

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСИС»

На правах рукописи

Ковышкина Елена Павловна

Исследование и разработка технологии изготовления керамической  
оболочки на водном связующем для получения крупногабаритных  
отливок ответственного назначения из жаропрочного никелевого  
сплава ВЖЛ14Н-ВИ

2.6.3 – «Литейное производство»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., профессор  
Белов Владимир Дмитриевич

Москва, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ .....	12
1.1 Керамические оболочки для изготовления отливок из жаропрочных никелевых сплавов .....	15
1.2 Технология изготовления керамических оболочек с использованием в качестве связующего гидролизованного раствора этилсиликата .....	19
1.3 Технология изготовления керамических оболочек с использованием водных связующих.....	23
1.4 Материал моделей для получения крупногабаритных керамических форм .....	26
1.4.1 Применение выжигаемых моделей для получения крупногабаритных форм.....	26
1.4.2 Использование карбамида для изготовления крупногабаритных моделей .....	27
1.4.3 Применение восков в качестве материала для изготовления крупногабаритных моделей .....	30
1.5 Выводы по литературному обзору .....	32
ГЛАВА 2. ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ	34
2.1 Исходные материалы .....	34
2.2 Определение физических и технологических параметров исходных материалов и керамической оболочки.....	35
2.3 Определение свойств моделей на основе карбамида .....	39
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	43
3.1 Оценка влияния огнеупорного материала и связующего на свойства суспензии .....	43
3.2 Вязкость связующих и суспензии .....	45

3.3 Прочность керамической оболочки .....	48
3.4 Шероховатость формообразующей поверхности керамической оболочки .....	49
3.5 Пористость керамической оболочки.....	51
3.6 Определение влияния времени прокали на свойства керамической оболочки.....	52
3.7 Исследование текучести наполненных восков .....	58
3.8 Исследование влияния добавок на свойства водорастворимых модельных составов .....	62
3.9 Смачиваемость водным связующим Ultracast One+ материала модельных композиций на основе карбамида .....	67
3.10 Разработка защитного покрытия поверхности карбамидной модели от контакта с водой .....	70
3.11 Исследование поверхности керамической оболочки после заливки жаропрочным никелевым сплавом ВЖЛ14Н-ВИ.....	72
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖЛ14Н-ВИ .....	79
ГЛАВА 5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВКИ «КОРПУС НАРУЖНЫЙ» ИЗ СПЛАВА ВЖЛ14Н-ВИ В УСЛОВИЯХ ПАО «ОДК-КУЗНЕЦОВ» С ПРИМЕНЕНИЕМ КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ НА БАЗЕ СОЛЕВОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ КАРБАМИДА И ВОДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО .....	82
5.1 Основные этапы технологического процесса изготовления отливки «Корпус наружный».....	83
5.1.1 Приготовление суспензии для первых слоёв керамической оболочки ..	83

5.1.2 Приготовление суспензии для третьего и последующих слоев керамической оболочки.....	83
5.2 Этапы технологического процесса изготовления керамической оболочки на базе солевой модели на основе карбамида и водного связующего, реализованные в рамках опытно-промышленного опробования при изготовлении отливки «Корпус наружный» из сплава ВЖЛ14Н-ВИ .....	84
5.3 Приготовление расплава ВЖЛ14Н-ВИ и его заливка в керамическую литейную форму .....	88
5.4 Финишные операции при изготовлении отливки «Корпус наружный» из сплава ВЖЛ14Н-ВИ.....	89
5.5 Контроль качества отливки на соответствие требованиям нормативной документации.....	89
ВЫВОДЫ.....	94
Приложение А .....	110
Приложение Б.....	112

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность работы

Отливки из жаропрочных никелевых сплавов играют важную роль в авиационной отрасли, особенно в производстве двигателей. Чтобы обеспечить прогресс в этой области, необходимо постоянно совершенствовать существующие технологии литья.

В настоящее время многие предприятия стремятся не только повысить качество отливок, но и увеличить объёмы их производства. Также актуальным является переход к экологичному и ресурсосберегающему производству, которое подразумевает минимизацию вредных веществ и рациональное использование ресурсов.

В настоящее время для получения отливок высокой точности с минимальным припуском на механическую обработку используется способ литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) в керамические оболочковые формы. Этот способ позволяет получать отливки из различных жаропрочных, коррозионностойких и специальных сплавов массой от нескольких грамм до сотен килограмм с толщиной стенки до 0,5 мм и шероховатостью Rz до 10 мкм. Получаемые отливки максимально приближены по геометрии к готовой детали, что крайне важно при литье крупногабаритных отливок ответственного назначения типа «Корпус наружный» с габаритными размерами более 1000 мм. Отливки такого рода изготавливаются из жаропрочного никелевого сплав типа ВЖЛ14Н-ВИ, при этом масса получаемой отливки без литниково-питающей системы составляет более 100 кг, а керамической формы для её получения – до 500 кг, что очень сильно усложняет процесс её изготовления.

Для получения тонкостенных крупногабаритных отливок по технологии ЛВМ широко используют модели из карбамида, поскольку они обеспечивают высокую прочность, за счёт низкой усадки модели обладают высокой размерной точностью. Традиционно в качестве связующего материала для получения крупногабаритных керамических форм используется гидролизированный раствор

этилсиликата (ГЭТС) I-типа, который не содержит химически свободную воду и позволяет получать керамические оболочки высокой прочности. Однако данный материал обладает низкой живучестью - от 2 до 7 суток, это требует частого приготовления новой партии связующего, что в свою очередь снижает производительность труда при серийном изготовлении отливок. Операция гидролиза связующего происходит в присутствии органических растворителей, которые зачастую являются токсичными и пожароопасными. Также гидролизованный раствор этилсиликата I-типа на воздухе твердеет обратимо, поэтому сушку связующего проводят в парах аммиака, который ухудшает экологическую обстановку в литейных цехах.

Таким образом, разработка экологичной и ресурсосберегающей технологии изготовления керамических форм для получения крупногабаритных отливок из жаропрочных никелевых сплавов является весьма актуальной задачей литейного производства.

Использование связующего на водной основе даёт возможность роботизации и автоматизации производства изготовления крупногабаритных керамических оболочек за счёт длительной живучести суспензии (до одного года) и отсутствия токсичных, пожароопасных компонентов. Однако применение связующих на водной основе усложняет процесс получения керамических оболочковых форм с использованием модельных составов на основе карбамида, поскольку связующее содержит большее количество химически не связанной воды по сравнению с гидролизованным раствором этилсиликата. Наличие химически не связанной воды в связующем приводит к растворению поверхности модели, при этом получение качественной керамической оболочки становится затруднительным.

Традиционно для получения керамических форм на базе водного связующего используются восковые модели, которые не вступают во взаимодействие с водой, однако получение крупногабаритных восковых моделей требует спецоборудования, которое не производится в России. Поэтому в условиях санкций есть целесообразность в разработке технологии получения

керамических форм на базе водного связующего и модельной композиции на основе карбамида.

**Целью работы** является разработка технологии получения керамических форм на базе водного связующего и модельной композиции на основе карбамида для получения крупногабаритных отливок ответственного назначения из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ14Н-ВИ.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- Определить основные технологические свойства суспензии и керамической оболочки, изготовленной с использованием связующего на водной основе;

- Исследовать процессы взаимодействия между суспензией, приготовленной на основе водного связующего, и модельным составом на основе карбамида;

- Провести научно обоснованный выбор оптимальных режимов изготовления керамической оболочки при использовании модели из карбамида и водного связующего;

- Исследовать технологические и физические свойства наполненных восков;

- Опробовать в производственных условиях технологию изготовления керамических форм с применением модельного состава на основе карбамида и водного связующего для получения тонкостенных крупногабаритных отливок ответственного назначения из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ14Н-ВИ.

### **Научная новизна**

1. Выявлена зависимость условной вязкости суспензии от количества вводимого связующего (BT13-02У, Ставроформ ВС, UltraCast One+ и UltraCast Prime) при постоянном количестве наполнителя ПКП 0,045. Установлено, что она монотонно уменьшается с 326 до 15 с при увеличении количества связующего с 400 до 600 мл на 1 кг наполнителя ПКП 0,045, при этом оптимальным количеством является соотношение 1 кг наполнителя к 500 мл связующего.

2. Установлено образование в керамической оболочке после контакта с жаропрочным никелевым сплавом, кроме аморфной фазы, кристобалита и тридимита.

3. Выявлено, что полиморфным превращением в большей степени подвержен материал связующего (водное связующее Ultracast Prime), чем обсыпочный материал (плавленный кварц), при этом связующее ведет себя как кристаллический  $\text{SiO}_2$  и испытывает полиморфные превращения при  $600\text{ }^\circ\text{C}$  и в интервале температур  $900\text{-}1200\text{ }^\circ\text{C}$ .

4. Установлено, что добавка 2 % поливинилового спирта в модельную композицию на основе карбамида способствует увеличению ее прочности и линейной усадки на 10 % и 0,1 %, соответственно. При этом растворимость модельной композиции в воде снижается на 50 %.

