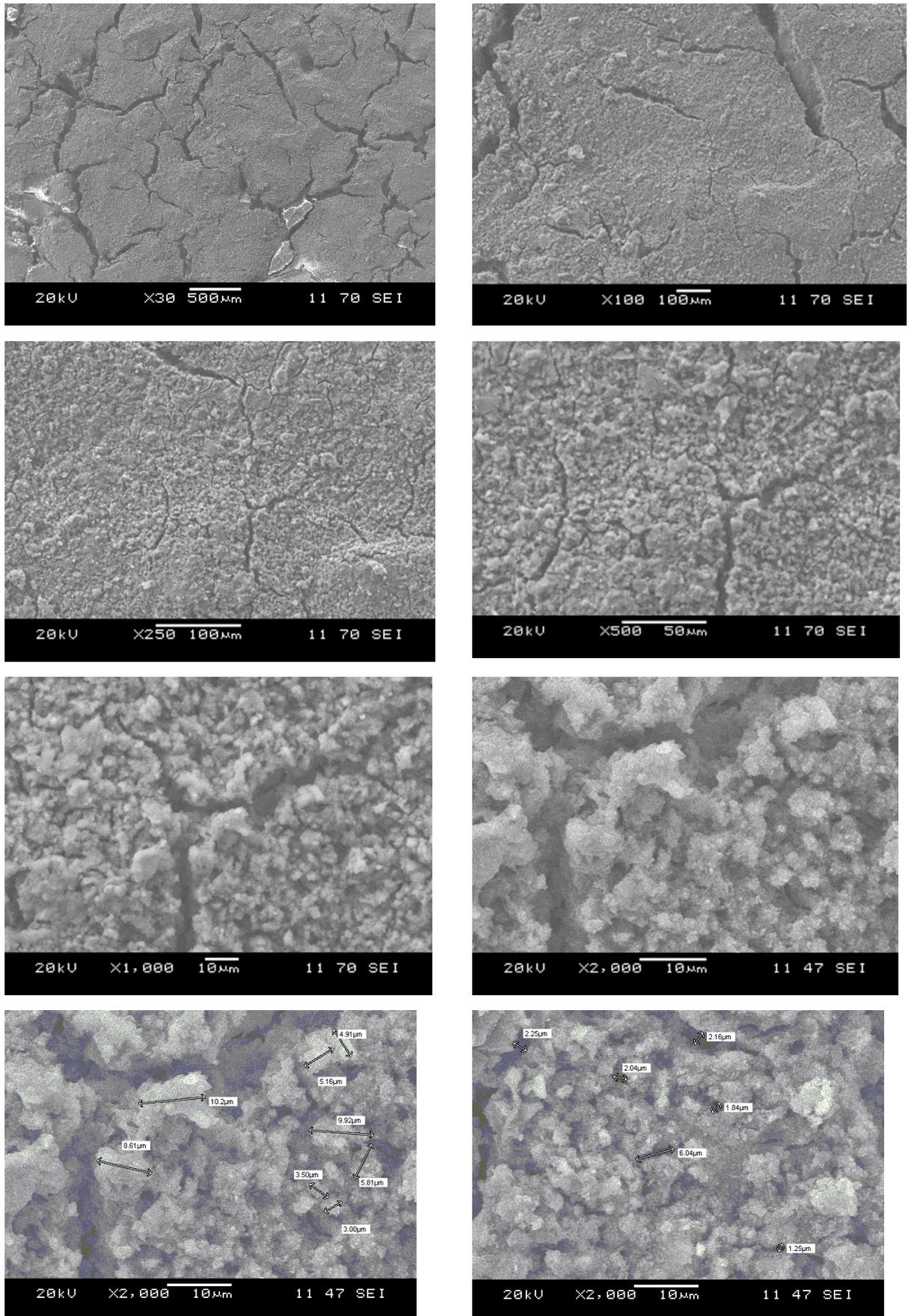


Рисунок 3.22 – Изображение образца керамического с различным разрешением

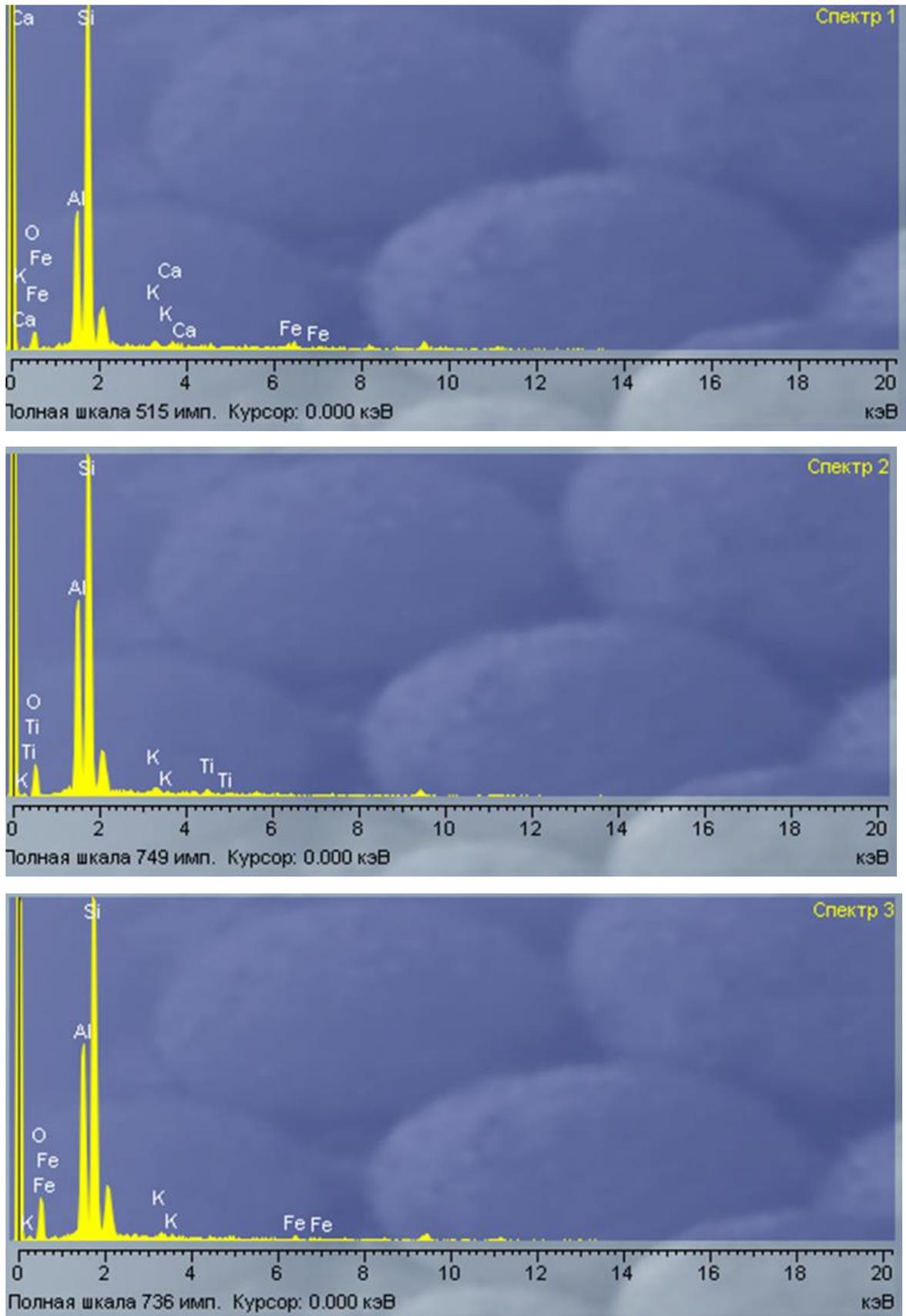


Рисунок 3.23 – Спектры

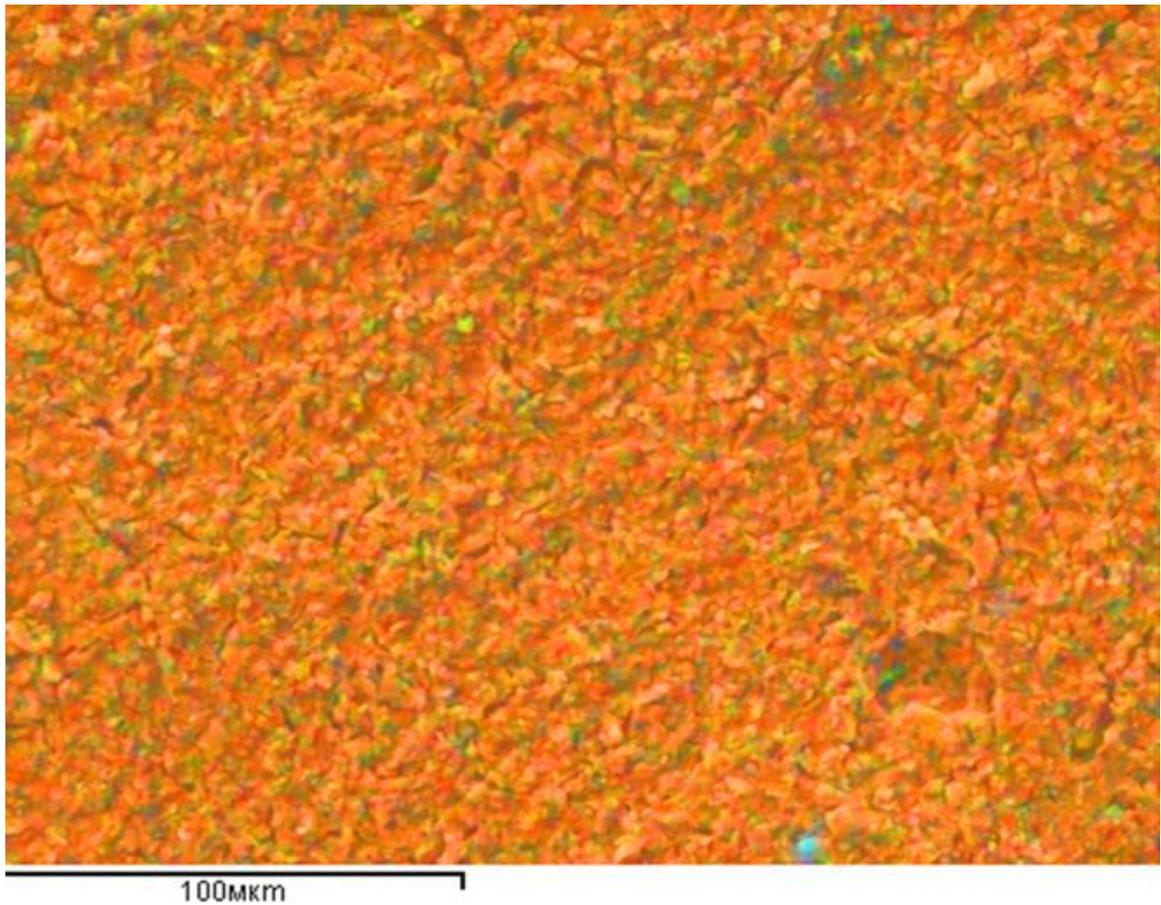


Рисунок 3.24 – Спектр распределения химических элементов на образце

### 3.7.2 Рентгенофазовый анализ керамических стержней

Результаты рентгенофазового анализа приведены на рисунке 3.25. На дифрактограмме можно выделить рефлексы, относящиеся к трем основным фазам: муллит, кристобалит и кварц. Силлиманит содержится в количестве около 1 мас. %. Их количество было определено полнопрофильным анализом с помощью программного обеспечения Rigaku PDXL (таблица 3.35). Описание оборудования приведено в главе 2.

Таблица 3.35 – Фазовый состав образца «гантели», мас. %

Фаза	Формула	Мас. %
Муллит	$\text{Al}(\text{Al}_{1,272}\text{Si}_{0,728}\text{O}_{4,864})$	71,8 (5)
Кристобалит (низкотемп.)	$\text{SiO}_2$	20,9 (3)
Кварц	$\text{SiO}_2$	6,1 (5)
Силлиманит	$\text{Al}_2\text{SiO}_5$	1,2 (2)

Примечание. В скобках указана погрешность последних цифр.

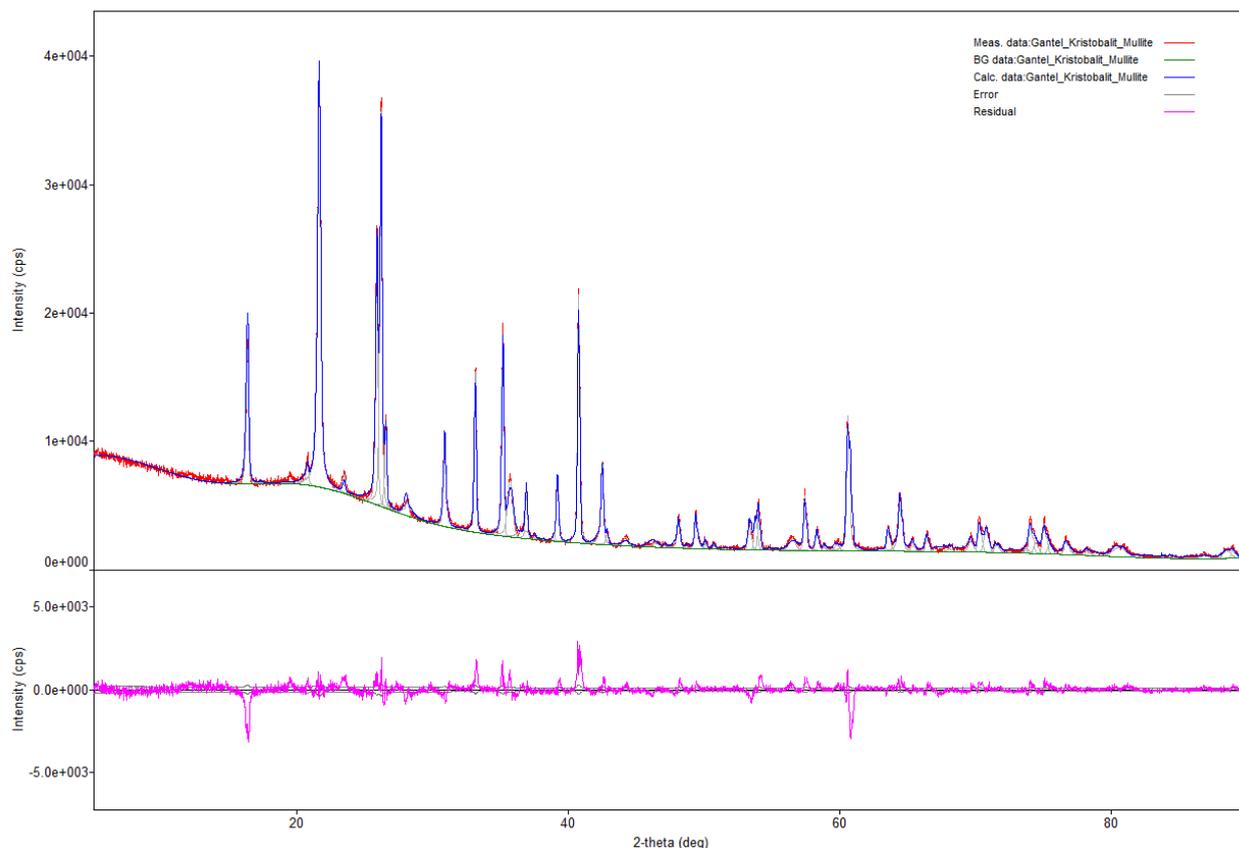


Рисунок 3.25 – Дифрактограмма керамического образца:  
 зеленая линия – экспериментальная рентгенограмма образца; желтая линия –  
 расчетная рентгенограмма; розовая линия – разность между ними

### 3.7.3 Дериватография и дилатометрия керамических стержней

Результаты дилатометрии и дериватографии керамических образцов с отечественным муллитсодержащим наполнителем приведены на рисунках 3.26 и 3.27 соответственно. Их анализ показывает высокую точность литейной керамики ( $КТЛР - 5,1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ), а также возможность проведения операции проковки при температуре 800 – 850 °С, что обеспечивает снижение энергоемкости точного стального литья.