5. Добавки  $\text{MgSO}_4$  и  $\text{KNO}_3$  в модельную композицию на основе карбамида обеспечивают снижение краевого угла смачивания водным связующим до  $18,9^\circ$  и  $22,7^\circ$ , соответственно. Добавка поливинилового спирта (ПВС) в модельные композиции на основе карбамида повышает краевой угол смачивания до  $38,8^\circ$ .

6. Разработана методика определения текучести модельного воска в процессе запрессовки. С помощью разработанной методики установлено, что текучесть наполненных восков RG20, S1235 и S1135 зависит от температуры и давления впрыска. При этом выявлена линейная зависимость текучести воска от давления и температуры впрыска. Снижение температуры с  $90\text{ }^\circ\text{C}$  до  $60\text{ }^\circ\text{C}$  увеличивает динамическую вязкость воска более чем в 10 раз, что является основной причиной падения текучести воска с понижением температуры запрессовки.

### **Практическая значимость**

1. Разработаны рекомендации по технологии изготовления керамической оболочки с использованием модели на основе карбамида, водных

связующих ВТ13-02У, Ставроформ ВС, UltraCast One+ и UltraCast Prime и плавленного кварца в качестве материала обсыпки.

2. Сконструирована и изготовлена проба для определения жидкотекучести наполненных восков, которая обеспечивает спокойное течение воска при запрессовке.

3. Исследованы свойства экспериментальных составов модельной композиции на основе карбамида с добавками сульфата магния, нитрата калия, поливинилового спирта и диметилглиоксима.

4. Разработаны составы покрытий, способных защитить модельные композиции на основе карбамида от взаимодействия со связующим на водной основе.

5. В лабораторных и производственных условиях опробована технология получения керамических оболочек с использованием модели на основе карбамида и водного связующего, которая позволяет получать крупногабаритные тонкостенные отливки ответственного назначения из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ14Н-ВИ в условиях санкций и дефицита специального оборудования для запрессовки крупногабаритных (более 1200 мм) тонкостенных (до 5 мм) восковых моделей в России (Приложение А, Приложение Б).

### **Апробация работы**

Опыт изготовления керамических тиглей методом шликерного виброформования для плавки никелевых сплавов / Ковышкина Е.П., Фадеев А.В. // В сборнике: Прогрессивные литейные технологии. Труды X Международной научно-технической конференции. Москва, 2020 С. 257-262.

Опыт изготовления керамических тиглей методом шликерного виброформования для плавки никелевых сплавов / Ковышкина Е.П., Фадеев А.В., Белов В.Д. // В сборнике: Прогрессивные материалы и технологии изготовления заготовок. Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых. Рыбинск, 2021 С. 30-33.

Устный доклад на XI Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (г. Москва, 9-11 ноября 2022 г.) на тему: «Исследование влияния вязкости суспензии и фракции огнеупорного наполнителя на прочностные характеристики форм для литья по выплавляемым моделям на водных связующих» (Секция № 2. «Теория и практика производства отливок из стали и чугуна»).

Исследование эффективности защитных составов для растворимых солевых моделей применяемых при изготовлении керамических форм / Баженов В.Е., Санников А.В, Ковышкина Е.П., Колтыгин А.В. // В сборнике: Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении. Материалы Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых. Самара, 2023 С. 249-256.

### **Публикации**

По результатам научной работы опубликовано 8 печатных работ, в том числе одна статья в издании, входящем в базы Web of Science, Scopus; три – в изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК РФ, две – в журналах РИНЦ и 2 патента РФ.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность подтверждается использованием современного научно-исследовательского оборудования и применением методов исследований согласно межгосударственным стандартам, значительным количеством экспериментальных данных и сопоставлением полученных результатов с данными других авторов. Текст научной работы проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

### **Личный вклад автора**

Диссертация представляет собой законченную научную работу, в которой приведены результаты исследований, полученные автором лично и в соавторстве. Работы по получению, в т.ч. в промышленных условиях, экспериментальных

данных и их обработке, анализу и обобщению велись автором работы лично или при его непосредственном участии. Совместно с научным руководителем и соавторами публикаций велось последующее обсуждение и интерпретация полученных результатов. Основные положения и выводы по диссертационной работе были сформулированы автором.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов и списка использованной литературы.

## ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Непрерывное развитие авиационной отрасли в части создания новых и модернизации существующих газотурбинных двигателей потребует как разработки новых, так и совершенствование уже имеющихся технологий получения деталей. Большинство деталей газотурбинных двигателей изготавливаются из различных жаропрочных, коррозионностойких и специальных сплавов. Как правило, для изготовления деталей используются никелевые жаропрочные сплавы, которые за счет своей высокой жаростойкости и жаропрочности способны работать при 900-1100 °С.

Детали газотурбинных двигателей обладают сложной формой, поэтому при их создании активно применяется метод точного литья в керамические формы с использованием выплавляемых моделей. Технология литья по выплавляемым моделям с использованием керамических оболочковых форм относится к специальным способам литья, которые являются основными для получения тонкостенных отливок сложного профиля [1-3]. Согласно ГОСТ Р 53464–2009, отливки, полученные литьём в керамические формы, характеризуются высокой размерной точностью (до 4-5 класса), также они обладают высокой чистотой поверхности. Шероховатость получаемых отливок составляет: Rz – до 10 мкм, Ra – до 1,25 мкм [4]. Это говорит о том, что данный способ обладает высокими показателями точности литой поверхности по сравнению с другими способами и позволяет получать отливки, приближенные к готовой детали, что способствует снижению затрат на механическую обработку. Это крайне важно для получения литых деталей из труднообрабатываемых сплавов, таких как никелевые жаропрочные сплавы [5,6].

Суть технологии ЛВМ заключается в следующем: на модель будущей отливки, изготовленной из легкоплавкого материала, слой за слоем наносится вначале керамическая суспензия, состоящая из связующего и огнеупорного наполнителя, затем происходит обсыпка модели зернистым огнеупорным материалом. Таким образом, на поверхности модели слой за слоем формируется

керамическая оболочка, толщина которой зависит от габаритов отливки. Для получения небольших отливок на модель может наноситься до 7 слоёв, а для получения крупногабаритных отливок – до 20 слоёв керамической оболочки. После нанесения необходимого количества слоёв легкоплавкая модель удаляется, а в образовавшуюся полость заливают расплавленный металл.

От керамической оболочки во многом зависит качество отливки, поэтому к оболочкам предъявляют высокие требования:

1) Обеспечивать минимальную шероховатость литой поверхности для снижения трудоёмкости механической обработки.

2) Обладать достаточной прочностью в сыром и прокалённом состояниях для сопротивления разрушению в процессе удаления модели и заливки расплавом, при этом не создавать затруднений для усадки отливки.

3) Обладать высокой термической стойкостью и инертностью к заливаемому расплаву.

На качество формообразующей поверхности керамической формы влияют реологические свойства суспензии, такие как вязкость и смачиваемость, морфология огнеупорных керамических частиц, их распределение по размерам в материале обсыпки. Процент загрузки твердого наполнителя в суспензию влияет не только на чистоту формообразующей поверхности, но и на прочность как в сыром, так и в прокалённом виде.

Таким образом, прочность является важным показателем качества керамической формы. Значения прочности в сыром виде характеризуют способность керамической формы не разрушаться в процессе обмазки и транспортировки, а также способность формы выдерживать напряжения, возникающие в процессе удаления модели. Однако характеристики прочности в непрокалённом состоянии недостаточны для оценки поведения керамической оболочковой формы во время заливки её расплавом при рабочей температуре литья (1500-1550 °С). Поэтому прочность формы как при предварительном, так и при остаточном обжиге (1000 °С) должна быть достаточной, чтобы противостоять

трещинам, возникающим при удалении модели из полости оболочковой формы, и впоследствии обеспечить бездефектное литье.

Прочность керамической оболочки в прокаленном виде определяет способность формы выдерживать давление металлического расплава в процессе заливки [7-10]. При этом керамическая оболочка не должна препятствовать усадочным процессам, которые происходят в процессе охлаждения отливки. Таким образом, прочность является наиболее важным показателем качества керамических оболочковых форм на всех этапах ее эксплуатации.

Важным этапом в процессе литья по выплавляемым моделям является предварительная проковка керамических форм, в процессе которой выгорают органические включения, при этом происходит спекание керамики, за счёт чего её прочность увеличивается. Для типичной керамической формы, состоящей из девяти слоев, время нагрева до расчетной температуры предварительного нагрева составляет 100 минут. Поэтому проведение научных исследований, направленных на сокращение этого времени, представляется целесообразным.

Одним из вариантов сокращения времени нагрева может быть уменьшение количества наносимых слоев керамической оболочки. Однако это не всегда возможно из-за снижения механических свойств литейной формы [11].

В целом, керамическая оболочка, используемая для процесса литья по выплавляемым моделям, должна обладать достаточной прочностью в непрокаленном состоянии, чтобы не разрушаться под действием напряжений, возникающих во время сушки и удаления воска. Остаточная прочность оболочки необходима для того, чтобы выдерживать воздействие расплавленного металла во время заливки и последующего охлаждения отливки.

Прочность оболочки в непрокаленном состоянии и после обжига зависит от состава связующего, наполнителя и обсыпчных материалов, а также от соотношения связующего и наполнителя в суспензии.

Производство керамических оболочек требует высокого уровня автоматизации. При изготовлении крупногабаритных тонкостенных отливок масса керамических форм может превышать 500 кг. Поэтому возникают

сложности при операциях по нанесению огнеупорных слоёв на керамическую оболочку вручную. Зачастую возникают сложности при транспортировке крупногабаритных моделей; как правило, для этих целей используют краны, при этом процесс «обмазки» происходит только в одной плоскости, что не позволяет наносить равномерный огнеупорный слой по всей поверхности керамической оболочки. Таким образом, возрастает необходимость в использовании более автоматизированных манипуляторов, работающих в разных осях вращения, для нанесения суспензии и обсыпки огнеупорного материала и получения равномерной керамической оболочки.

Термическая стойкость характеризует возможность керамического материала выдерживать резкую смену температур без разрушения. В большей степени это зависит от коэффициента термического расширения (КТР) и протекающих полиморфных превращений [12,13]. Керамические материалы, в сравнении с металлами, обладают низкой теплопроводностью, что в свою очередь может приводить к короблению крупногабаритных керамических форм. В процессе прокалики таких форм важно обеспечить плавный подъём температуры, поскольку резкий нагрев может привести к образованию напряжений и разрушению керамической формы [14]. Согласно исследованиям, на термическую стойкость керамической оболочки оказывает влияние не только материал огнеупорного наполнителя, но и материал связующего [15,16].

### **1.1 Керамические оболочки для изготовления отливок из жаропрочных никелевых сплавов**

Выбор керамических материалов для изготовления оболочковой формы является важным этапом для получения отливок из никелевых жаропрочных сплавов. Жаропрочные никелевые сплавы обладают высокой температурой плавления, при этом легирующие элементы для придания жаропрочности делают эти сплавы высокоактивными в отношении формовочных материалов [17-20]. Формовочными материалами, способными выдержать данные температуры, являются оксиды  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $SiO_2$ ,  $Y_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $ZrO_2$  (таблица 1) [21,22].

Таблица 1 – Физические свойства основных материалов для создания форм

Материал	Физические свойства		
	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	T <sub>пл</sub> , °C	Коэффициент термического расширения (КТР), 1/°C
Электрокорунд белый, (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3900	2050	8,6·10 <sup>-6</sup>
Кварц кристаллический, (SiO <sub>2</sub> )	2650	1704	13,7·10 <sup>-6</sup>
Кварц плавленный (аморфный), (SiO <sub>2</sub> )	2180	1704	0,3·10 <sup>-6</sup>
Периклаз, (MgO)	3580	2825	13,5·10 <sup>-6</sup>
Оксид иттрия, (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4800-5000	2430	8,2·10 <sup>-6</sup>
Оксид кальция, (CaO)	3370	2570	9,0·10 <sup>-6</sup>
Диоксид циркония, (ZrO <sub>2</sub> )	5680	2715	10·10 <sup>-6</sup>

Использование ZrO<sub>2</sub> и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в качестве огнеупорного материала для отливок из жаропрочных никелевых сплавов ограничено ввиду высокой стоимости данных материалов; как правило, данные оксиды используются для получения отливок из сплавов на основе титана, поскольку эти сплавы обладают высокой активностью и способны вступать во взаимодействие с материалом керамической формы [23-27]. Жаропрочные никелевые сплавы являются менее активными в сравнении с титановыми сплавами, поэтому не требуют использования дорогостоящих оксидных материалов.

Жаропрочные никелевые сплавы являются высоколегированными, поэтому получение качественных отливок из них возможно только в вакууме. Данная особенность получения отливок не позволяет изготавливать керамические формы на основе периклаза, так как MgO подвержен улетучиванию при нагреве до 1500 °C в условиях вакуума [28-31].

Оксид кальция обладает низкой плотностью и высокой огнеупорностью. Однако CaO активно взаимодействует с водой, что исключает возможность его использования в технологии изготовления керамических форм для жаропрочных никелевых сплавов, поскольку вода используется на всех этапах изготовления оболочки, влага находится в связующем, а также применяется в процессе удаления легкоплавкой модели.

Наиболее используемыми материалами для получения керамических форм являются оксиды алюминия ( $Al_2O_3$ ) и кремния ( $SiO_2$ ) [32].

Оксид алюминия  $Al_2O_3$  – электрокорунд – обладает высокой огнеупорностью (температура плавления  $2050\text{ }^\circ\text{C}$ ) и не имеет полиморфных превращений [33,34]. Он нашёл широкое применение при изготовлении керамических форм для получения отливок из жаропрочных никелевых сплавов направленной кристаллизацией, за счёт высокой термостойкости в условиях вакуума [35,36]. Несмотря на это преимущество, удаление материалов керамики от отливки вызывает трудности, поскольку требуется дополнительная операция по выщелачиванию в растворах щелочей [37,38]. Также высокая плотность электрокорунда ( $\rho=3990\text{ кг/м}^3$ ) ограничивает его применение в качестве обсыпочно-го материала для получения крупногабаритных керамических форм.

Оксид кремния  $SiO_2$  имеет высокую огнеупорность ( $T_{\text{плав}}=1728\text{ }^\circ\text{C}$ ), низкую плотность ( $\rho=2655\text{--}2232\text{ кг/м}^3$ ), обладает малым коэффициентом термического расширения [39]. Оксид кремния обладает полиморфизмом и имеет следующие основными модификациями: кварц, тридимит, кристобалит, кварцевое стекло [40]. Переход оксида кремния из одной модификации в другую происходит за счёт изменения кристаллической решётки и, как следствие, изменяются свойства керамического материала. На рисунке 1 представлены основные полиморфные превращения, которые протекают в кварце.

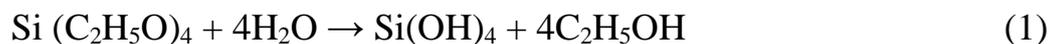


размеров отливок, что крайне важно в технологии получения крупногабаритных форм.

Протекающие полиморфные превращения в плавленном кварце оказывают благоприятное влияние на прочность керамической формы [46]. При прокатке протекающие полиморфные превращения снижают прочность керамической оболочки, тем самым не затрудняя усадку металла в процессе его охлаждения. Это свойство плавленного кварца, наряду с химической стойкостью к никелевым сплавам, а также его низкая плотность делают плавленный кварц перспективным формовочным материалом для получения крупногабаритных отливок.

## **1.2 Технология изготовления керамических оболочек с использованием в качестве связующего гидролизованного раствора этилсиликата**

Керамическая оболочка состоит из суспензии и огнеупорного материала обсыпки, в свою очередь, важной частью суспензии является связующий материал. В литейном производстве в качестве связующего для создания керамических форм широкое применение получили золи оксида кремния. Основным, традиционно используемым связующим материалом принято считать растворы гидролизованного этилсиликата (ГЭС) [47-49]. Этилсиликат (ЭС) – эфир кремниевой кислоты – жидкость желтоватого цвета, плотность которой составляет 1000-1100 кг/м<sup>3</sup>. Это продукт реакции четырёххлористого кремния с этиловым спиртом. В чистом виде этилсиликат не является связующим, для придания ему этих свойств проводят операцию гидролиза по уравнению 1.



Широкое применение получил ЭС-40, в котором условно содержится 40 % SiO<sub>2</sub>. В процессе гидролиза происходит замещение присутствующих в ЭС этоксильных групп (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>O) гидроксильными (ОН), содержащимися в воде, при этом количество SiO<sub>2</sub> снижается с 40 % до 20 %. Гидролиз сопровождается поликонденсацией, то есть объединением одинаковых или различных молекул в

одну с образованием полимеров и выделением простейшего вещества, например, воды, которая опять может вступить в реакцию гидролиза. Поскольку вода не растворяет ЭТС, реакция идет медленно. Для ускорения гидролиза используют различные растворители, способные растворить в себе и воду, и ЭТС. В качестве катализатора для проведения гидролиза используют соляную кислоту, ацетон или спирт. Полученный раствор называют гидролизованным раствором этилсиликата (ГЭТС). В результате гидролиза образуется нерастворимый в воде диоксид кремния, который обладает сильной связывающей способностью для сыпучих керамических материалов при повышенных температурах. Гидролизованный раствор этилсиликата – не растворимое в воде кислотное связующее, которое относительно устойчиво к высоким температурам, химически инертно и способно прочно связывать порошки обсыпчного материала. В зависимости от количества вводимых добавок, возможно получение различных по технологическим свойствам связующих растворов, от которых зависят свойства керамических форм [50].

Добавка соляной кислоты (HCl) позволяет улучшить прочность оболочки, она является катализатором процесса гидролиза, а также способствует выделению геля оксида кремния и схватыванию его при нанесении и сушке огнеупорного покрытия [51].

Выбор компонентов, требуемых для проведения гидролиза, производят на основании номограммы (рисунок 2). Путем соответствующего выбора компонентов гидролиза можно регулировать объемную долю  $\text{SiO}_2$  в связующем, тем самым возможно регулировать свойства получаемой керамической оболочки, которые зависят от содержания  $\text{SiO}_2$  в связующем компоненте.