Дилатометрия и дериватография исследуемых материалов проведены на оборудовании, описанном в главе 2.

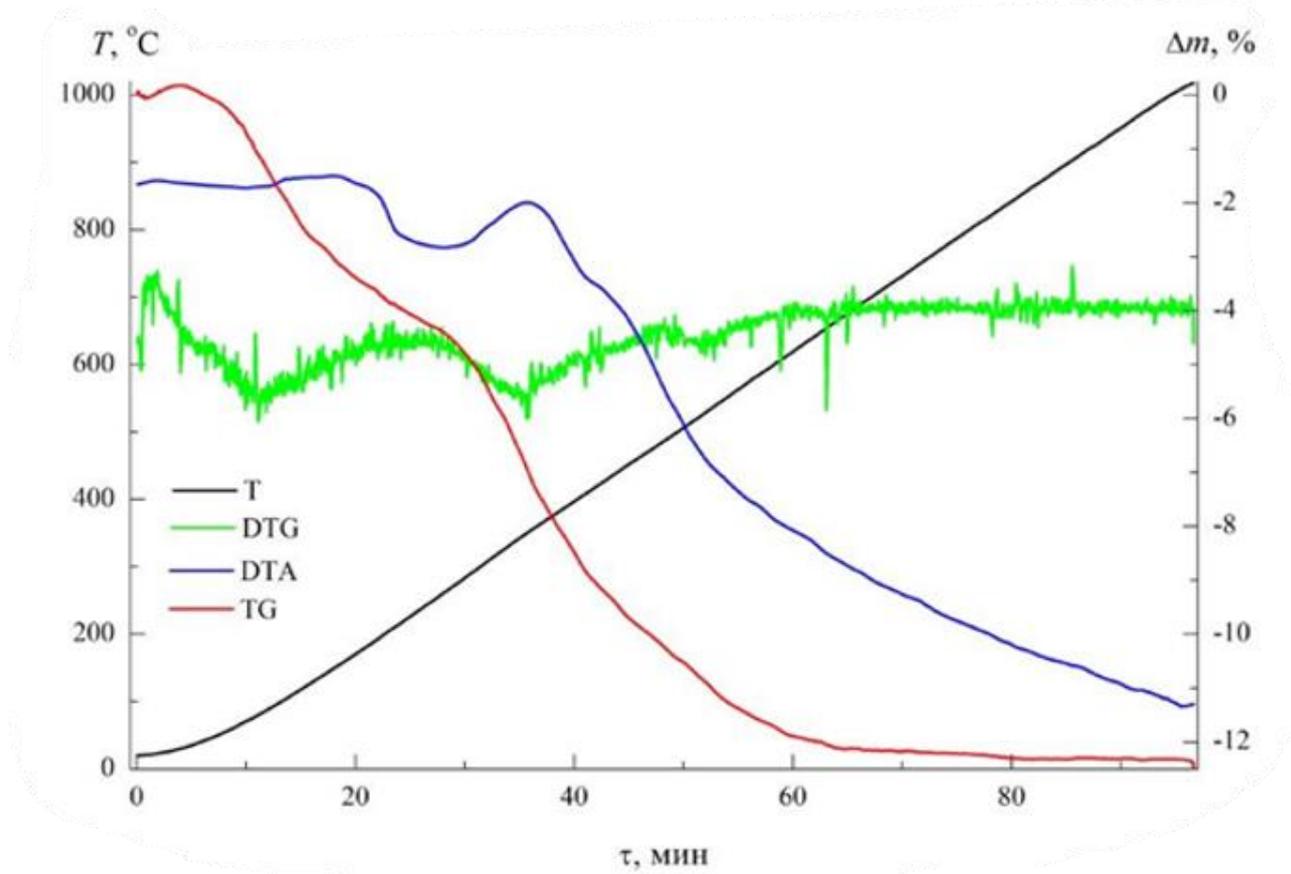


Рисунок 3.26 – Дериватограмма керамического образца

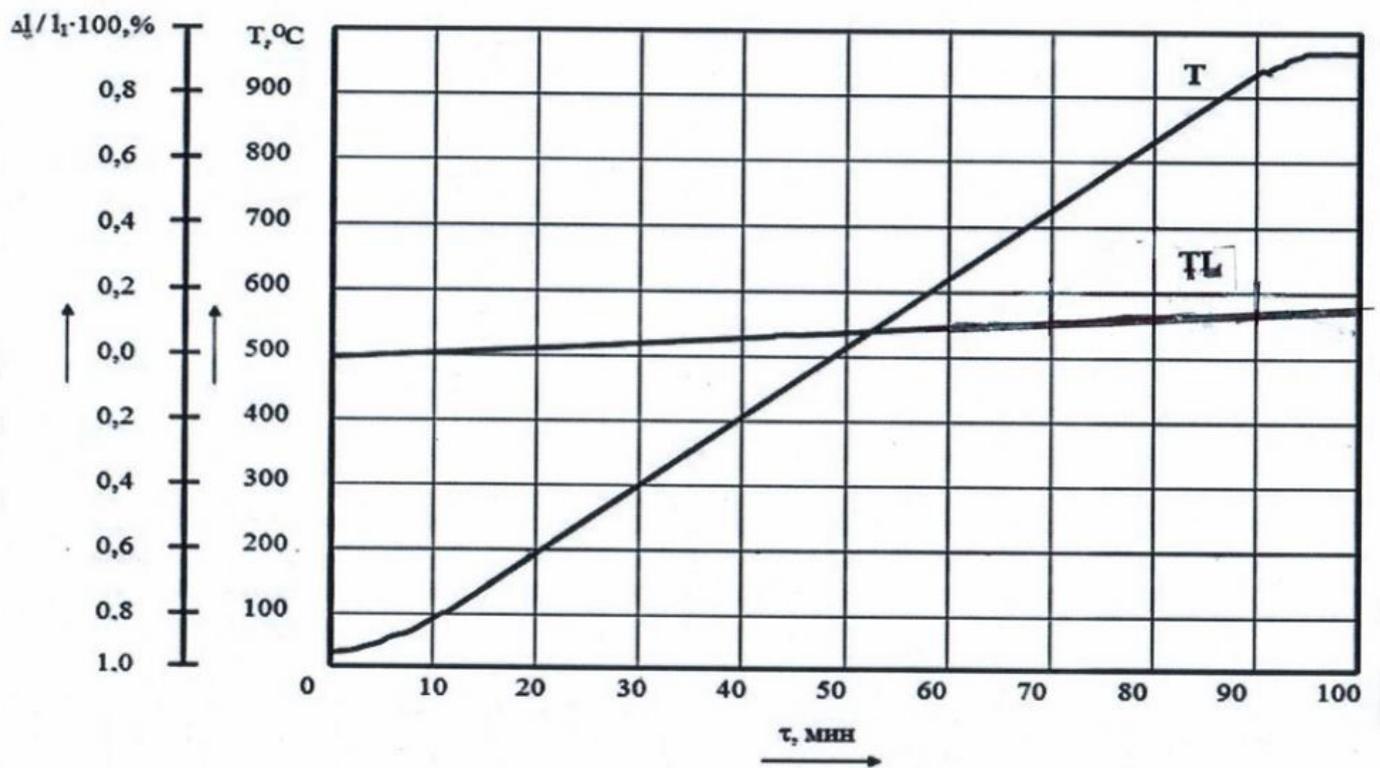


Рисунок 3.27 – Дилатометрия керамического образца

### 3.8 Выводы по главе 3

1) Выявлены наиболее значимые факторы влияния на технологические параметры гидролизованного раствора этилсиликата (условное содержание  $\text{SiO}_2$ , соотношение молей воды и количества этоксильных групп  $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5$  и содержание катализатора).

Построены и проанализированы регрессионные зависимости влияния технологических факторов на реологические свойства керамических суспензий. Уравнения имеют частично квадратичный характер. Прямое влияние оказывает условное содержание  $\text{SiO}_2$ , остальные факторы оказывают совместное влияние.

2) Исследованы составы керамических смесей с разными вариантами огнеупорного наполнителя, для каждого наполнителя проведено варьирование по фракционному составу. Наилучшее сочетание прочности, качества поверхности и минимальной склонности к образованию трещин наблюдается на образцах, изготовленных на основе трех фракций муллитизированного материала.

3) По полученным уравнениям регрессии проведено определение рационального состава керамической суспензии, который характеризуется следующими параметрами: условное содержание  $\text{SiO}_2$  – 24 – 25 %; количество жидкой фазы в керамической суспензии – 24 – 28 мас. %; количество мелкой фракции в керамической суспензии – 52 – 55 мас. %. К мелкой фракции отнесен размер 0,16 мм и меньше.

4) Исследовано влияние добавки пеногасителя марки «Пента-462А» в керамическую суспензию на ее свойства. Определен наиболее целесообразный момент введения пеногасителя в суспензию: после добавления огнеупорного наполнителя и до введения катализатора. Установлено, что необходимое количество пеногасителя для эффективного и полного подавления пены составляет 0,8 – 1,0 % от керамической суспензии.

5) Фазовый состав полученных образцов керамических стержней представлен преобладающей фазой муллита в количестве 71,8 мас. %.

6) Дилатометрический анализ образцов керамических стержней показывает их высокую точность в процессе тепловой обработки и возможность снижения температуры проковки по отношению к базовой до 800...820 °С, что обеспечивает уменьшение энергоемкости точного стального литья.

9) Для рассматриваемых наполнителей соотношение между зернистой и пылевидной составляющей по массе 1 к 2,4 обеспечивает плотную структуру литейной керамики, а соотношение между связующим и наполнителем по массе 1 к 3 вызывает релаксацию возникающих при выжигании спирта усадочных напряжений и формирование мелкой сетки трещин, блокирующих развитие крупных трещин. Такая структура является определяющей для получения повышенной прочности и требуемой газопроницаемости литейных форм из керамических стержней.

## 4 ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК

### 4.1 Подготовка производства

Первым этапом изготовления отливки является подготовка производства, которая включает проектирование технологии формы, анализ процессов заливки и затвердевания отливки и изготовление модельно-стержневой оснастки.

Проектирование технологии изготовления отливок нефтегазового комплекса заключается в определении положения отливки в форме, линии разъема, количества и расположения стержней, питания отливки, места и подвода металла.

#### Проектирование литниковой системы и формы литейной в сборе

Сначала проектируется трехмерная модель отливки при помощи программного комплекса CREO Parametric (рисунок 4.1).

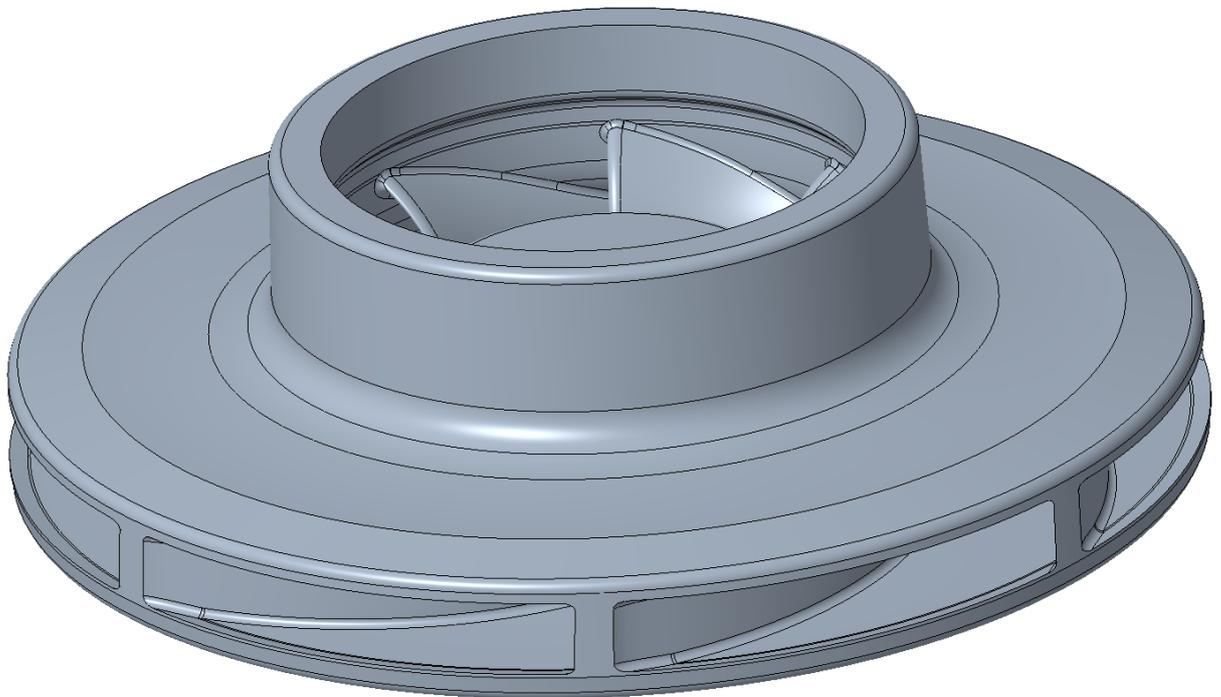


Рисунок 4.1 – Трехмерная модель отливки «Колесо рабочее»  
однозаходное закрытого типа

Поскольку изделия данного класса производятся штучно или мелкосерийно по 5 – 50 шт., то предварительное подтверждение качества разработанной технологии с помощью средств математического и компьютерного моделирования является ключевым этапом с экономической точки зрения. Для анализа процесса заполнения формы и затвердевания отливок используется программный комплекс MAGMASoft.

Для анализа заливки создается трехмерный цифровой двойник формы в сборе, в которой присутствуют все элементы литейной формы, включая фильтры. Затем эту модель импортируют в программный комплекс MAGMASoft при помощи универсального формата STEP.

Модель формы литейной в сборе показана на рисунке 4.2, результаты процесса моделирования для отливки «Колесо рабочее» однозаходное закрытое показаны на рисунке 4.3.