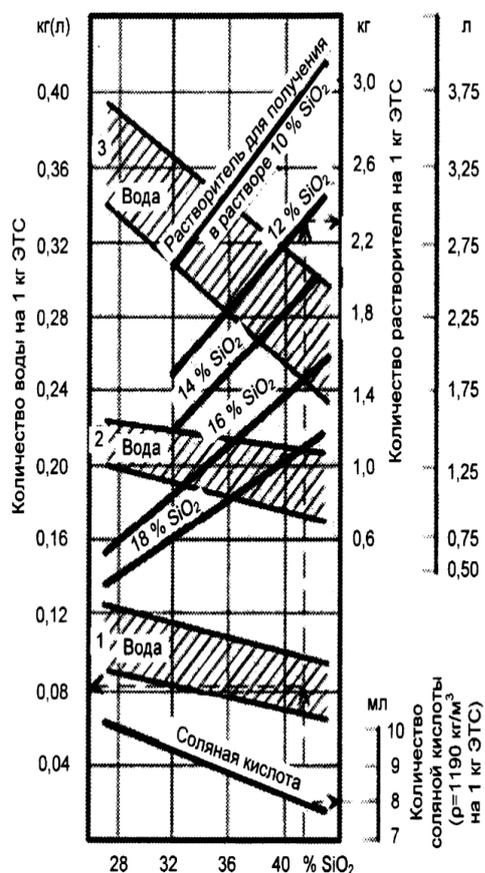


Рисунок 2 - Номограмма для определения количества растворителя, воды и соляной кислоты для получения связующего на 1 кг ЭТС

Для получения крупногабаритных керамических форм наиболее предпочтительно использовать связующие растворы I типа, поскольку количество  $\text{SiO}_2$  в таких растворах способно достигать 20 %, что, в свою очередь, хорошо сказывается на прочностных характеристиках формы. Для получения таких растворов гидролиз проводят с низким подержанием воды, в два раза меньше стехиометрической нормы. При этом на воздухе плёнки таких связующих твердеют обратимо, для их полного отверждения требуется сушка в атмосфере влажного аммиака. Процесс сушки проходит достаточно быстро (в течение 30–40 мин), однако этот процесс с экологической точки зрения не является предпочтительным [2].

Гидролизированный раствор этилсиликата сохраняет свои связующие свойства в течение 48 ч после приготовления, а суспензия на его основе сохраняет живучесть от 2 до 7 суток. По истечении этого времени вязкость суспензии

увеличивается из-за прогрессирующего гелеобразования связующего. Смеси на основе гидролизованного раствора этилсиликата содержат в себе спирт, поэтому быстро сохнут. Однако быстрое высыхание керамической оболочки не всегда хорошо сказывается на прочностных свойствах, поскольку быстрая сушка может привести к отслоению керамической оболочки от поверхности модели [52].

Процесс гидролиза требует добавления катализатора (этиловый спирт, ацетон, соляная кислота, серная кислота или другие органические кислоты), который негативно влияет на окружающую среду и ухудшает условия труда работников цеха по изготовлению форм. Современные темпы производства требуют механизации и автоматизации процессов, повышения срока сохранения стабильных свойств керамических суспензий, соблюдения норм по защите окружающей среды и технике безопасности. Поэтому на предприятиях наблюдается тенденция к уходу от связующих на основе этилсиликата в пользу экологичных готовых водных связующих.

Основным недостатком керамических оболочек на основе гидролизованного раствора этилсиликата является их невысокая прочность, для повышения которой в суспензию вводят дополнительные добавки [53,54]. Также керамические оболочки, полученные по традиционной технологии, дополнительно пропитывают различными составами для улучшения их свойств [55,56]. В качестве материалов пропитки используют водные растворы хлоридов бария, кальция, сернокислого алюминия, растворы кремнийорганического лака. Благодаря пропитке снижается расход дорогостоящего этилсиликата, а также увеличивается прочность керамической оболочки. Для получения более прочной керамики применяют связующее на основе жидкого стекла при формировании последних слоев керамической оболочки [57,58]. Однако недостаток данного способа заключается в том, что при обжиге оболочки на основе этилсиликата и жидкого стекла ведут себя по-разному, за счёт чего происходит коробление и растрескивание оболочки.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что традиционная технология изготовления керамических форм, несмотря на все свои преимущества, имеет ряд существенных недостатков.

Во-первых, ограниченное время живучести керамической суспензии повышает себестоимость керамических форм за счёт значительных безвозвратных потерь материалов [59]. Наряду с этим возникают технологические трудности при использовании такой суспензии в автоматизированном процессе изготовления форм. Во-вторых, в процессе изготовления форм используются легковоспламеняющиеся органические жидкости, которые являются экологически вредными и пожароопасными, что ухудшает условия работы в цехах по изготовлению форм [60]. Также основным недостатком традиционной технологии, помимо низкой живучести суспензии и повышенной вредности компонентов гидролиза, является высокая стоимость применяемых материалов.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что перспективным направлением для исследований является возможность ухода от использования в качестве связующего гидролизованного раствора этилсиликата в пользу экологичных связующих.

### **1.3 Технология изготовления керамических оболочек с использованием водных связующих**

Наиболее перспективным материалом являются связующие на водной основе. Данные связующие представляют собой суспензию кремнезёма в водной среде, в которой диаметр частиц  $\text{SiO}_2$  находится в диапазоне 8–12 нм, а массовая концентрация  $\text{SiO}_2$  составляет 23-28 %. В свежеприготовленных водных связующих частицы  $\text{SiO}_2$  высокодисперсны. Для сравнения, в гидролизованном растворе этилсиликата максимальная концентрация оксида кремния составляет 18-20 %. Для стабилизации коллоидных частиц кремнезоля в связующее вводят специальные добавки, например, соли натрия, альгината или алюминия, для поддержания соответствующего заряда на поверхности наночастиц  $\text{SiO}_2$ , предотвращения расслоения связующего и обеспечения соответствующей

прочности. Для повышения прочности литейных форм в состав связующих вводят жидкие полимеры на основе поливинилового спирта (используются для кислотных систем) или латексов (используются для щелочных систем) [61-63].

Модифицированные полимером связующие вещества стали предметом патентов. Сегодня ведущими зарубежными поставщиками водных связующих и добавок для формовочных систем являются компании Ransom & Randolph (США) и REMET (Великобритания). В России основными поставщиками водных связующих являются НТЦ Компас (г. Казань), ООО «Вакуумтех» (г. Москва), ООО «Технопарк» (г. Москва).

Стабильность коллоидных частиц кремнезёма во взвешенном состоянии и предотвращение расслоения связующего обеспечивается поддержанием необходимого уровня водородного показателя (рН). В большинстве случаев связующие на водной основе являются сильнощелочными с добавками гидроксида натрия или аммония. Гидроксид натрия при взаимодействии с водой образует сильную щёлочь NaOH (рН 1 % раствора = 13,4) [64,65]. Как правило, водные связующие являются щелочными, но также доступны и кислотные связующие (рН = 3-7), такие как Ludox SK, «Армосил К, KS» [66].

Стабилизация свойств достигается за счёт образования на поверхности частиц SiO<sub>2</sub> отрицательного заряда. Отрицательно заряженные частицы отталкиваются друг от друга и остаются равномерно распределёнными в водной среде без расслоения и агломерации.

Основной недостаток данной стабилизации — это то, что система сильно зависит от уровня рН среды, изменение которого приводит к ускоренному гелеобразованию связующего, тем самым снижается связующая способность суспензии, поэтому важно контролировать и поддерживать рН суспензии на необходимом уровне.

Связующие на водной основе являются готовыми связующими и не требуют проведения операции гидролиза, что, в свою очередь, уменьшает количество технологических операций. Суспензия на основе ГЭС сохраняет свою связующую способность от 2 до 7 суток, в свою очередь, суспензия на водной

основе не теряют своих свойств в течение 6 (для кислотных) и 12 (для щелочных) месяцев. По истечении срока годности связующее изменяет свою вязкость что приводит к потере его связующих свойств. Увеличение вязкости суспензии приводит к увеличению толщины наносимых слоев, при этом затрудняется процесс сушки керамической оболочки, что может привести к растрескиванию форм во время сушки [67]. С увеличением вязкости суспензии происходит полимеризация и агрегация высокодисперсных молекул кремния. После превышения критического размера агрегатов  $\text{SiO}_2$  происходит гелеобразование связующего, что приводит к снижению прочности получаемой керамической оболочки.

Процесс твердения керамической оболочки с использованием водных связующих происходит за счёт испарения воды и постепенной коагуляции частиц  $\text{SiO}_2$ , что приводит к гелеобразованию. В состоянии геля частицы  $\text{SiO}_2$  закупоривают огнеупорный зернистый материал, находящийся в суспензии и обсыпке, за счёт чего получается прочный каркас.

Связующие на водной основе обладают рядом преимуществ по сравнению со связующими на основе гидролизованного раствора этилсиликата:

- 1) Невоспламеняемые, нетоксичные;
- 2) Большой срок живучести суспензии на основе водных связующих (до 1 года) делает свойства керамической оболочки более постоянными и требует минимального обслуживания;
- 3) Не требуют дополнительных химических операций, по сравнению с приготовлением связующего из этилсиликата (ЭТС-40, ЭТС-32) путём его гидролиза в присутствии спиртов и ацетона.