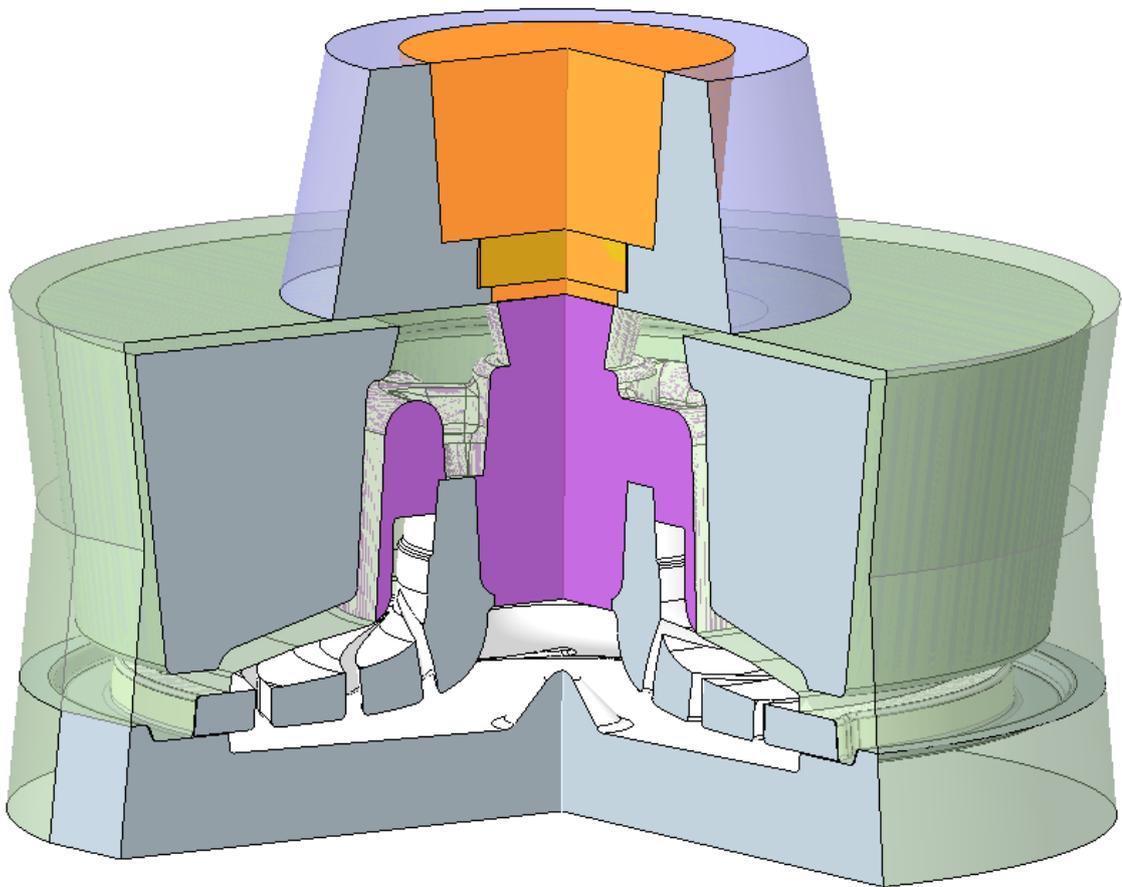


Рисунок 4.2 – Модель формы литейной в сборе для отливки «Колесо рабочее» однозаходное закрытое

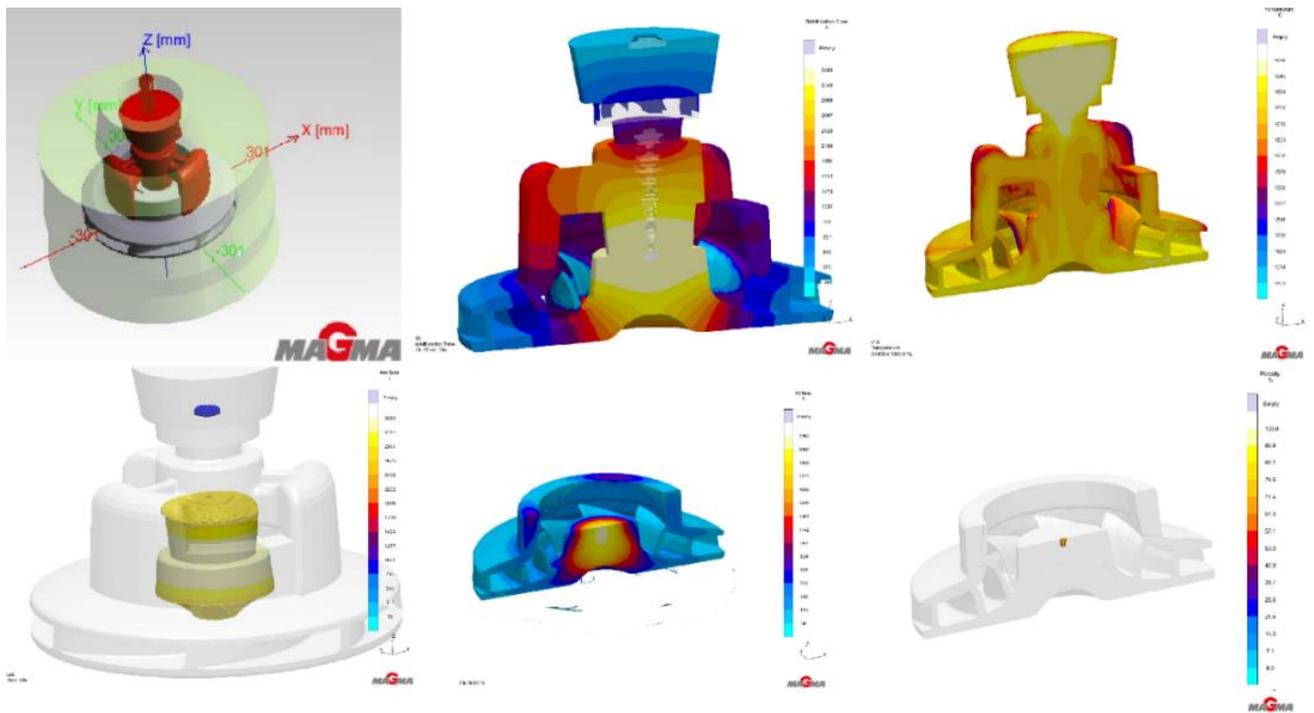


Рисунок 4.3 – Результаты процесса моделирования для отливки «Колесо рабочее» однозаходное закрытое

#### Проектирование и изготовление модельно-стержневой оснастки

При проектировании модельно-стержневой оснастки для отливки «Колесо рабочее» однозаходное закрытое при применении технологии композит Шоу-процесс необходимо разработать четыре стержневых ящика. Один ящик необходим для создания внутреннего стержня на жидком стекле (для полуформы верха) и три стержневых ящика для получения керамических стержней.

Ящик для получения внутреннего стержня для полуформы верха показан на рисунке 4.4. Стержневой ящик для получения полуформы верха показан на рисунке 4.5. Стержневой ящик для получения полуформы низа показан на рисунке 4.6. Стержневой ящик для получения центрального стержня показан на рисунке 4.7.

После завершения проектирования в соответствии с результатами разработок выпускается пакет чертежно-конструкторской и сопроводительно-технологической документации.

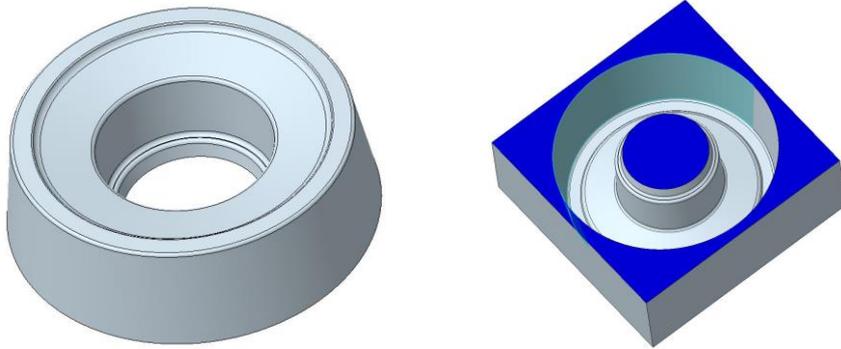


Рисунок 4.4 – Ящик для получения внутреннего стержня для полуформы  
верха

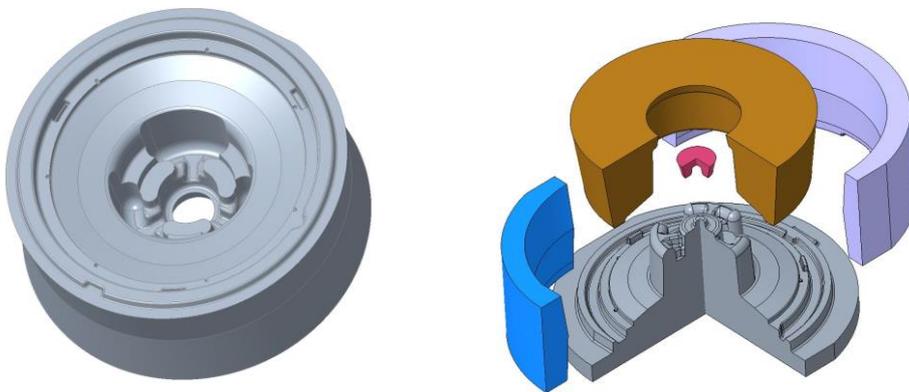


Рисунок 4.5 – Стержневой ящик для получения полуформы верха

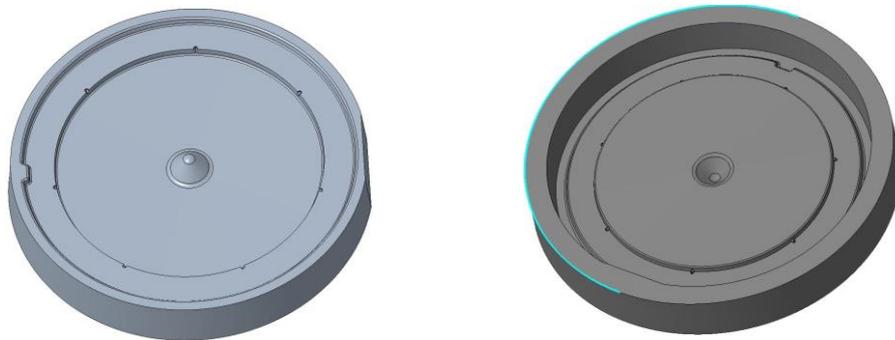


Рисунок 4.6 – Стержневой ящик для получения полуформы низа

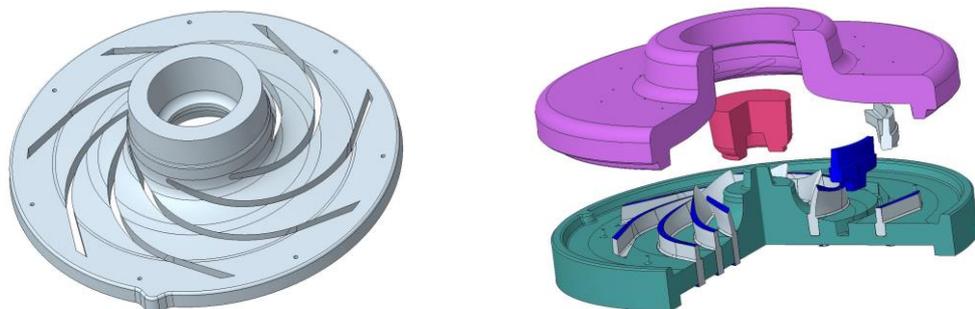


Рисунок 4.7 – Стержневой ящик для получения центрального стержня

После окончания проектных работ трехмерные модели оснастки передаются специалистам модельного цеха для написания управляющих программ и дальнейшего изготовления (рисунок 4.8).

Модельно-стержневая оснастка изготавливается из фанеры ГОСТ 3916.2-96. Для изготовления элементов, оформляющих лопатки рабочего колеса, применяется модельный пластик ToolArt M1000 с плотностью 1 г/см<sup>3</sup>.



Рисунок 4.8 – Модельно стержневая оснастка для отливки «Колесо рабочее»

После того как оснастка изготовлена, ее необходимо верифицировать. Однако сложность геометрии делает невозможной верификацию с помощью стандартных мерительных инструментов. Для этих целей целесообразно

применять трехмерное лазерное сканирование с помощью 3D-сканера, который поставляется с программным обеспечением, интегрированным для технологий 3D-сканирования и измерений (рисунок 4.9).

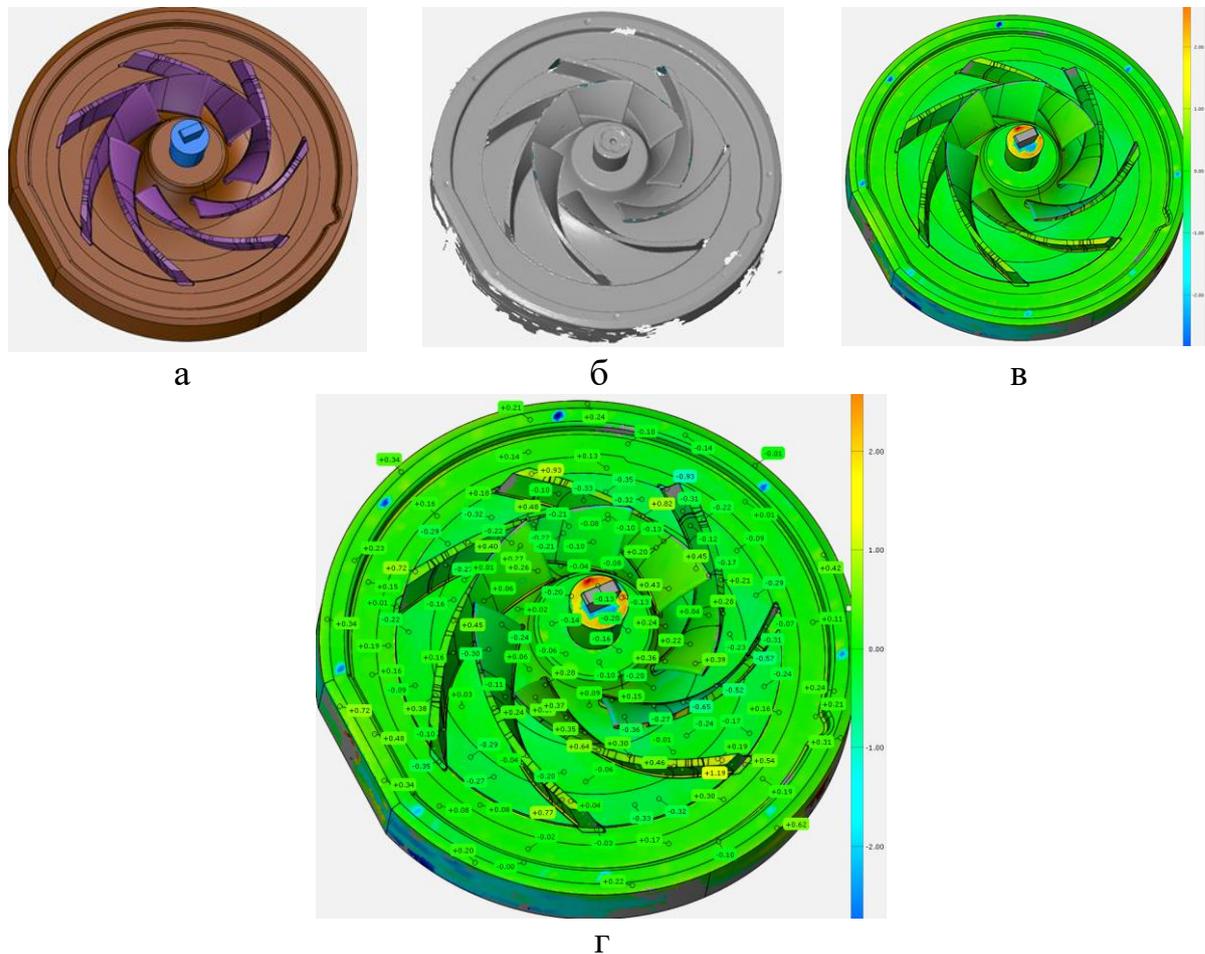


Рисунок 4.9 – Этапы анализа при помощи трехмерного сканирования:

а – первый этап; б – второй этап; в – третий этап;

г – четвертый этап

Этапы проведения анализа геометрии при помощи трехмерного лазерного сканирования:

- создание контрольной трехмерной модели;
- создание скана реального объекта в формате STL;
- совмещение трехмерной модели и скана, то есть нахождение оптимального положения, при котором наблюдаются минимальные отклонения;
- анализ полученных отклонений;
- заключение о годности/негодности измеряемого объекта.

## 4.2 Изготовление литейной формы из керамических стержней

Изготовление полуформ производится в два этапа:

- изготовление шамотного блока из наполнительной смеси;
- изготовление полуформы с керамическим облицовочным слоем.

Для изготовления наполнительной смеси в смеситель засыпается необходимое количество шамота, затем вливается жидкое стекло и смешивается в течение 4 – 5 минут. Смесь должна быть однородной без включений сухого шамота или непромешанного жидкого стекла, при необходимости производится повторное смешивание. Рецептuru наполнительной смеси приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Рецептuru наполнительной формовочной смеси

Наименование компонента	Содержание, мас. %	Количество, кг	Количество, л
Заполнитель шамотный (шамот) марки ЗША	100,0	100,0	69,0
Жидкое стекло (сверх 100 % наполнителя)	10,0 – 12,0	10,0 – 12,0	6,7 – 8,0

Для изготовления шамотного блока применяется отдельная оснастка. В подготовленную модельную оснастку засыпается наполнительный состав из расходной емкости. Засыпка производится послойно примерно по 50 – 70 мм.

Во время послойной засыпки производится уплотнение смеси вручную при помощи трамбовки. Для крупных форм в ящик устанавливаются подъемы, грузоподъемные петли или каркасы. По окончании уплотнения в смеси выполняются вентиляционные наколы глубиной не менее 40 мм и с шагом 70 – 90 мм. Затем производят продувку уплотненной смеси углекислым газом с целью ее отверждения, в течение примерно 1,0 – 1,5 мин на каждое вентиляционное отверстие. После полного отверждения извлекают шамотный блок и на рабочую поверхность наносят насечку с шагом примерно 40 – 50 мм и глубиной 3 – 5 мм. Насечка наносится с целью наилучшего сцепления

облицовочного керамического слоя с шамотным блоком. Затем блок продувают сжатым воздухом с целью удаления пыли.

Для изготовления стержней применяется керамическая стержневая смесь из огнеупорного наполнителя и этилсиликатного связующего. Для получения последнего необходимо произвести процесс гидролиза этилсиликата в гидролизере.

На основании проведенных исследований разработана технология проведения гидролиза этилсиликата на условное содержание  $\text{SiO}_2$ , равное 24 %, с соотношением молей воды и этоксильных групп  $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5$  равным 0,45. Рациональный состав приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Рациональная рецептура для гидролиза этилсиликата

Наименование компонента	Содержание, мас. %
Этилсиликат ЭТС-40	56,00
Спирт изопропиловый	37,50
Вода дистиллированная	6,50
Кислота соляная ХЧ (сверх 100 %)	0,56

В гидролизер вливают расчетное количество дистиллированной воды, затем добавляют необходимое количество соляной кислоты и изопропилового спирта. Компоненты перемешивают в течение 3 – 4 минут, затем в гидролизер вводят этилсиликат и перемешивают еще 15 – 20 минут. По окончании перемешивания температура раствора в гидролизере поднимется – это вызвано началом реакции взаимодействия воды и этилсиликата. Весь процесс гидролиза этилсиликата протекает в течение 24 ч.

Полученный раствор должен быть желтого цвета, однородным и полупрозрачным. Если имеются расслоения, то состав не пригоден для применения. В течение всего процесса гидролиза категорически запрещается производить добавку в гидролизер какого-либо компонента.

Рассев огнеупорного наполнителя для приготовления суспензии приведен в таблице 4.3. Распределение огнеупорного наполнителя по фракциям представлено на рисунке 4.10.

Таблица 4.3 – Рациональный рассев материалов наполнителя по фракциям

Наполнитель	Количество	Размер стороны ячейки сита по ГОСТ 6613-86, мм									
		1,60	1,00	0,63	0,40	0,32	0,20	0,16	0,10	0,06	Поддон
Муллитизированный наполнитель (0,0 – 0,063 мм)	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	50,000	50,000
Муллитизированный наполнитель (0,2 – 0,63 мм)	0,045	0,000	0,000	2,750	44,950	42,740	9,500	0,000	0,000	0,000	0,060
Муллитизированный наполнитель (0,5 – 1,25 мм)	0,175	0,120	14,500	47,260	37,680	0,440	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Всего	0,760	0,000	2,500	8,400	8,600	2,000	0,400	0,000	0,000	27,000	27,000
Распределение по фракциям		Крупная фракция			Средняя фракция			Мелкая фракция			
		11			11			54			

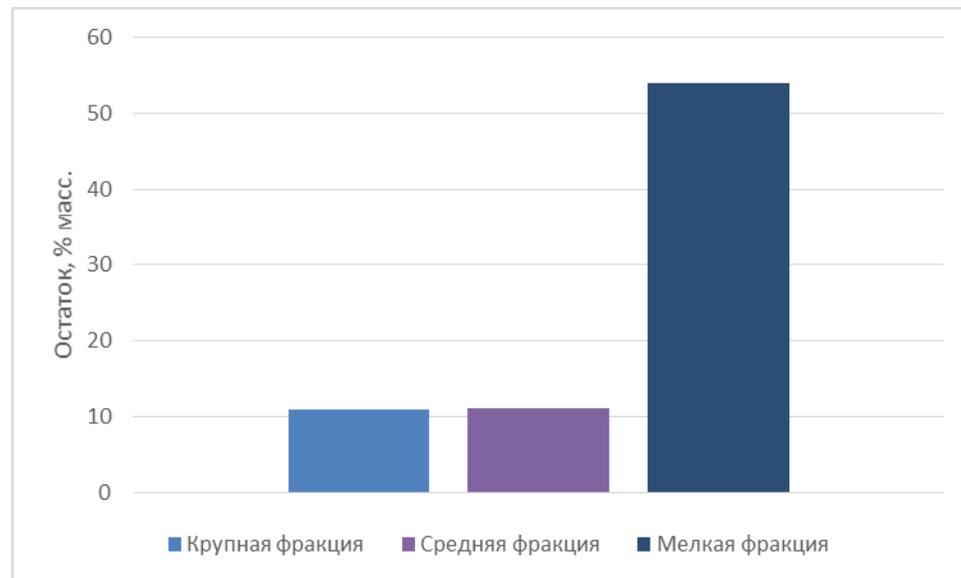


Рисунок 4.10 – Распределение огнеупорного наполнителя по фракциям

На основе полученного связующего изготовили керамическую суспензию рационального состава с применением пеногасителя для улучшения качества поверхности получаемых стержней, состав приведен в таблице 4.4.

По разработанной технологии получены стандартные образцы для определения прочности на разрыв, изготовлены центральные стержни и полуформы верха/низа (таблица 4.5).

Таблица 4.4 – Рациональный состав керамической суспензии

Наименование компонента	Содержание, мас. %
Гидролизированный раствор этилсиликата ЭТС-40	24,0
ШК-42 (0,0 – 0,063 мм)	54,0
ШК-42 (0,2 – 0,63 мм)	4,5
ШК-42 (0,5 – 1,25 мм)	17,5
Вода аммиачная 6 % (сверх 100 %)	0,6
Пеногаситель «Пента-462А» (сверх 100 %)	1,00

Таблица 4.5 – Характеристики суспензии и стержней, полученные на рациональном составе

Показатель	Значение
Предел прочности образцов на разрыв в сыром состоянии, Н/см <sup>2</sup>	18,2
Предел прочности образцов на разрыв после прокалки, Н/см <sup>2</sup>	28,4
Склонность литейной керамики к образованию трещин, балл	2
Качество поверхности образцов, балл	2
Жидкотекучесть суспензии по вискозиметру Суттарда, мм	204

Для отверждения керамической облицовочной или стержневой смеси применяется 6%-й водный раствор аммиака. Приготовление керамической смеси производится в установке приготовления керамического состава.

В установку приготовления керамического состава вводят необходимое количество гидролизованного раствора этилсиликата ЭТС-40, включают смешивание, затем добавляют сначала самую мелкую фракцию огнеупорного наполнителя и перемешивают в течение 5 – 6 мин. Далее добавляют среднюю

фракцию огнеупорного наполнителя и снова смешивают 5 – 6 минут. В последнюю очередь вводят крупную фракцию огнеупорного наполнителя и перемешивают 5 – 6 минут.

Загрузка огнеупорного наполнителя керамической смеси всех фракций производится в работающую установку. По окончании времени перемешивания смесь из выпускного крана сливается в расходную емкость.

В оснастку устанавливают подготовленный шамотный блок, затем стержневой ящик собирают как показано на фото на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Шамотный блок в ящике для заливки керамической суспензией

Из установки приготовления керамической смеси выпускают в расходную емкость необходимое количество керамического состава. В мерный цилиндр набирают необходимое количество отвердителя (6 %-й раствор аммиака).

При помощи перфоратора с круглой насадкой производится перемешивание состава для создания «воронки» в самой смеси, и в образующуюся «воронку» тонкой струей вливается отвердитель. Смесь интенсивно и тщательно перемешивается по всему объему не более 1 мин. Плохое перемешивание приводит к расслоению смеси и потере ее прочности [16].

При заполнении модельной оснастки жидким составом шамотный блок от всплытия и смещения необходимо удерживать линейкой. Живучесть смеси после заливки не должна превышать 3 мин.

Изготовление центральных керамических стержней. Для обеспечения прочности стержней при их изготовлении применяются специальные сварные каркасы. Для стержней с толщиной стенки менее 30 мм их изготавливают из отожженной проволоки диаметром 3 мм. Для стержней с толщиной стенки более 30 мм устанавливают сварной каркас диаметром 10 мм. Для каждого стержня каркас проектируется индивидуально. Трехмерная модель каркаса показана на рисунке 4.12. Фотография установки каркаса в стержневой ящик показана на рисунке 4.13.

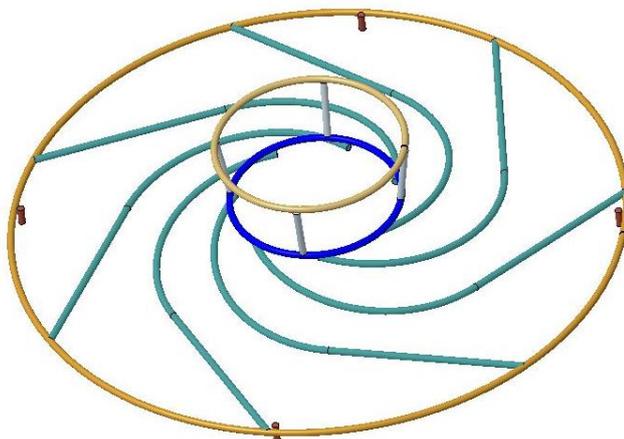


Рисунок 4.12 – Трехмерная модель каркаса центрального стержня



Рисунок 4.13 – Установка каркаса в стержневой ящик

Стержневой ящик центрируют на столе центрифуги и закрепляют, затем готовят керамическую смесь по рецептуре, аналогичной рецептуре для

полуформ. При непрерывном вращении центрифуги со скоростью 40 об/мин смесь заливают в стержневой ящик (рисунок 4.14).



Рисунок 4.14 – Заполнение ящика смесью

После перехода смеси в ящике в пластичное состояние (через 3,5 мин) со знаковых частей срезают избытки и извлекают отъемную часть (воронку). Затем ящик переворачивают на 180 °. При изготовлении столь сложных изделий сотрудники должны иметь опыт и четкое представление о порядке извлечения стержня из стержневого ящика. Разборку ящика ведут в четкой последовательности и процесс должен укладываться в четко заданный промежуток времени, поскольку все составные части лопаток должны быть извлечены из керамического стержня, пока он не перешел из резинового состояния в полностью твердую керамику.

По истечении 4,5 мин керамическая суспензия переходит из пластичного состояния в упругое, необходимо снять нижнюю половину ящика. В период с 5 до 7 мин керамическая суспензия находится в упругом состоянии, за это время необходимо извлечь все отъемные элементы стержневого ящика, оформляющие лопасти рабочего колеса (рисунок 4.15).



Рисунок 4.15 – Извлеченный стержень

Стержень перемещают в вытяжной шкаф и поджигают.

Разобрав модельную оснастку, полуформу переставляют на решетку, обильно поливают спиртом для выравнивания всей керамической поверхности по влажности и на решетке помещают в вытяжной шкаф. Под вытяжкой поджигают спирт и дают полностью ему выгореть (рисунок 4.16). Это блокирует образование крупных трещин в литейной керамике.



Рисунок 4.16 – Вытяжной шкаф

### Сборка литейной формы

Промежуточный контроль на этапах производства осуществляется при помощи различных шаблонов, специально разработанных и изготовленных для конкретного изделия (рисунок 4.17), проводят визуальный осмотр на наличие дефектов. Компоненты формы передают на прокатку.



Рисунок 4.17 – Контроль геометрии профиля стержня при помощи шаблона

Верхнюю полуформу укладывают на поддон с песком плоскостью по линии разъема кверху. Полуформу осаживают в песок для плотного прилегания, затем устанавливают стержень в верхнюю полуформу и заполняют огнеупорным материалом (рисунок 4.18). Песок в полости между стержнем и полуформой уплотняют через отверстия лопаткой – уплотнение не даст стержню коробиться при высоких температурах. Нижнюю полуформу также плоскостью разъёма кверху устанавливают на поддон с песком и на край полуформы, выкладывают образцы для испытаний на прочность смеси.



Рисунок 4.18 – Засыпка стержня огнеупорным наполнителем

Поддоны с полуформами устанавливают на под печи ПВП 18.30.13/12,5М, печь закрывают и включают ступенчатый режим прокали. График режима прокали представлен на рисунке 4.19.