Использование водных связующих решает проблемы, связанные с традиционно используемым ГЭТС, однако существует недостаточно данных об использовании водных связующих для получения керамических крупногабаритных форм.

## **1.4 Материал моделей для получения крупногабаритных керамических форм**

### **1.4.1 Применение выжигаемых моделей для получения крупногабаритных форм**

В работах [68,69] описана технология изготовления крупногабаритной модели для получения отливки «Корпус камеры сгорания» с габаритными размерами более 900x900 мм. Модель изготавливалась с использованием аддитивных технологий путем FDM-печати. В качестве материала для изготовления модели используется Полилактид (PLA пластик) - биоразлагаемый термопластичный полиэфир, мономером которого является молочная кислота [70,71]. Полилактид пользуется высокой популярностью и отличается низкой термоусадкой, является более прочным, что важно в процессе печати моделей, особенно крупногабаритных или высоких изделий.

Шероховатость поверхности моделей, изготовленных путем FDM-печати, выше по сравнению с шероховатостью поверхности моделей, получаемых традиционным путём с использованием металлических форм, поскольку шероховатость зависит не только от используемого материала, но и от технологии изготовления модели. Шероховатость моделей, полученных путём FDM-печати вдоль направления выращивания, – Rz 67,3 мкм, перпендикулярно направлению выращивания шероховатость составила Rz 1,95 мкм, при использовании модели из мочевины шероховатость формообразующей поверхности составляет Rz 3,8-9,2 мкм, вне зависимости от направления измерения. Использование аддитивных технологий для получения выжигаемых моделей имеет основной недостаток – высокая стоимость оборудования, материалов и длительное время печати. Поэтому данный способ нашел применение только в опытном и мелкосерийном производстве, для которого стоимость производства пресс-форм и другой оснастки больше, чем стоимость печати на 3D-принтере [72].

#### **1.4.2 Использование карбамида для изготовления крупногабаритных моделей**

В серийном производстве для получения моделей используют металлические формы, которые позволяют изготавливать большие партии моделей. Одним из материалов для получения моделей в металлических формах является карбамид (техническая мочеви́на).

Карбамид – диамид угольной кислоты  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  – кристаллическое вещество, хорошо растворяется в воде, температура плавления 129-134 °С, в расплавленном состоянии обладает хорошей жидкотекучестью. Основными преимуществами технической мочевины по сравнению с воскоподобными материалами являются небольшая величина линейной усадки ~0,1 % и высокая прочность. При нагреве карбамид не имеет стадии размягчения, за счёт этого модели не деформируются вплоть до 100 °С; это позволяет сохранить точность модели, что крайне важно при получении крупногабаритных моделей [73,74].

Как показано в работах [75,76], использование карбамида в чистом виде ограничено из-за невысоких и нестабильных физико-химических свойств, а именно: такие модели имеют нестабильную усадку и низкую прочность, высокие остаточные термические напряжения, что приводит к повышенному трещинообразованию в процессе охлаждения. Высокая гигроскопичность технической мочевины ограничивает срок её хранения, а также влияет на размерную точность получаемых моделей.

Удаление карбамида из полости формы происходит в ванне с кипящей водой, поскольку карбамид обладает хорошей растворимостью в воде. При выдержке карбамида в течение 0,5 ч в разных растворителях потеря его массы составляет: в эфиральдегидной фракции – 10,5 %, в спирте гидролизном – 8 %, в ацетоне – 6 %, в растворителе Р-646 – до 1,2 %, в воде – 54 %. Остальные растворители не взаимодействуют с карбамидом, а после его термодеструкции коксовый остаток очень мал (0,1...0,2 %) [77-79].

В настоящее время разработано достаточно большое количество модельных составов на основе карбамида и методов улучшения их качества [80]. Одним из

направлений исследований, позволяющих улучшать качество водорастворимых моделей, является введение в их состав специальных добавок, улучшающих их технологические свойства. Широкое применение получили такие добавки, как нитраты калия и натрия, сернокислый алюминий и магний, упрочняющие добавки – борная кислота, поливиниловый спирт, графит. Основное требование к водным добавкам – не дефицитность, экологичность, невысокая температура плавления, малая зольность и хорошая растворимость в воде.

Традиционная технология получения керамических форм подразумевает использование легкоудаляемой модели и связующего на основе гидролизованного раствора этилсиликата. Однако применение в традиционной технологии модельных композиций на основе технической мочевины имеет ряд недостатков, поскольку в процессе гидролиза используются вода, спирт и ацетон, которые хорошо растворяют карбамид [81,82]. Основной проблемой является не только растворение материала модели связующим, но и негативное влияние продуктов гидролиза мочевины на кремнезоль этилсиликатного связующего. При этом происходит частичное разрушение формообразующей поверхности керамической оболочки. В дальнейших технологических операциях, таких как извлечение формы из ванны с горячей водой и прокатка, возможно отслоение частиц керамики с формообразующей поверхности, что приводит к дефектам поверхности или наличию в отливке неметаллических включений [83].

При формировании керамической оболочки с использованием готовых водных связующих также имеется ряд сложностей, поскольку поверхность водорастворимой модели на основе карбамида частично размывается [84,85].

Для защиты поверхности модели от растворения суспензией используют различные гидрофобные покрытия, которые создают защитную пленку на модели и при этом не приводят к браку отливок. Одним из способов защиты является нанесение на поверхность модели из карбамида гидрофобного покрытия из воска [86]. Для этого водорастворимую модель погружают в расплавленный воск, при этом на поверхности модели образуется тонкая пленка из воска, которая защищает модель от воздействия водного связующего. Составы покрытий на

основе восков в меньшей степени способствуют размыванию поверхности модели, однако данный способ защиты снижает размерную точность моделей, а большее по сравнению с карбамидом объёмное расширение парафина может способствовать разрушению формы во время удаления модели из полости формы.

В качестве защитных покрытий используют битумные и перхлорвиниловые лаки со смесевыми растворителями; при применении этих лаков, в зависимости от степени разбавления, возможно получение защитных пленок размером от 4 до 10 мкм, что не оказывает сильного влияния на размерную точность получаемых отливок [87].

Гидрофобное покрытие защищает не только карбамид от взаимодействия с влагой, но и саму суспензию от продуктов гидролиза технической мочевины. Растворение карбамида в воде, находящейся в связующем, способно снизить связующую способность суспензии, а также вызвать её скорое огеливание.

Существуют способы, в которых предлагается использовать смешанную технологию изготовления форм, при которой на выплавляемую модель наносят сначала слой суспензии на гидролизованном растворе этилсиликата, а затем наносят слой суспензии с использованием в качестве связующего готового водного связующего [88,89]. Данные способы позволяют частично защитить водорастворимую модель от взаимодействия с водным связующим, однако это вносит дополнительные технологические операции по нанесению керамических слоёв, а также не решает проблемы с использованием в производстве вредных компонентов.

При использовании защитных покрытий, повышающих гидрофобность водорастворимых моделей, следует учитывать, что повышение гидрофобности приводит также к увеличению времени вымочки моделей, что может вызывать образование трещин на поверхности керамической оболочки. Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение гидрофобности и создание защитных покрытий для защиты водорастворимого материала модели от воздействия на него связующего материала требует дополнительных исследований.

### **1.4.3 Применение восков в качестве материала для изготовления крупногабаритных моделей**

В качестве материала для получения моделей долгое время используются воскоподобные материалы, такие как парафин, стеарин, буроугольный воск, полиэтиленовый воск. В чистом виде воскоподобные материалы имеют ряд недостатков: низкую размерную точность и большое объёмное расширение при нагреве [1-3].

Для улучшения технологических свойств в модельные композиции на основе восков вводятся специальные добавки, способные уменьшить усадку, повысить прочность и теплоустойчивость. К наиболее часто используемым добавкам относятся: поливиниловый спирт, канифоль, карбамид, терефталевая кислота, синтетические смолы и др. [90-94].

Модели из воскоподобных материалов являются предпочтительными при изготовлении керамических форм с использованием водных связующих, поскольку они не вступают во взаимодействие с материалом модели в процессе нанесения на них керамической суспензии. Восковые модели в сравнении с водорастворимыми имеют ряд отличий, а именно: они обладают большей ( $\sim 0,6-1,5\%$ ), по сравнению с водорастворимыми моделями на основе карбамида ( $\sim 0,4\%$ ), величиной линейной усадки [95-97].

Снижение величины линейной усадки достигается за счёт введения специальных добавок в состав модельной композиции, а также за счёт снижения температуры формования, что требует использования машин для запрессовки.

Модельные композиции на основе воска при температурном воздействии подвержены термическому расширению, при этом возможно нарушение целостности керамической формы либо присутствие неметаллических включений в теле отливке. Для снижения негативного влияния теплового расширения модельных композиций на основе воска используют модельные композиции в виде порошка, которые в дальнейшем прессуются в полости пресс-формы. Повышенная пористость таких моделей позволяет повысить геометрическую точность моделей, а также снизить негативное влияние теплового расширения

модельной композиции, способного привести к разрушению керамических форм. Однако данный способ получения моделей не до конца изучен, а также требует сложных по конструкции пресс-форм, что добавляет сложностей при получении серийных отливок [98,99].