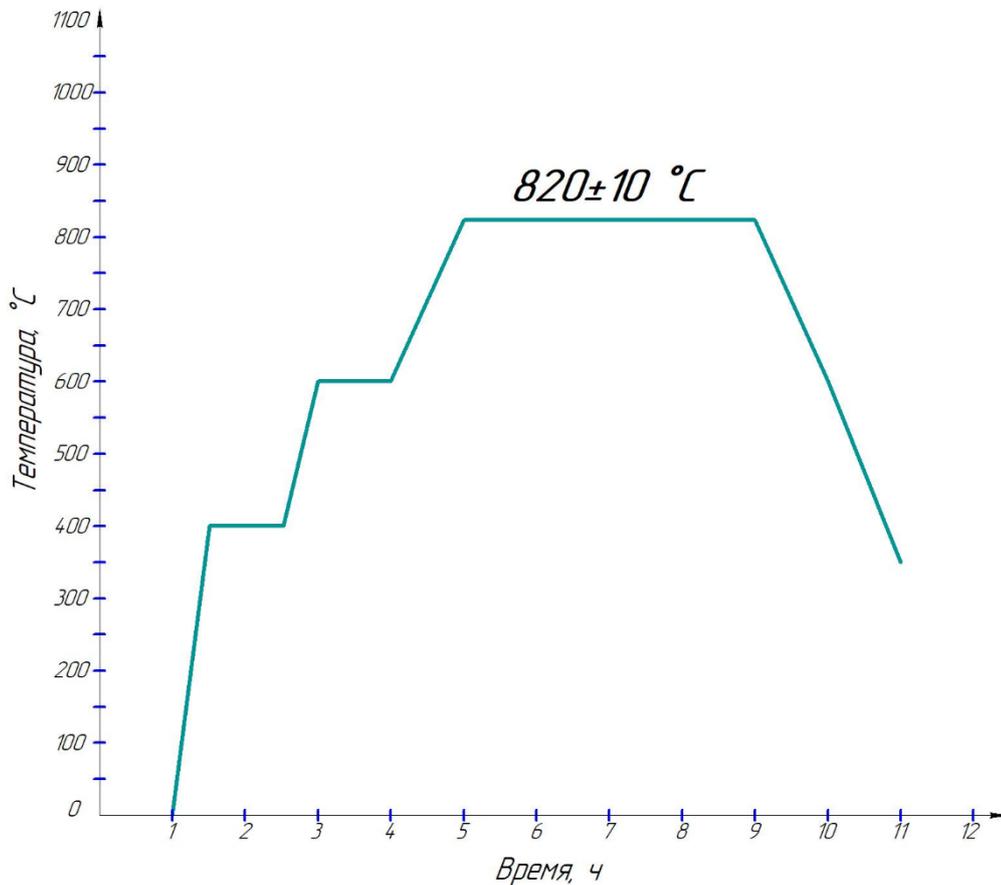


Рисунок 4.19 – График прокали керамических форм и стержней

Прокалку керамических стержней проводят с целью завершения химических реакций и фазовых превращений, уплотнения керамики, достижения заданных свойств изделия и необходимой микроструктуры.

С экономической точки зрения наиболее рациональна непродолжительная прокали, однако такой вид обработки может привести к образованию крупных трещин, поэтому для получения качественных стержней необходим медленный многоступенчатый нагрев. Время выдержки выбирается в зависимости от формы и размеров изделий, поскольку продолжительность выравнивания температуры в объеме изделия прямо пропорциональна квадрату его толщины.

Механические напряжения, возникающие в нагреваемом изделии вследствие его неравномерного термического расширения при повышении температуры, являются наиболее опасными. Перепад температур обуславливает сжатое состояние наружных и растянутое состояние внутренних слоев изделия [83].

Прокаленные полуформы на поддонах устанавливают на плацу и остужают до температуры окружающей среды.

Из полуформы верха извлекают стержень и огнеупорный материал, полуформу и стержень очищают сжатым воздухом от остатков песка и пыли, затем повторно устанавливают стержень обратно в полуформу верха, приклеив его по наружному знаку. Знаковую часть по ступице дополнительно закрепляют шпилькой. По линии замка формы наносят тонкий слой формовочного клея и производят сборку с верхней полуформой. Линию разъема формы и торец обмазывают формовочным клеем с песком. Далее форму погружают и скрепляют с поддоном (рисунок 4.20).

Перед заливкой форму прогревают в печи до температуры от 400 °С до 550 °С, время выдержки при этой температуре – 10 ч (рисунок 4.21). Температура подогрева форм 400 °С задается для отливок с повышенной склонностью к короблению установленных в них стержней.



Рисунок 4.20 – Форма в сборе перед заливкой

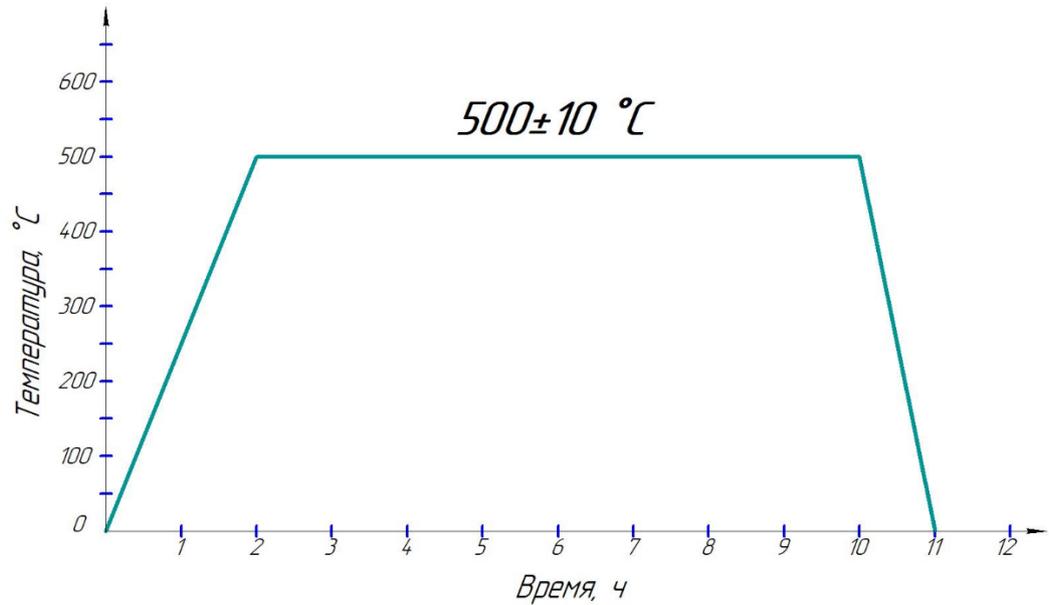


Рисунок 4.21 – График подогрева керамических форм перед заливкой  
Пенокерамические фильтры перед установкой в форму прокаливаются не менее 15 мин открытым пламенем газовой горелки до белого свечения его центральной части в соответствии с рисунком 4.22.

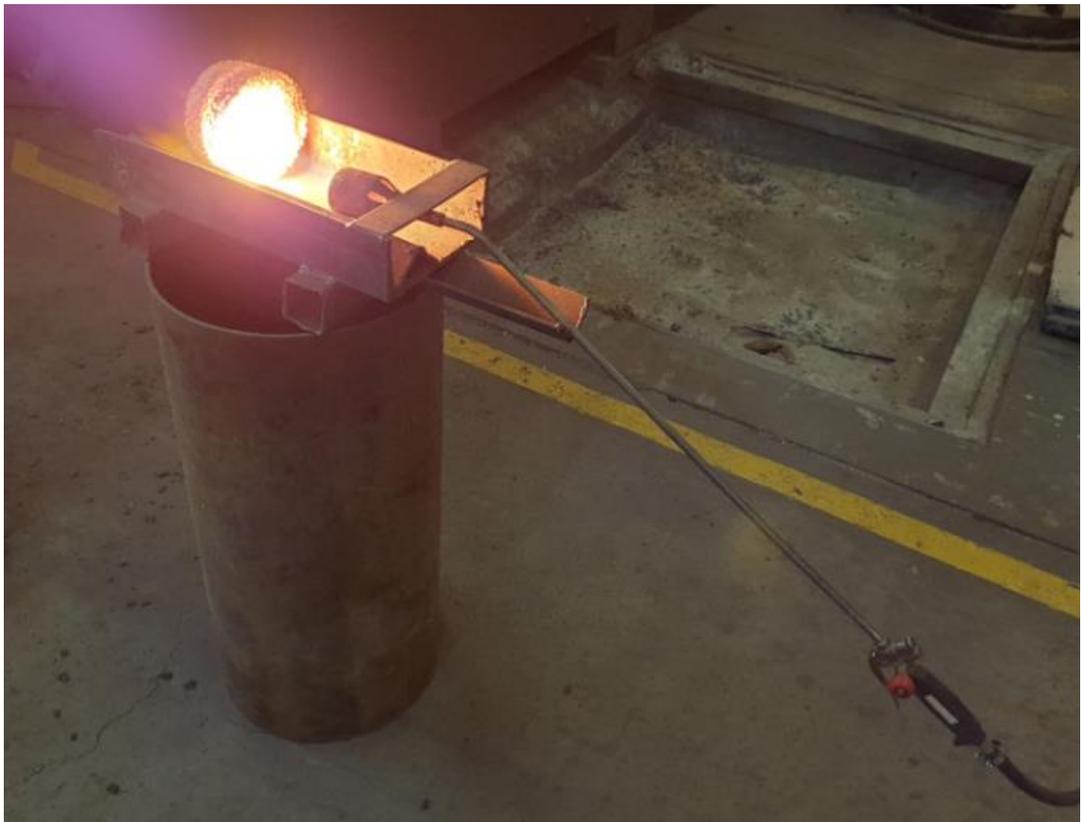


Рисунок 4.22 – Прокаливание фильтров

Готовую форму заливают заданным сплавом. На всех этапах производства форм, стержней и отливок ведется непрерывный технологический контроль.

### 4.3 Изготовление отливок

Для получения опытных отливок применяется сталь конструкционная легированная марки 20ГЛ. Для выплавки стали используется индукционная тигельная печь УИ-0,35т-300 (таблицы 4.6 и 4.7).

Таблица 4.6 – Характеристики плавильной печи

Наименование	Емкость плавильного узла, т	Мощность, кВт	Входное напряжение, Ф/В/Гц	Сечение питающего кабеля, мм <sup>2</sup>	Напряжение на Индукторе, В	Время плавки, мин/цикл	Расход электроэнергии, кВт·ч/т	Трансформатор, кВА	Расход воды, т/ч	Температура нагрева расплава, номинальная/максимальная, °С
УИ-0,35т-300	0,35	300	3/380/50	165	750/1500	60	640	400	12	1650/1850

Таблица 4.7 – Футеровка (набивная масса нейтральная)

Химический состав и физические свойства	Показатели	Значения
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	86 мас. %
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2 мас. %
	MgO	10 мас. %
	Зернистость	0 – 6 мм

Заливка форм осуществляется непосредственно из печи, температура заливки сплава  $T=1580\pm 10$  °С. Продолжительность заливки 10 с. Залитые отливки остывают в форме до температуры 400 °С.

#### Выбивка и очистка отливок

Выбивка отливок осуществляется вручную, несколькими ударами разбивают наружную керамическую форму (рисунок 4.23).

Отливку с внутренним стержнем и каркасом передают на отделение литниково-питающей системы при помощи воздушно-дуговой строжки ВДС (аппарат ВДУ-1250 Урал). Для резки применяются угольные электроды, которые перед использованием необходимо прокалить в течение 3 – 4 ч при температуре 150 – 200 °С. При ВДС необходимо применять сжатый воздух

избыточным давлением 4 – 6 кгс/см<sup>2</sup> с относительной влажностью не выше 80 %.



Рисунок 4.23 – Выбивка керамической формы

После удаления ЛПС отливки передаются на дробеструйную очистку в дробеструйной камере. Затем удаляют каркас центрального стержня. Каждой отливке приваривают два стандартных образца по ГОСТ 977-88 и отправляют на термическую обработку.

#### Термическая обработка

Для термической обработки применяется газовая печь РР-КР 59/1200.

Отливки «Колесо рабочее» подвергаются улучшению. Это режим термической обработки, включающий закалку и высокий отпуск. После улучшения сталь имеет структуру сорбита отпуска.

После этапа закалки сталь имеет мартенситную структуру, но кроме основной структурной, всегда имеется некоторое количество остаточного аустенита, а также могут присутствовать карбидные частицы, не растворившиеся при аустенитизации или выделившиеся в процессе самоотпуска. Охлаждение при закалке отливок «Колесо рабочее» из стали 20ГЛ осуществляется в воде.

Вторым этапом является высокий отпуск, который используется для обеспечения сочетания повышенного уровня прочности с высокой пластичностью и вязкостью. Высокоотпущенные стали хорошо противостоят

динамическим нагрузкам. На рисунке 4.24 представлен режим термической обработки колес из стали 20ГЛ.

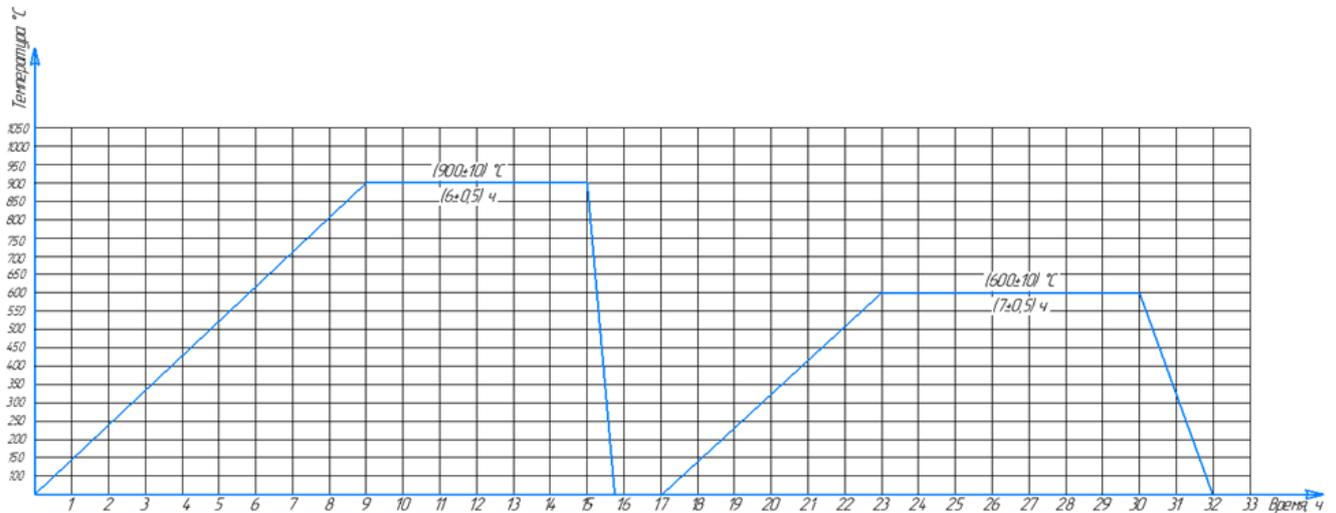


Рисунок 4.24 – Закалка 900 °C с охлаждением в воде, 6 ч; отпуск 600 °C, 7 ч

#### 4.4 Оценка качества полученных отливок

##### Механические испытания опытно-промышленной партии

Таблица 4.8 – Результаты механических испытаний опытной партии отливок

Номер образца	Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа, не менее	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа, не менее	Относительное удлинение $\delta$ , %, не менее	Относительное сужение $\psi$ , %, не менее	Ударная вязкость КСV <sub>-20</sub> , Дж/см <sup>2</sup> , не менее	Твёрдость HV, не более
Норма	500	300	20	35	24,5	240
1	550	385	28	75	233	178
2	570	405	27	74	156	178
3	580	415	29	76	159	181
4	580	420	29	76	189	181
5	560	385	27	72	177	186
6	560	370	31	69	203	186
7	560	405	29	74	219	180
8	570	410	27	69	172	180
9	570	410	25	70	162	177
10	550	380	28	75	159	169

Таблица 4.9 – Металлографические испытания партии опытных отливок

Номер образца	Загрязненность неметаллическими включениями, оценка в баллах									Величина зерна, номер
	Оксиды точечные	Оксиды строчечные	Силикаты хрупкие	Силикаты пластичные	Силикаты недеформирующиеся	Сульфиды	Нитриды строчечные	Нитриды точечные	Нитриды алюминия	
1	2,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9
2	1,8	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	8
3	1,8	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9
4	2,2	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9
5	2,0	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	8
6	2,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	9
7	1,9	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	8
8	2,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	8
9	2,1	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9
10	2,1	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9

#### Неразрушающий контроль отливок

Опытная партия отливок прошла процедуру неразрушающего контроля по методам УЗК и ПВК. Недопустимых дефектов не выявлено.

У рабочих колес капиллярному контролю подвергаются следующие зоны:

- посадочная поверхность вала и уплотнительного кольца;
- внешние поверхности дисков, внутренние поверхности дисков, поверхность лицевой и тыльной стороны лопасти, входные и выходные кромки лопастей, а также радиусные переходы лопастей.

Ширина контролируемого участка лопасти от входной и выходной кромки определяется технической возможностью проведения ПВК.

Признаком дефекта является наличие индикаторного следа, максимальный размер которого в любом направлении превышает 2 мм. Индикаторные следы, расстояния между краями которых меньше

протяжённости наименьших из них, оцениваются как один дефект (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Характеристики допустимых дефектов в рабочих колесах по результатам ПВК

Тип индикаторного следа	Характеристики допустимых дефектов	
	Зона ПВК 1	Зона ПВК 2
Протяженный	–	Допускается индикаторный след с максимальной длиной до 3 мм.
Цепочка		Три индикаторных следа на одной линии, отдаленные до 2 мм
Округлый	Диаметром до 5 мм	Диаметром до 8 мм

Цепочкой считаются индикаторные следы, расположенные на одной линии на расстоянии менее 2 мм друг от друга (расстояние измеряется по ближайшим краям индикаторных следов) (таблица 4.11).

Таблица 4.11 – Критерии дефектов по протяженности в металле толщиной не более 30 мм

Толщина стенки, мм	Условная протяженность одиночного непотяженного дефекта, мм
1	2
$4,0 < S \leq 6,0$	5
$6,0 < S \leq 9,0$	7
$9,0 < S \leq 12,0$	10
$12,0 < S \leq 15,0$	12
$15,0 < S \leq 30,0$	15

Дефекты, не соответствующие характеристикам допустимых дефектов, подлежат ремонту. На окончательно обработанных уплотнительных поверхностях не допускаются дефекты, индикаторные следы которых имеют размер более 1 мм.

УЗК подвергают следующие зоны литых деталей рабочего колеса:

- радиусные переходы рабочего колеса;
- места срезки (фрезеровки) литейных прибылей – места фрезеровки литейных прибылей;
- зона рабочих лопастей.

Непротяженными дефектами в металле толщиной более 30 мм считают дефекты, условная длина которых не превышает эффективной ширины ультразвукового луча на заданной глубине. Остальные дефекты считаются протяженными (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Характеристики допустимых одиночных дефектов литых деталей по результатам УЗК

Толщина стенки отливки $S$ , мм	Эквивалентная площадь отверстия с плоским дном для настройки		Допустимое количество дефектов на оценочном участке $200 \times 300$ мм, шт.	Минимальное расстояние между дефектами, мм
	Уровня фиксации $S_0$ , мм <sup>2</sup>	Браковочного уровня $S_1$ , мм <sup>2</sup>		
1	2	3	4	5
$S \leq 50$	10	20	12	15
$50 < S \leq 100$	15	30	12	25

Оценка качества литых деталей по результатам УЗК производится по:

- амплитуде эхо-сигнала от дефекта;
- протяженности дефектов и расстояниям между ними;
- количеству дефектов на оценочном участке размерами  $200 \times 300$  мм;
- ослаблению донного сигнала при контроле прямым ПЭП.

Дефекты, расстояния между которыми меньше протяженности наименьшей из них, оцениваются как один дефект.

К дефектам основного металла, не требующим исправления, относятся проецируемые на оценочный участок контролируемой поверхности размерами  $200 \times 300$  мм одиночные непротяженные дефекты, параметры которых не превышают значений, указанных в таблице 4.12. На меньших размерах участка допустимое количество дефектов должно быть снижено пропорционально отношению площадей данного и оценочного участков.

Дефект металла отливки является недопустимым, если выполняется хотя бы одно из следующих условий:

- обнаружен протяженный дефект;
- эквивалентная площадь обнаруженного дефекта превышает наибольшее допустимое значение, указанное в таблицах 4.11, 4.12;
- количество дефектов на оценочном участке 200×300 мм превышает значения, указанные в таблице 4.12;
- расстояние между дефектами меньше минимального расстояния, указанного в таблице 4.12;
- при контроле прямым ПЭП дефект ослабляет донный сигнал до уровня фиксации и ниже.

Деталь бракуется и не подлежит ремонту в случае обнаружения:

- недопустимых дефектов, расположенных в местах, не позволяющих произвести ремонт;
- сквозных дефектов.

Опытная партия отливок по результатам неразрушающего контроля признана годной, отвечающей всем требованиям конструкторско-технологической документации.

#### Геометрическая точность отливок

По предложенной технологии была изготовлена партия из 10 отливок «Колесо рабочее». После изготовления был проведен весь комплекс контрольных мероприятий для подтверждения качества изделий. Результаты контроля геометрической точности некоторых отливок показаны на рисунках 4.25 и 4.26.

Преобладающее отклонение геометрии снизилось с  $\pm 2$  до  $\pm 1$  мм, а максимальные отклонения с 4,2 до 2,2 мм (сравнение с рисунком 1.15).

Повышение точности геометрии является результатом увеличения прочности применяемых стержней и использованием муллитосодержащего материала с очень низким коэффициентом линейного термического расширения.

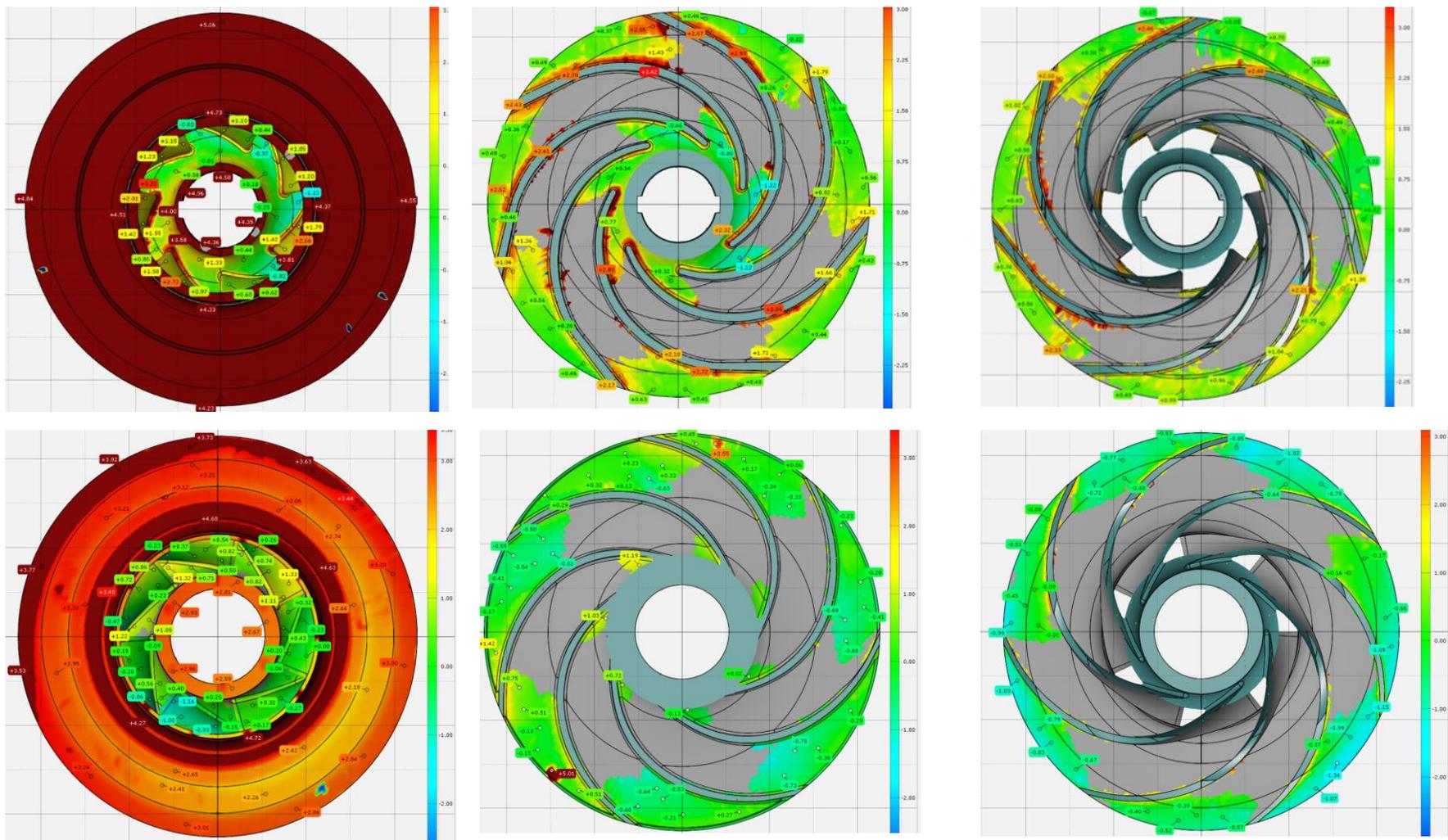


Рисунок 4.25 – Результаты трехмерного лазерного сканирования однозаходных колес

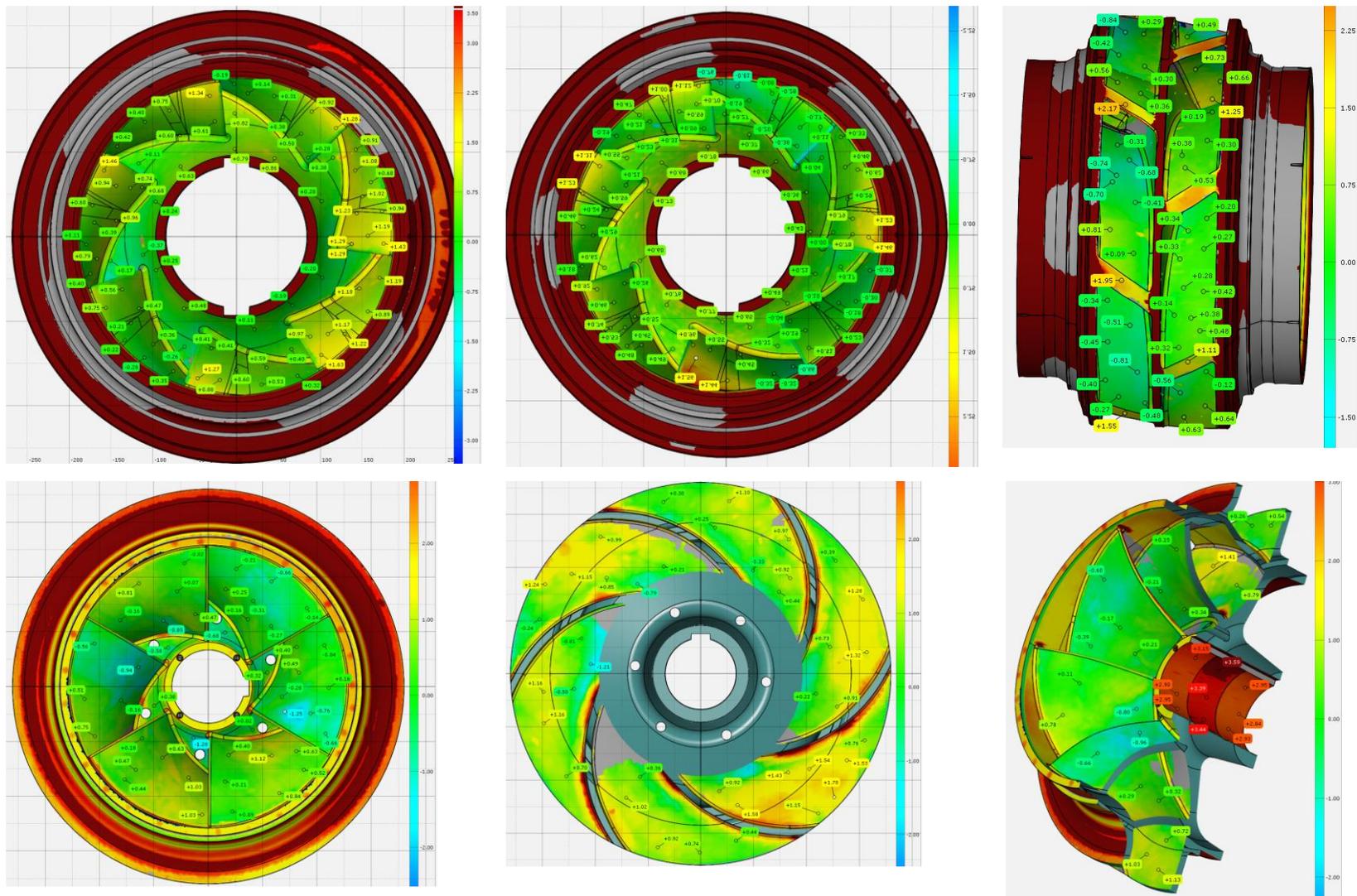


Рисунок 4.26 – Результаты трехмерного лазерного сканирования двухзаходных колес

Таким образом, повышенная прочность обеспечивает высокую точность геометрии на всех этапах производства отливки, а низкий коэффициент линейного термического расширения наполнителя препятствует деформации стержня в процессе проковки и заливки форм.

Базовая технология обеспечивала допуски линейных размеров отливки, соответствующие классу 11т по ГОСТ Р53464-2009. Разработанная технология позволила получать отливки по классу 9т.

Качество поверхности опытных отливок определяется шероховатостью Rz40. Отливки, полученные по базовой технологии, имели шероховатость поверхности Rz80.

Фотография однозаходного колеса, полученного по разработанной технологии, показана на рисунке 4.27. Фотография двухзаходного колеса, полученного по разработанной технологии, показана на рисунке 4.28.

Внедрение разработанной технологии подтверждается патентами и актами (приложения А – Г).



Рисунок 4.27 – Колесо однозаходное (отливка с предварительной механической обработкой)



Рисунок 4.28 – Колесо двухзаходное (отливка)

#### **4.5 Техничко-экономические показатели**

После того как разработана новая технология с применением современных материалов, остается важный вопрос. Вопрос этот заключается в экономической целесообразности и эффективности применения разработанного процесса.

Себестоимость продукции является одним из ключевых показателей, характеризующих эффективность производственного процесса, который исчисляется в процессе калькулирования.

Обоснованная система калькулирования себестоимости продукции является важнейшей частью функционирования, обеспечивающая правильное установление цен на продукцию, определение рентабельности и эффективности производства, поиска резервов снижения себестоимости и т.д.

Под методом учета затрат на производство и калькулирования себестоимости продукции понимают совокупность приемов регистрации, сводки и обобщения в учетных регистрах данных о затратах на производство продукции [84].

В экономических источниках упоминается значительное количество методов учета затрат и калькулирования себестоимости продукции, однако какой-либо общепринятой классификации методов в настоящее время не существует.

Но какой бы метод калькулирования себестоимости организация ни выбрала, он должен:

- позволять объективно распределять затраты между видами продукции, незавершенным производством, остатками продукции на складах и проданной продукции;
- способствовать принятию обоснованных решений по установлению цены, изменению объемов производства и продаж продукции;
- правильно планировать предстоящие затраты и контролировать уровень затрат.

По способу включения в производственную себестоимость продукции затраты (бухгалтерские) подразделяются на прямые и косвенные.