Основным способом удаления воскоподобной модели из полости керамической формы является способ плавления легкоплавкого материала в баке с кипящей водой [1-3]. Однако различие в коэффициентах термического расширения между воском и керамикой приводит к неравномерному расширению материалов. Как следствие неравномерного расширения, когда воск при 50-90 °С в процессе плавления начинает расширяться, а керамическая оболочка в данном диапазоне температур не претерпевает никаких расширений, возможно образование трещин в керамической оболочке. Как правило, трещины образуются по кромкам модели, в местах, где слой керамической оболочки получается самый тонкий. Снижение негативного влияния термического расширения модельной композиции на керамическую оболочку возможно за счёт увеличения её толщины и, как следствие, прочности. При этом увеличивается время изготовления формы, а также риск образования горячих трещин за счёт низкой податливости формы [1-3].

Оптимальным вариантом удаления модельной композиции из полости формы является бойлерклав, в котором за счёт высокой температуры пара (150–160 °С) происходит процесс шокового расплавления модельной массы, тем самым снижается давление на внутреннюю полость керамической оболочки. Для обеспечения быстрого удаления модельной композиции из полости формы увеличивают теплопроводность керамической формы за счёт предварительного замачивания её в горячей воде. При этом снижается растрескивание формы и уменьшается время вытапливания модели на основе воска. Основным ограничением данного способа являются габариты керамической формы, которые превышают 1000 мм, при этом оборудование под данные габариты в России не производится.

## 1.5 Выводы по литературному обзору

В ходе анализа литературы было выявлено, что перспективным материалом для получения крупногабаритных керамических форм является плавленный кварц, благодаря его низкой плотности, высокой огнеупорности и наименьшему среди оксидов коэффициенту термического расширения.

В результате литературного обзора установлено, что в настоящее время при изготовлении керамической огнеупорной оболочки наблюдается тенденция перехода от гидролизованного раствора этилсиликата к пожаробезопасным, экологичным и обладающими более высокой стабильностью связующим на водной основе.

Использование связующих на водной основе даёт возможность автоматизации производства за счёт отсутствия в их составе пожароопасных компонентов, а также длительного срока живучести суспензии. Отсутствие в составе готовых водных связующих токсичных веществ, таких как ацетон и аммиак, способствует приходу к экологичному производству.

Несмотря на преимущества водных связующих, имеется недостаток информации об использовании отечественных водных связующих при изготовлении керамических оболочковых форм для крупногабаритных отливок.

При переходе к связующим на водной основе существуют сложности при использовании традиционно применяемых водорастворимых моделей. Существует большое количество данных по защите водорастворимой модели от взаимодействия с гидролизованным раствором этилсиликата, однако недостаточно информации о защите такой модели от взаимодействия при использовании водного связующего.

Исходя из этого, цель данной работы заключается в разработке технологии получения керамических форм для крупногабаритных отливок ответственного назначения из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ14Н-ВИ с заменой связующего на основе гидролизованного раствора этилсиликата на водное связующее.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- Определить основные технологические свойства суспензии и керамической оболочки, изготовленной с использованием связующего на водной основе;

- Исследовать процессы взаимодействия между суспензией, приготовленной на основе водного связующего, и моделью из карбамида;

- Провести научно обоснованный подбор оптимальных режимов изготовления керамической оболочки при использовании модели из карбамида и водного связующего;

- Исследовать технологические свойства восков, как материалов-заменителей карбамида, для изготовления моделей при использовании суспензии на основе водного связующего;

- Опробовать в производственных условиях технологию изготовления керамических форм с применением карбамидной модели и водного связующего для получения тонкостенных крупногабаритных отливок ответственного назначения из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ14Н-ВИ.

## ГЛАВА 2. ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Исходные материалы

В работе использовались готовые водные связующие марок: ВТ13-02У (ТУ 20.59.57-005-76067946-2018) производства ООО «Вакуумтех», г. Москва, Ставроформ ВС производства ООО «Полимет», г. Тольятти, UltraCast One+ и UltraCast Prime (ТУ 20.597-016-03406062-2020) производства ООО «Технопарк», г. Москва, Этилсиликат-40, ТУ 2435-42705763441-2004 производства ООО «Платина», г. Москва.

Свойства связующих представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства связующих материалов

Свойство	Ставроформ ВС	ВТ-1302У	Ultracast PRIME	Ultracast ONE+	Этилсиликат-40
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1,15 - 1,18	1,16-1,22	1,15-1,16	1,17-1,18	1,07
рН	9,0 – 11,0	9-11	9,3-10,6	9,3-10,6	-
Содержание SiO <sub>2</sub> , %	-	23,5-31	23-25	25,5-27,5	40-30
Размер частиц, %	-	-	10-12	8-10	-
Кол-во полимера, %	-	-	3,5-5,5	2,5-3,5	-

В качестве материала-наполнителя суспензии применялся плавленный кварц марки ПКП 0,045 производства ООО «Кефрон». Материалом обсыпки служил плавленный кварц марок ПК 0,25-0,4, ПК 0,4-0,6 и ПК 0,5-1,0 производства ООО «Кефрон».

Для исследований взаимодействия между моделью и водным связующим использовались водорастворимые модели на основе карбамида с различными

добавками: поливиниловый спирт (ПВС), сульфат магния ( $MgSO_4$ ), нитрат калия ( $KNO_3$ ) и диметилглиоксим (таблица 3).

Таблица 3 - Составы водорастворимых моделей

Состав	Сульфат магния ( $MgSO_4$ ), %	Поливиниловый спирт (ПВС), %	Нитрат калия ( $KNO_3$ ), %	Диметилглиоксим, %	Карбамид
1	2	-	-	-	Основа
2	2	2	-	-	Основа
3	-	-	10	-	Основа
4	-	2	10	-	Основа
5	-	-	10	2	Основа

В качестве материала для создания восковой модели использовались наполненные воска марок S1135, S1235 и RG20 (ООО «Технопарк», г. Москва) (таблица 4).

Таблица 4 - Основные свойства наполненных восков

Марка	Содержание наполнителя, %	Тип наполнителя	Температура каплепадения, °C	Зольность, %	Пенетрация при 25 °C, *0,1 мм	Линейная усадка, %	Вязкость при 100 °C, МПа·с
RG 20	18	1*	71	0,02	4	0,65	310
S1135	35	2**	75	0,03	5	0,75	350
S1235	35	1*	77	0,04	4	0,65	400

1\* - Сшитый сферический полистирол

2\*\* - Сшитый сферический полистирол / Теревталева кислота

## 2.2 Определение физических и технологических параметров исходных материалов и керамической оболочки

Исследование фракционного состава микропорошка марки ПКП 0,045 проводили на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH,

(Чехия). Для определения фракционного состава материала обсыпки ПК 0,25-0,4, ПК 0,4-0,6 и ПК 0,5-1,0 использовали ситовой метод по ГОСТ 29234.3-91.

Плотность водного связующего определялась весовым методом путем взвешивания образцов объемом 50 см<sup>3</sup> на электронных весах HR-202i (Япония).

Плотность рассчитывалась по формуле 1:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$m_2$  – масса колбы с навеской, г;

$m_1$  – масса пустой колбы, г;

$V$  – объем навески, см<sup>3</sup>.

Определение водородного показателя (рН) связующего проводилось при помощи портативного рН-метра марки HI99151 (изготовитель HANNA Instruments, Румыния). Для определения рН связующее заливали в колбу объемом 400 мл, после чего в стакан помещался электрод, который в процессе измерения не касался стенок и дна стакана. Результат фиксировался после того, как значение исследуемой величины принимало установившееся значение.

Определение вязкости суспензии проводилось двумя способами. Условная вязкость оценивалась по вискозиметру ВЗ-4 в секундах согласно ГОСТ 8420-74. Условная вязкость характеризует время истечения заданного объема жидкости через отверстие диаметром 4 мм. Динамическая вязкость суспензии определялась с помощью ротационного вискозиметра Brookfield DV2TLV (США). Для измерений использовались измерительные шпиндели LV-1 (#61) и LV-3 (#63). Вязкость оценивали при скоростях вращения шпинделей от 10 до 200 об/мин. Суспензия для определения вязкости состояла из 1 кг плавленного кварца фракции ПКП 0,045, который разбавлялся связующим в количестве от 400 до 600 мл с шагом 50 мл. Для стабилизации свойств (равномерного смачивания пылевидной фракции наполнителя связующим и выхода воздуха) суспензия выдерживалась в течение 24 часов.

Прочность керамической оболочки определялась методом трехточечного изгиба на универсальной машине Instron 5966 (США). Скорость нагружения составляла 1 мм/мин, расстояние между нижними опорами 21 мм. Механическим испытаниям подвергались образцы размером 40×20×8 мм. Прочность керамического образца рассчитывали по формуле 2:

$$\sigma_{\text{изгиб}} = \frac{3P_{\text{разр}} l}{2bh^2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{изгиб}}$  – прочность, МПа;

$P_{\text{разр}}$  – нагрузка, Н;

$l$  – расстояние между опорами, мм;

$b$  – ширина образца, мм;

$h$  – высота образца, мм.