Прямые затраты вызваны конкретным видом продукции. Их можно легко отнести к определенному виду продукции в момент их совершения на основании данных первичных документов. К ним относят: затраты сырья, материалов, на заработную плату производственных рабочих и др.

Косвенные затраты образуются по нескольким видам продукции. Как правило, к ним относят производственные накладные расходы, которые нельзя прямо отнести к определенному виду продукции, поэтому общую сумму затрат распределяют на продукцию на основании специальных ставок [85].

Введение разработанной технологии в основном ведет к изменению прямых затрат на производство продукции. Сравнение калькуляции себестоимости производства отливок по базовой и разработанной технологиям приведено в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Калькуляция себестоимости производства отливок по базовой и разработанной технологиям

Статьи расходов	Наименование	Базовая себестоимость руб./т	Проектная себестоимость руб./т
<b>1</b>	<b>Прямые затраты на сырье</b>		
	Сталь		
	Лом 3А	84 360	843 60
	Марганец МН-95	6 720	6 720
	Ферросилиций ФС65	3 675	3 675
	Никель Н1	140 65	140 65
	Катанка алюминиевая	690	690
	Графит МУ-85	160	160
	Флюс перлитовый	3 163	3 163
	Вермикулит вспученный	450	450
	Вата огнеупорная	720	720
	Огнеупоры	7 315	7 315
	Термопары	6 013	6 013
	Пробоотборник	412 0	4 120
	<b>Итого затраты на сталь</b>	<b>131 451</b>	<b>131 451</b>
	Форма		
	Этилсиликат-40	571 75	548 88
	Спирт изопропиловый абсолютированный	5 365	5 579
	Вода дистиллированная	324	336
	Кислота соляная ХЧ	52	52
	Вода аммиачная 25 %	456	456
	Наполнитель огнеупорный мелкой фракции	915 64	302 50
	Наполнитель огнеупорный средней фракции	732 52	128 90
	Наполнитель огнеупорный крупной фракции	457 80	4650
	Покрытие разделительное	403	403
	Наполнитель шамотный	1 450	1450
	Каркас металлический	1 215	1 215
	Пеногаситель Пента-462А	-	1 500
	<b>Итого затраты на форму</b>	<b>277 036</b>	<b>102 068</b>
<b>2</b>	<b>Итого прямые затраты на сырье</b>	<b>408 487</b>	<b>232 019</b>
	Возврат собственного производства	-45 315	-45 315
	Материалы для финишной обработки	14 267	14 267
<b>3</b>	Ремонт оснастки, износ инструмента	5 595	5 595

## Окончание таблицы 4.13

Статьи расходов	Наименование	Базовая себестоимость руб./т	Проектная себестоимость руб./т
4	Зарплата основных рабочих	413 815	413 815
5	Налоги с ФОТ	146 490	146 490
6	Затраты на контроль качества отливки	480 170	480 170
7	Амортизация	13 556	13 556
8	Энергоресурсы	15 356	15 356
9	Потери от брака	71 122	32 156
<b>10</b>	<b>Цеховая себестоимость (прямые затраты)</b>	<b>1 523 543</b>	<b>1 309 609</b>

Внедрение предлагаемой технологии позволило сократить прямые затраты на изготовление формы на 63,2 %, а полную цеховую себестоимость на 14,0 %.

#### 4.6 Выводы по главе 4

1) Разработана технология изготовления литейной формы из керамических стержней для стальных отливок нефтегазового комплекса.

2) Результаты механических и металлографических испытаний, а также неразрушающий контроль (ВИК, ПВК и УЗК) партии опытных отливок подтвердили высокое качество полученных изделий, их соответствие ТУ.

3) Анализ геометрической точности опытных отливок показал уменьшение преобладающих отклонений по отношению к аналогичным отливкам, произведенным по базовой технологии с  $\pm 2$  до  $\pm 1$  мм, а максимальных отклонений с 4,2 до 2,2 мм. Шероховатость поверхности полученных опытных отливок составляет Rz40. Отливки, полученные по базовой технологии, имели шероховатость поверхности Rz80.

4) Экономические расчеты подтверждают целесообразность применения разработанной технологии. Достигается снижение прямых затрат на изготовление формы на 63,2 % и полной цеховой себестоимости на 14,0 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты свидетельствуют о достижении цели диссертационной работы по разработке технологии изготовления литейной формы из керамических стержней для стальных отливок нефтегазового комплекса, обеспечивающей высокую точность геометрии, низкую шероховатость литых поверхностей и требуемое качество отливок.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведен сбор и анализ литературных источников по тематике исследования. Выявлена необходимость разработки технологии производства литейных форм из керамических стержней для крупных стальных отливок, обеспечивающей высокое качество поверхности литых изделий. Разработана методика определения склонности литейной формовочной керамики к образованию в процессе отверждения суспензии в оснастке трещин и качества поверхности керамических стержней.

2. На основании экспериментальных данных определены математические зависимости скорости огеливания и гелеобразования от параметров гидрализованного раствора ЭТС40. Разработан рациональный состав гидролизованного раствора этилсиликатного связующего. Установлены следующие параметры: условное содержание  $\text{SiO}_2$  составляет 24 – 25 %, соотношение  $\text{H}=\text{H}_2\text{O}/\text{OC}_2\text{H}_5$  составляет 0,4 – 0,45, содержание катализатора составляет 2,2 – 2,4 % от объема гидролизованного раствора этилсиликата. Разработанный состав позволяет обеспечить время огеливания (перехода в студень) – 3,5 мин и время гелеобразования (полное затвердевание) – 7 мин. Длительное пластичное состояние стержня обеспечивает качественное извлечение оснастки из стержня (формы) без ее разрушения.

3. В качестве огнеупорного наполнителя суспензии выбран вместо импортного Kerfalite муллитизированный материал марки ШК-42, который по своим свойствам обеспечивает наилучшее сочетание прочности,

геометрической точности, высокого качества поверхности и минимальной склонности к образованию трещин получаемых стержней. Рациональное содержание ШК-42 (ТУ 5729-002-31199308-2016) мелкой фракции составляет 52 – 55 мас. %.

4. Изучено влияние технологической добавки (пеногасителя) на структуру и свойства керамических стержней. Определен рациональный момент введения пеногасителя в суспензию (после добавления огнеупорного наполнителя и до введения катализатора). Установлено необходимое количество пеногасителя марки «Пента 462А» в количестве 0,8 – 1,0 % от объема керамической суспензии для эффективного подавления процесса пенообразования в керамической суспензии и отсутствия негативного влияния этой добавки на основные технологические свойства керамической суспензии и получаемых стержней.

5. Влияние различных факторов на свойства керамической суспензии и стержней оценивали путем определения и анализа уравнений регрессии. Установлено, что доминирующим фактором является условное содержание  $\text{SiO}_2$  в гидролизованном растворе этилсиликата, эффективная концентрация которого составляет 24 – 25 мас. %.

Рациональные параметры: условное содержание  $\text{SiO}_2$  – 24 – 25 мас. %; количество жидкой фазы в керамической суспензии – 24 – 28 мас. %; количество мелкой фракции в керамической суспензии – 52 – 55 мас. %. К мелкой фракции отнесен размер 0 – 0,16 мм.

6. Методом растровой электронной микроскопии установлено, что округлая форма частиц исследуемых муллитизированных материалов в соотношении между зернистой и пылевидной составляющих 1 к 2,4, а также соотношение между связующим и наполнителем 1 к 3 обеспечивает формирование структуры керамических стержней с мелкой сеткой трещин. Такая структура является определяющей повышение прочности и требуемую газопроницаемость литейных форм из керамических стержней.

7. Рентгенофазовым анализом определено, что применяемый наполнитель состоит из 72 % муллита и 28 % кристобалита, а фазовый состав керамических стержней представлен 71,8 % муллита, 20,9 % кристобалита, 6,1 % кварца и 1,2 % силлиманита. Наличие в составе фазы муллита, не имеющей полиморфных превращений в процессе прокалики керамических стержней обеспечило КТЛР  $5,1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$  и высокую геометрическую точность отливок.

8. Дериватографическим анализом установлено, что начиная с температуры 800 °С практически отсутствуют изменения массы и энтальпии, что позволило рекомендовать режимы прокалики керамических стержней при температуре 800 – 850 °С в течение 3 – 4 часов.

9. На основании проведенных исследований разработана технология получения литейных форм из керамических стержней для стальных сложнопрофильных отливок. Анализ опытно-промышленной партии отливок «Колесо рабочее» показал уменьшение преобладающих отклонений геометрии по отношению к аналогичным отливкам, произведенным по базовой технологии с  $\pm 2$  до  $\pm 1$  мм, а максимальных отклонений с 4,2 до 2,2 мм. Шероховатость поверхности полученных опытных отливок составляет Rz40. Отливки, полученные по используемой ранее технологии, имели шероховатость поверхности Rz80.

10. По результатам контроля механических и металлографических свойств, а также по данным неразрушающего контроля партия опытных отливок типа «Колесо рабочее» из стали 20ГЛ, изготовленных в формах из керамических стержней признана годной и по всем параметрам соответствует ТИ КН-25210-14001. За счет применения отечественных муллитизированных материалов и разработанной технологии достигается снижение прямых затрат на изготовление формы на 63,2 % и полной цеховой себестоимости на 14,0 %.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Елисеев, Б.М. Расчет деталей центробежных насосов (справочное пособие) / Б.М. Елисеев. – М.: Машиностроение, 1975. – 208 с.
2. Ломакин, А.А. Центробежные и осевые насосы / А.А. Ломакин. – Ленинградское отделение издательства «Машиностроение», 1966. – 364 с.
3. Телепнева, А.В. Запорно-регулирующая арматура / А.В. Телепнева, Д.Д. Дымочкин, М.В. Телепнев // Молодой исследователь Дона. – 2018. – № 5(14). – С. 116–121.
4. Степанов, Л.И. Центробежные и осевые насосы / Л.И. Степанов; под ред. д-ра техн. наук, проф. В.И. Поликовского. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. – 464 с.
5. Айзенштейн, М.Д. Центробежные насосы для нефтяной промышленности / М.Д. Айзенштейн. – М.: Гостоптехиздат, 1957. – 363 с.
6. Пфлейдерер, К. Лопаточные машины для жидкости и газов / К. Пфлейдерер; под ред. д-ра техн. наук, проф. В.И. Поликовского. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. – 685 с.
7. ГОСТ 24297-2013. Верификация закупленной продукции. – М.: Стандартиформ, 2019. – 16 с.
8. Мельников, А.П. Особенности изготовления и классификации отливок по технологической сложности / А.П. Мельников, М.А. Садоха // Литье и металлургия. – 2007. – № 1 (41). – С. 88–92.
9. ГОСТ 13354-91. Комплекты модельные деревянные. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 1991. – 12 с.
10. Тер-Матеосянц, И.Т. Импортзамещение трубопроводной арматуры в Российском нефтегазовом секторе / И.Т. Тер-Матеосянц // Деловой журнал NEFTFAZ.RU. – 2016. – №4 (52). – С. 50–52.
11. Буданов, Е.Н. Производство отливок арматуры (вентили, задвижки, фитинги, клапаны) //Е.Н. Буданов // Литейщик России. – 2005. – №10. – С. 11–18.

12. Znamenskiy, L.G. Manufacture of Ceramic Molds and Core from Inorganic Materials Using Permanent / L.G. Znamenskiy, O.V. Ivochkina, T.V. Stepanova // International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology. – 2020. – V. 969, № 1. – P. 1–5.

13. Можайцев, В.В. Импортозамещение отливок и модернизация литейного производства России / В.В. Можайцев, В.Ю. Пирайнен // Литейщик России. – 2015. – № 7. – С. 36–43.

14. Ткаченко, С.С. О формировании прочности керамических форм для художественного литья / С.С. Ткаченко, В.О. Емельянов, К.В. Мартынов // Литейное производство. – 2019. – № 6. – С. 29–31.

15. Верцюх, С.С. Точное формообразование с использованием алюмоборфосфатного концентрата для художественного литья по выплавляемым моделям / С.С. Верцюх, Л.Г. Знаменский // Наука ЮУрГУ. – 2011. – С. 112–116.

16. Стрюченко, А.А. Керамические формы в точном литье / А.А. Стрюченко, Э.В. Захарченко. – М.: Машиностроение, 1988. – 128 с.

17. Варламов, А.С. Технологические процессы ускоренного формообразования в литье по выплавляемым моделям: дис. канд. техн. наук: 05.16.04 / Варламов Алексей Сергеевич. – Челябинск, 2011. – 192 с.

18. Pattnaik, S. Developments in investment casting process / S.Pattnaik, D.V. Karunakar, P.K. Jha. // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – V. 212, №111. – P. 2332–2348.

19. Разработка ресурсосберегающей технологии получения крупногабаритных отливок из титановых сплавов / А.О. Деменов, А.А. Ганеев, О.Б. Деменов и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2015. – №15(2). – С. 20–25.

20. Ордин, Д.А. Перевод технологии литья по выплавляемым моделям в авиастроении на керамику, полученную с использованием связующих на водной основе: обзор выполненных исследований / Д.А. Ордин,

Е.Н. Новокрещенных, В.З. Пойлов, Н.П. Углев // Вестник ПНИПУ. – 2016. – №3. – С. 59–74.

21. Анализ свойств суспензии и керамики для литья по выплавляемым моделям, полученных на отечественных связующих на водной основе / В.Е. Баженов, Е.П. Ковышкина, А.В. Санников и др. // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2023. – Т.29. – №2. – С. 15–28.

22. Лысенко, Т.В. Концепция управления формообразованием отливок: монография / Т.В. Лысенко, В.В. Ясюков, И.В. Прокопович. – Одесса: Экология, 2019. – 272 с.

23. An overview of ceramic molds for investment casting of nickel superalloys / E.K. Janos, S. Schaffoner, R.S. Uwanyuze, K.S. Leary // Journal of the European Ceramic Society. – 2020. – V. 40, №15. – P. 4955–4973.

24. Гутько, Ю.И. Формовочные и стержневые технологии в художественном литейном производстве / Ю.И. Гутько, В.В. Войтенко // Внедрение передового опыта и практическое приложение результатов инновационных результатов. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Агентство международных исследований» – 2022. – С. 84–89.

25. Jones, S. Advances in shell moulding for investment casting / S. Jones, C. Yuan // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – V. 135. – P. 258–265.

26. Wisniewski, P. Effect of adding water-based binders on the technological properties of ceramic slurries based on silicon carbide / P. Wisniewski, M. Malec, J. Mizera, K. Kurzydowski // Materials and technology. – 2017. – V. 51. – P. 225–227.

27. Saridikmen, H. Properties of ceramic casting molds produced with two different binders / H. Saridikmen, N. Kuskonmaz // Ceramics International. – 2005. – V. 31, №6. – P. 873–878.

28. Wisniewski, P. Polymer binders of ceramic nanoparticles for precision casting of nickel-based superalloys / P. Wisniewski // *Nanomaterials*. – 2021. – V. 11(7). – 171 p.

29. Чернов, В.П. Исследование живучести огнеупорных суспензий на основе ЭТС-40 / В.П. Чернов, Е.А. Сафонова // *Литейщик России*. – 2014. – № 11. – С. 29–32.

30. ЭТС-32 ТУ 2435-397-05763441-2003.

31. ЭТС-40 ТУ 2435-427-05763441-2004.