Образцы для определения прочности изготавливались по следующей методике. Из модельного состава ПС 50-50 изготавливались пластины с прямоугольными отверстиями размерами 40×20×8 мм, на поверхности которых формировали керамическую оболочку из огнеупорных материалов. Для обеспечения наилучшей адгезии пластина покрывалась составом 5 % раствора канифоли сосновой ГОСТ 19113-84, растворённой в этиловом ректифицированном спирте ГОСТ 5962-2013. Формирование керамического покрытия на моделях проводили методом послойного нанесения керамической суспензии, состоящей из готового водного связующего (BT13-02У; Ставроформ ВС; UltraCast One+; UltraCast Prime), в качестве наполнителя использовался плавленный кварц марки ПКП 0,045. Условная вязкость используемых суспензий составляла 20, 40 и 60 с, что соответствует стандартно используемым показателям вязкости, применяемым в производстве по изготовлению керамических форм. Обсыпка производилась плавленным кварцем трех марок: ПК 0,25-0,4, ПК 0,4-0,6 и ПК 0,5-1,0, что соответствует обсыпке, применяемой для первых, промежуточных и последующих слоёв.

Сушка каждого слоя керамической оболочки проводилась при следующих условиях: влажность 64–85 %, температура 21–22 °С, время 2–3 часа. По такой технологии на модельную пластину наносилось от 5 до 9 слоев огнеупорного материала, в зависимости от фракции обсыпки.

Удаление материала модели происходило в воде при температуре  $(95 \pm 5)$  °С.

Прокалка керамической оболочки проводилась в муфельной печи (НПП «Теплоприбор») по следующему режиму: подъём температуры до 900 °С за 1,5 часа с последующей выдержкой при этой температуре в течение 2 ч. Охлаждение образцов происходило вместе с печью при открытой дверце.

Шероховатость формообразующей поверхности керамической оболочки измерялась при помощи профилометра MarSurf M300С (Германия). Принцип измерения прибора основан на ощупывании неровностей исследуемого объекта алмазной иглой (щупом) и преобразовании этих колебаний в значения шероховатости.

Определение изменения линейных размеров керамических образцов в ходе прокалики проводили с помощью штангенциркуля с погрешностью  $\pm 0,25$  мм. Линейную усадку определили по формуле 3:

$$Y = \frac{l_1 - l_2}{l_1} \times 100 \% , \quad (3)$$

где  $Y$  – линейная усадка, %;

$l_1$  – расстояние между метками в исходном образце, мм;

$l_2$  – расстояние между метками на образце после прокалики, мм.

Определение открытой пористости проводилось в соответствии с ГОСТ 2409-2014, по формуле 4.

$$P_{\text{откр}} = \frac{m_{\text{нас.ж}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{нас.ж}} - m_{\text{гидр}}} \times 100 , \quad (4)$$

где  $P_{\text{откр}}$  – открытая пористость, %;

$m_{\text{сух}}$  – масса высушенного испытуемого образца, г;

$m_{\text{нас.ж}}$  – масса пропитанного образца на воздухе, г;

$m_{\text{гидр}}$  – масса пропитанного образца, погруженного в жидкость, г.

Для определения протекающих полиморфных превращений использовался метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). В качестве образцов керамической оболочки использовались плавленный кварц фракции 0,25-0,4 мм (материал обсыпки) и водное связующее Ultracast Prime, которое предварительно было высушено и растерто в порошок.

При помощи рентгеновского дифрактометра Bruker D8 ADVANCE («Bruker Optik GmbH», Германия) определяли фазовый состав керамической оболочки после заливки в неё жаропрочного сплава ВЖЛ14Н-ВИ, который заливался в тестовую оболочковую форму при температуре  $\sim 1500$  °С. Охлаждение керамической оболочки происходило в течение 24 ч.

### **2.3 Определение свойств моделей на основе карбамида**

Водорастворимые модели на основе карбамида изготавливались следующим способом. В подогреваемую ёмкость загружался карбамид, после его полного расплавления при температуре 132 °С в расплав при постоянном перемешивании вводились добавки согласно таблице 3. После полного растворения добавок расплав заливался в металлическую форму. Форма изготавливалась из алюминиевого сплава для обеспечения быстрого теплоотвода и равномерного охлаждения модели, после каждой заливки форма охлаждалась в проточной воде.

Для определения величины линейной усадки моделей изготавливались прутки размерами 10×105 мм, в которых на расстоянии 80 мм друг от друга находились выступы. Линейная усадка определялась по разнице расстояний между металлической формой и полученными образцами (формула 3).

Прочность материала моделей определялась в образцах методом трёхточечного изгиба на универсальной машине Instron 5966 (США), скорость нагружения – 1 мм/мин, расстояние между опорами – 70 мм.

Определение шероховатости поверхности моделей на основе карбамида проводили по аналогии с керамикой при помощи профилометра MarSurf M300С (Германия).

Растворимость модельных составов на основе карбамида измерялась по изменению массы образца, помещённого в растворитель. В качестве растворителя использовали 400 мл дистиллированной воды комнатной температуры. Образцы массой 2 г погружали в эту воду и фиксировали время, за которое они полностью растворялись.

Для определения поведения модельных составов в процессе кристаллизации использовался вискозиметр Brookfield DV2TLV (США). При помощи термостата модельную массу расплавляли до температуры 135 °С. Затем происходило измерение крутящего момента при скоростях вращения шпинделя 1, 10, 50 и 200 об/мин. При достижении 100 % вращающего момента запись останавливали.

Процесс взаимодействия между водорастворимой моделью и связующим на водной основе определялся по краевому углу смачивания методом лежащей капли. На поверхность образцов размером 25×25 мм при помощи пипетки наносилось связующее Ultracast One+, предназначенное для изготовления первых слоёв керамической оболочки. Результаты фиксировались на фотокамеру Sony NEX EA50H, оснащённую макрообъективом Sony E PZ 18-200 мм F3.5-6.3, и макрокольцами Meike МК-S-AF3A для Sony E. В ходе съёмки фиксировались изображения через каждые 10 с. Полученные изображения обрабатывались в программе ImageJ при помощи плагина Contact Angle. Программа позволяет анализировать неподвижные капли и измерять их углы соприкосновения.

Для определения текучести наполненных восков была изготовлена проба, которая представляет из себя пластину 80×83 мм толщиной 3 мм, имеющую 90 перфораций диаметром 5 мм (рисунок 3). Подобная конфигурация позволяет

разбивать поток воска, тем самым обеспечивая равномерное заполнения полости формы [98].

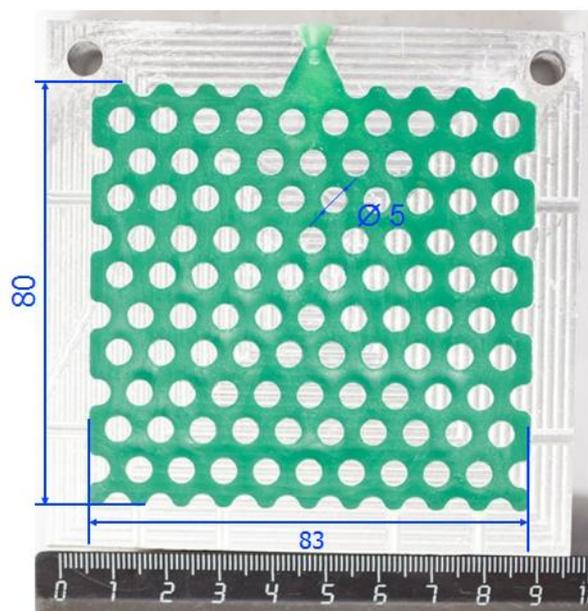


Рисунок 3 - Проба для определения текучести восковых материалов после запрессовки (давление прессования 0,2 МПа, температура прессования 90 °С) модельным воском RG20

Запрессовка воска осуществлялась при помощи вакуумного инжектора DVWI-1 4,0 л (Китай). Для проведения исследований воск засыпался в бак инжектора, спустя час температура в баке составляла 90 °С. Запрессовка воска осуществлялась при различных давлениях – 0,2, 0,15 и 0,1 МПа. Температура запрессовки понижалась с 90 °С до 60 °С с шагом 5 °С. При понижении температуры воск дополнительно выдерживался в течение 1 часа для обеспечения равномерной температуры во всём его объёме. После запрессовки результаты фиксировались на фотокамеру Sony NEX EA50H, таким образом делалось 5-6 снимков. Результаты полученных изображений обрабатывались в программе ImageJ.