32. Халтурина, Д.В. Связующие компоненты для литья по выплавляемым моделям / Д.В. Халтурина, Д.Е. Бушуев, А.П. Родзевич // *Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов IX Международной научно-практической конференции, 24 – 26 мая 2018 г., Юрга*. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 139–141.

33. Лакеев, А.С. Прогрессивные способы изготовления точных отливок / А.С. Лакеев. – Киев: Техніка, 1984. – 160 с.

34. Jones, S. Organic fibre modified ceramic shell for investment casting / S. Jones, C. Yuan, K. Lewis // *Materials science and technology*. – 2002. – V. 18 (12). – P. 1565–1573.

35. ГОСТ 2138-91. Пески формовочные общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2005. – 8 с.

36. Яроцкая, Е.Г. Муллит и его изоморфные замещения: обзор / Е.Г. Яроцкая, П.П. Федоров // *Конденсирование среды и межфазные границы*. – 2018. – Т. 20. – №4. – С. 537–544.

37. Логвинков, С.М. Муллит и соединения группы силлиманита в технологии керамики огнеупоров / С.М. Логвинков // *Вісник Національного технічного університету ХП. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. – 2017. – №49. – С. 39–48.

38. Точное литье в муллитизированные керамические формы / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, Т.В. Степанова, Д.С. Пыхов // *Литейщик России*. – 2022. – №7. – С. 23–29.

39. Знаменский, Л.Г. Точные отливки для нефтегазового машиностроения / Л.Г. Знаменский, Т.В. Степанова, Н.А. Захаров // Литейщик России. – 2024. – №4. – С. 21–28.

40. Толкачева, А.С. Общие вопросы технологии тонкой керамики: учебное пособие / А.С. Толкачева. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 184 с.

41. Конструкционные особенности трещиностойких керамических оболочек для получения литых заготовок в машиностроении / И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров и др. // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11. – С. 739–743.

42. ГОСТ 29234.3-91. Пески формовочные. Метод определения среднего размера зерна и коэффициента однородности. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. – 7 с.

43. Исследование составов керамических стержней на основе плавленного кварца и технологии их изготовления / Л.И. Рассохина, О.Н. Битюцкая, М.В. Гамазина и др. // Труды ВИАМ. – 2021. – № 1 (95). – С. 34–42.

44. ГОСТ 9070-75. Вискозиметры для определения условий вязкости лакокрасочных материалов. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1975. – 11 с.

45. ГОСТ 9980.2-2014 Материалы лакокрасочные и сырье для них. Отбор проб, контроль и подготовка для испытаний. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.

46. ГОСТ 23408-78. Смеси формовочные и стержневые. Методы отбора и подготовки проб. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. – 4 с.

47. ГОСТ 23409.7-78. Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Методы определения прочности при сжатии, растяжении, изгибе и срезе. – М.: Государственный стандарт союза СССР, 1980. – 6 с.

48. Пушаровский, Д.Ю. Рентгенография минералов / Д.Ю. Пушаровский. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 292 с.

49. Ковба, Л.М. Рентгенофазовый анализ / Л.М. Ковба, В.К. Трунов. – М.: Издательство Московского университета, 1976. – 18 с.

50. Панкратьев, П.В. Лабораторные методы исследования минерального сырья: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 130301 «Геологическая съемка. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых» направления 130300 «Прикладная геология» (решение № 22-14 УМО/42 от 22.09.08 г.) / П.В. Панкратьев, Г.А. Пономарева. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. – 133 с.

51. Лотов, В.А. Дилатометрический анализ силикатных материалов: методические указания к лабораторному практикуму и самостоятельной работе студентов по курсу «Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» / В.А. Лотов, Т.А. Хабас, Е.А. Кулинич. – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – 20 с.

52. Алешина, К.Д. Термический анализ как метод исследования токсичности строительных материалов / К.Д. Алешина, Л.Р. Шарифуллина, Е.Н. Глотов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2015. – №1. – С. 115–118.

53. Выбор метода контроля геометрических размеров детали при производстве геодезической продукции / С.А. Искаче, А.Н. Совков, А.Л. Яркин и др. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – №10. – С. 102–111.

54. Технология лазерного сканирования в 3D-проектировании / И.К. Киямов, Р.Х. Мингазов, А.Ф. Музафаров и др. // Экспозиция нефть газ. – 2013. – №7(32). – С. 41–43.

55. Кулеш, А.А. Возможности и преимущества лазерного сканирования при 3D-проектировании промышленных объектов / А.А. Кулеш // Инновации и инвестиции. – 2023. – №2. – С. 265–267.

56. Зуева, Е.С. Тенденция внедрения 3D-сканирования в судостроение / Е.С. Зуева, О.К. Зяблов // Труды 21-го международного научно-промышленного форума. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2019. – 19 с.

57. ГОСТ 3118-77. Кислота соляная. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1984. – 14 с.

58. ГОСТ 9805-84 с изм. №1. Спирт изопропиловый. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1984. – 18 с.

59. ТУ 2257-058-402450042-2003. Пенoгерметик "Пенталаст-740". Технические условия от 15 апреля 2003 г. № 2257-053-40245042-2003.

60. ГОСТ 20841.1-75 с изм. №1. Продукты кремнийорганические. Методы определения внешнего вида и механических примесей – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1976. – 3 с.

61. Конструкционные особенности трещиностойких керамических оболочек для получения литых заготовок в машиностроении / И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров и др. // Фундаментальные исследования. – 2015. – №11. – С. 739–743.

62. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: монография / под ред. С.Н. Леоновича. – Минск: БНТУ, 2016. – 393 с.

63. ГОСТ 13873-81. Изоляторы керамические. Требования к качеству поверхности. – М.: Государственный комитет по стандартам СССР, 1981. – 6 с.

64. Щекин, А.В. Определение склонности сплавов к образованию трещин при затвердевании / А.В. Щекин, С.Н. Химухин. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. ун-та, 1998. – 14 с.

65. Осипович, Д.А. Разработка технологического процесса контроля деталей типа «Рабочее колесо» с использованием оптических методов измерения / Д.А. Осипович // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2. – С. 184–188.

66. Свойства керамических суспензий на основе водно-коллоидных связующих / Н.П. Углев, В.З. Пойлов, В.П. Звездин и др. // Литейное производство. – 2016. – №3. – С. 21–25.

67. Знаменский, Л.Г. Процессы ускоренного формообразования в литье по выплавляемым моделям: монография / Л.Г. Знаменский, А.С. Варламов. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2014. – 245 с.

68. Ермоленко, А.А. «Неорганика» – обсыпка для оболочек при литье по выплавляемым моделям / А.А. Ермоленко, Л.Г. Знаменский, С.С. Ткаченко // Литейное производство. – 2021. – №9. – С. 15–17.

69. Ермоленко, А.А. Прогрессивные процессы формообразования на неорганических связующих / А.А. Ермоленко, Л.Г. Знаменский, С.С. Ткаченко // Литейное производство. – 2021 – №11. – С. 9–15.

70. Ермоленко, А.А. Холоднотвердеющие смеси на алюмоборфосфатном концентрате. Состояние и перспективы развития (неорганика против органики) / А.А. Ермоленко, С.С. Ткаченко, Г.А. Колодий // Литейное производство. – 2021. – С. 16–20.

71. Термомеханические свойства керамик для литья по выплавляемым моделям / Н.П. Углев, В.З. Пойлов, А.В. Шилов // Литейное производство. – 2014. – №5. – С. 16–20.

72. Kolczyk, J. Rheological properties of ceramic slurries with colloidal binders used in the investment casting technology / J. Kolczyk, J. Zych // Metalurgija. – 2013. – V. 52. – P. 55–58.

73. Муркина, А.С. Связующие растворы в производстве литья по выплавляемым моделям / А.С. Муркина // Литейщик России. – 2013. – №2. – С. 14–16.

74. Дошкарж, И. Производство точных отливок: пер. с чеш. / И. Дошкарж, М. Гоушть, М. Павелка. – М.: Машиностроение, 1979. – 296 с.

75. Литье по выплавляемым моделями / под ред. Я. И. Шкленника и В.А. Озерова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1971. – 436 с.

76. Литье по выплавляемым моделям / В.Ф. Гаранин, В.Н. Иванов, С.А. Казеннов и др.; под общ. ред. В.А. Озерова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностр., 1994. – 448 с.

77. Халтурина, Д.В. Связующие компоненты для литья по выплавляемым моделям / Д.В. Халтурина, Д.Е. Бушуев, А.П. Родзевич // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов IX Международной научно-практической конференции, 24 – 26 мая 2018 г., Юрга. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 139–141.

78. Макарова, Н.В. Статистика в Excel: учебное пособие / Н.В. Макарова, В.Я Трофимец. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 386 с.

79. Алиева, Ж.Р. Метод наименьших квадратов на основе «MS Excel» для обработки экспериментальных данных / Ж.Р. Алиева // Наука и мир. – 2016. – №3 (30). – С. 43–47.

80. Сыркин, А.М. Дисперсные системы в нефтепромысловом деле: учебное пособие / А.М. Сыркин. – Уфа: УГНТУ, 2005. – 92 с.

81. Ткаченко, С.С. Современные материалы и технологии в производстве художественного литья / С.С. Ткаченко, В.О. Емельянов, К.В. Мартынов // Литье и металлургия. – 2021. – №3. – С. 78–81.

82. Modification of ceramic mold for investment casting with silica sand as stucco and neylon addition / В.Т. Sofyan, М. Syahid, Н.А. Khairuddin, R. Nurdin // Advanced materials research. – 2015. – V. 1112. – P. 510–514.

83. Кондраков, Н.П. Бухгалтерский управленческий учет: учебное пособие / Н.П. Кондраков, М.А. Иванова. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. – 352 с.

84. Ордынская, М.Е. Выбор метода и системы учета затрат на производство и калькулирование себестоимости продукции / М.Е. Ордынская, З.Р. Ситимов // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Экономика. – 2017. – №3 (205). – С. 77–90.

85. Кемкина, Н.В. Учет и контроль производственных затрат предприятия / Н.В. Кемкина, А.И. Шелудякова // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2019. – № 12-3 (39). – С. 72–75.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент РФ № 2748251

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2748251****Способ изготовления керамических форм и стержней по постоянным моделям**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)" ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)" (RU)*

Авторы: *Знаменский Леонид Геннадьевич (RU), Ивочкина Ольга Викторовна (RU), Степанова Татьяна Викторовна (RU), Ермоленко Андрей Александрович (RU), Шелков Владимир Михайлович (RU)*

Заявка № 2020119184

Приоритет изобретения **02 июня 2020 г.**Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации **21 мая 2021 г.**Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **02 июня 2040 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент РФ №2760029

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2760029****Способ изготовления керамических форм и стержней по постоянным моделям**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (RU)*

Авторы: *Знаменский Леонид Геннадьевич (RU), Ивочкина Ольга Викторовна (RU), Степанова Татьяна Викторовна (RU), Ермоленко Андрей Александрович (RU), Захаров Никита Андреевич (RU), Старшинов Владислав (RU)*

Заявка № 2021117096

Приоритет изобретения 11 июня 2021 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 22 ноября 2021 г.Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 11 июня 2041 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

## Акт промышленных испытаний

Утверждаю  
Заместитель главного технолога  
ООО «БВК»

«    »

Саватеев С.В.  
2022 г

БВК

БВК

**АКТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ**  
результатов научно-исследовательской работы

НАИМЕНОВАНИЕ НИР: Точное стальное литье в муллитизированные керамические формы.

ЦЕЛЬ НИР: Повышение качества и экономической эффективности производства точных стальных отливок ответственного назначения.

СОДЕРЖАНИЕ НИР:

Методом дилатометрии обосновано повышение точности керамических форм с муллитсодержащим наполнителем (КТЛР в интервале температур 20-1000 °С составляет  $5,2 \cdot 10^{-6}$  1/°С). Дериватографическими исследованиями определен рациональный режим прокалики форм в точном литье стальных отливок ответственного назначения. Растровой электронной микроскопией изучена структура керамических образцов. Методом 3D-сканирования подтверждена геометрическая точность отливок «Колесо рабочее» из легированной стали. Определены физико-механические свойства муллитизированных керамических форм.

РЕЗУЛЬТАТЫ НИР:

Установлено повышение прочности керамических форм с отечественным муллитизированным наполнителем. Достигнуто импортозамещение формовочных материалов за счет замены керфалита иностранных поставщиков (284 000 руб./т) на отечественные муллитсодержащие наполнители (15 000 руб./т). Обеспечено повышение точности стальных отливок ответственного назначения, изготовленных литьем в объемные муллитизированные керамические формы.

От ООО «БВК»:

Ведущий инженер-технолог \_\_\_\_\_ В.К. Гажа

От ФГАОУ ВПО «ЮУрГУ (НИУ)»:

Доктор технических наук, профессор,  
академик РАЕН, профессор кафедры  
«Пирометаллургические и литейные технологии» \_\_\_\_\_ Л.Г. Знаменский

Кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Пирометаллургические и литейные технологии» \_\_\_\_\_ О.В. Ивочкина

Аспирант кафедры  
«Пирометаллургические и литейные технологии» \_\_\_\_\_ Т.В. Степанова

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

## Акт внедрения результатов НИР

Утверждаю  
Заместитель главного технолога  
ООО «БВК»

Саватеев С.В.  
«    »    2022 г



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**  
результатов научно-исследовательской работы

**НАИМЕНОВАНИЕ НИР:** Отечественный муллитизированный наполнитель керамических форм в точном литье

**ЦЕЛЬ НИР:** Повышение качества и экономической эффективности производства точных стальных отливок ответственного назначения.

**СОДЕРЖАНИЕ НИР:**

Рентгенофазовым анализом определено содержание муллита в исследуемом отечественном наполнителе в пределах 72...75 %. Установлены рациональные параметры дисперсности формовочных материалов, составы суспензий с муллитизированным наполнителем, способы их вакуумной обработки. Определены физико-механические свойства муллитизированных керамических форм. Методом дилатометрии обосновано повышение точности керамических форм с муллитсодержащим наполнителем (КТЛР в интервале температур 20-1000 °С составляет  $5,2 \cdot 10^{-6}$  1/°С). Дериватографическими исследованиями определен рациональный режим проковки форм в точном литье стальных отливок ответственного назначения. Растровой электронной микроскопией изучена структура керамических образцов. Методом 3D-сканирования подтверждена геометрическая точность отливок.

**РЕЗУЛЬТАТЫ НИР:**

Установлено повышение прочности и точности керамических форм с отечественным муллитизированным наполнителем. Достигнуто импортозамещение формовочных материалов за счет замены керфалита иностранных поставщиков (284 000 руб./т) на отечественные муллитсодержащие наполнители (15 000 руб./т). В производство сложнопрофильных отливок из легированных сталей внедрен отечественный муллитизированный наполнитель. При этом обеспечено повышение точности стальных отливок ответственного назначения, изготовленных литьем в объемные муллитизированные керамические формы.

От ООО «БВК»:

Ведущий инженер-технолог \_\_\_\_\_ В.К. Гажа

От ФГАОУ ВПО «ЮУрГУ (НИУ)»:

Доктор технических наук, профессор,  
академик РАЕН, профессор кафедры  
«Пирометаллургические и литейные технологии» \_\_\_\_\_ Л.Г. Знаменский

Кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Пирометаллургические и литейные технологии» \_\_\_\_\_ О.В. Ивочкина

Аспирант кафедры  
«Пирометаллургические и литейные технологии» \_\_\_\_\_ Т.В. Степанова