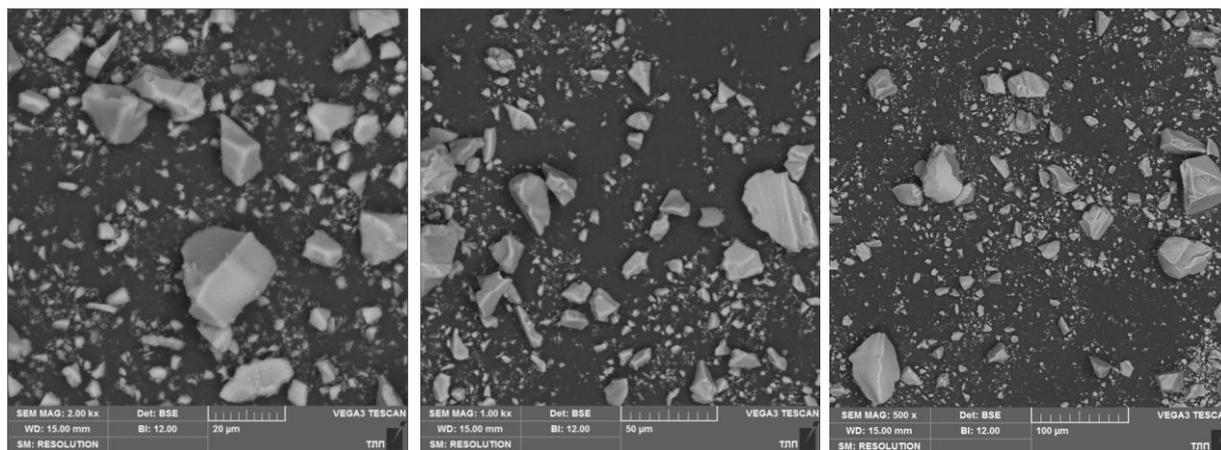
Определение динамической вязкости проводили при помощи ротационного вискозиметра Brookfield DV2TLV (США), оснащенного измерительным шпинделем LV-4 (#64), при скоростях вращения от 1 до 200 об/мин. Для

измерений воск в стакане устанавливался в водяную баню для расплавления. При достижении температуры 90 °С воск перемешивался измерительным шпинделем в течение двух часов для обеспечения равномерной температуры во всём его объёме. Измерения динамической вязкости проводили в диапазоне температур от 90 °С до 60 °С с шагом 5 °С.

## ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 3.1 Оценка влияния огнеупорного материала и связующего на свойства суспензии

При помощи сканирующей электронной микроскопии были получены данные о размере и форме зёрен кварцевого микропорошка марки ПКП 0,045 (рисунок 4).



а)

б)

в)

Рисунок 4 - Снимки зёрен кварцевого песка марки ПКП 0,045 при различных увеличениях: 2000 (а), 1000 (б), 500 (в)

Из анализа полученных снимков установлено, что размер частиц находится в диапазоне от 0 до 60 мкм. Зёрна имеют оскольчатую форму.

На рисунке 5 представлена объёмная доля частиц различного размера в пылевидном кварце марки ПКП 0,045. Частицы имеют размер от 0 до 60 мкм, при этом их распределение достаточно неоднородное и не подчиняется закону нормального распределения.

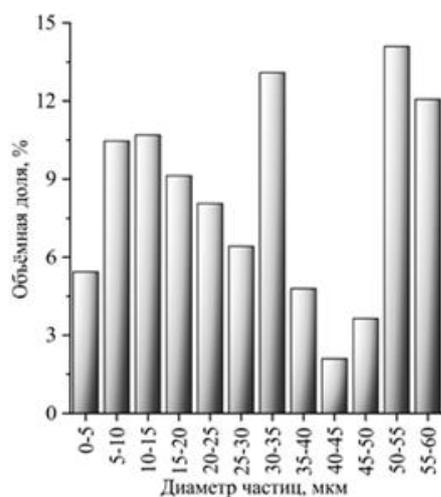


Рисунок 5 - Распределение частиц по размерам в пылевидном кварце марки ПКП 0,045

Рассев плавленного кварца (рисунок 6) марок ПК 0,25-0,4, ПК 0,4-0,6 и ПК 0,5-1,0 выявил, что плавленный кварц марки ПК 0,25-0,4 в основном остаётся на сите 0,315 мм. Для марки ПК 0,4-0,6 основная масса навески остаётся на сите 0,4 мм, что говорит о монодисперсном распределении частиц внутри фракции. Плавленный кварц марки ПК 0,5-1,0 практически равномерно распределен между ситами 0,4 мм и 0,63 мм; равномерное распределение частиц плавленного кварца обеспечивает более плотную упаковку частиц в процессе получения керамической оболочки.

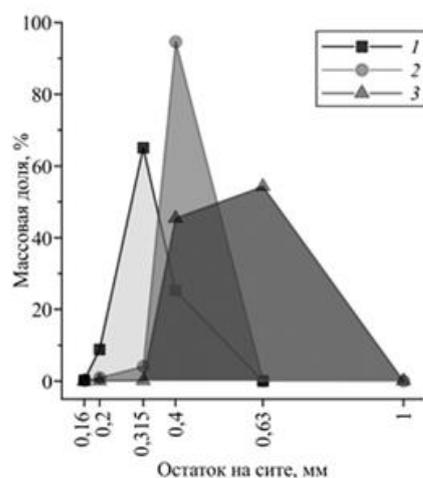


Рисунок 6 - Результат отсева плавленного кварца на ситах:  
1 – ПК 0,25-0,4, 2 – ПК 0,4-0,6, 3 – ПК 0,5-1,0

Огнеупорная суспензия используется для создания керамической формы, при этом свойства суспензии напрямую влияют на эксплуатационные характеристики керамической оболочки. Свойства связующих представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Свойства связующих

Марка связующего	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водородный показатель (pH)
Ставроформ ВС	1160	10,23
BT-1302У	1190	9,7
Ultracast ONE+	1170	10,6
Ultracast PRIME	1150	10,29

Плотность всех исследуемых связующих близка к плотности воды и составляет 1150-1190 г/см<sup>3</sup>.

Основным показателем стабильности суспензии является pH [99,100]. Результаты показывают, что исследуемые марки водных связующих являются щелочными. Это объясняется наличием в них Na<sub>2</sub>O, который используется для стабилизации связующего. Оксид натрия является нейтральным, однако при взаимодействии с водой образуется гидроксид натрия NaOH, который является сильной щёлочью и образует щелочные растворы.

Связующее на основе гидролизованного раствора этилсиликата относится к кислотным, его pH находится в пределах 1,2-2, поскольку процесс гидролиза происходит с добавлением соляной кислоты.

Значения pH необходимо учитывать при составлении рецептуры керамических суспензий, поскольку некоторые материалы могут приводить к изменению pH связующего и, как следствие, к их огеливанию.

### **3.2 Вязкость связующих и суспензии**

Показатель вязкости связующих необходим для расчёта рецептуры керамических суспензий; он показывает, какое количество наполнителя

необходимо ввести в суспензию. На рисунке 7 представлена зависимость условной вязкости суспензии от содержания связующего на 1 кг плавленного кварца марки ПКП 0,045.

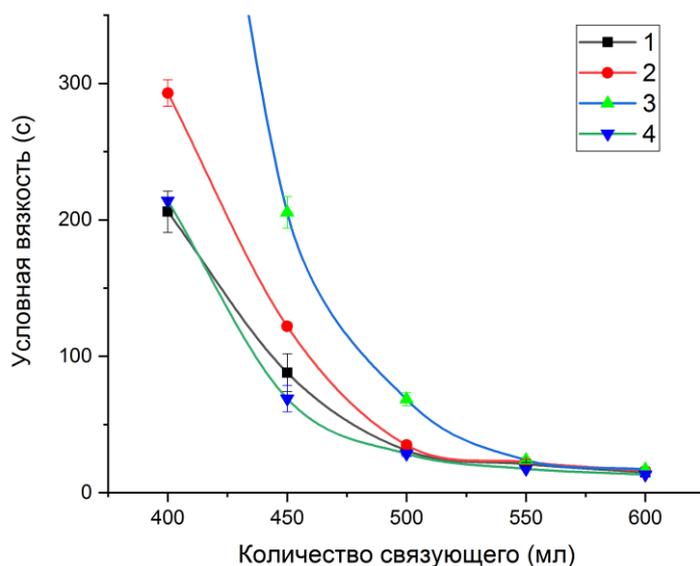


Рисунок 7 - Условная вязкость суспензии в зависимости от содержания связующего на 1 кг микропорошка ПКП 0,045: 1 – UltraCast One+; 2 – UltraCast Prime; 3 – BT13-02У; 4 – Ставроформ ВС

Из графика видно, что наибольшую условную вязкость имеет суспензия на связующем BT13-02У, при введении от 450 до 550 мл связующего вязкость суспензии уменьшается с 192 до 24 с. Разница по вязкости особенно заметна на начальном этапе при введении от 400 до 550 мл связующего. Однако при введении 600 мл связующего практически все суспензии имеют одинаковую вязкость, которая составляет для суспензий, изготовленных на связующих Ставроформ ВС, UltraCast One, UltraCast Prime, ~14-15 с; для суспензии, изготовленной на связующем BT13-02У, ~17 с.

Высокая вязкость суспензии требует введения большего количества связующего, при этом увеличивается расход материала наполнителя. Таким образом, для приготовления суспензии с вязкостью 60 с на основе исследуемых связующих потребуется 1 кг плавленного кварца марки ПКП 0,045 и 550 мл связующего BT13-02У, или 500 мл связующих Ставроформ ВС, UltraCast One+,

UltraCast Prime. Оптимальным количеством связующего было выбрано 500 мл, так как дальнейшее его увеличение не оказывает существенного влияния на вязкость суспензии и позволяет в дальнейшем производить более точную корректировку вязкости при необходимости.

Значения динамической вязкости представлены на рисунке 8.

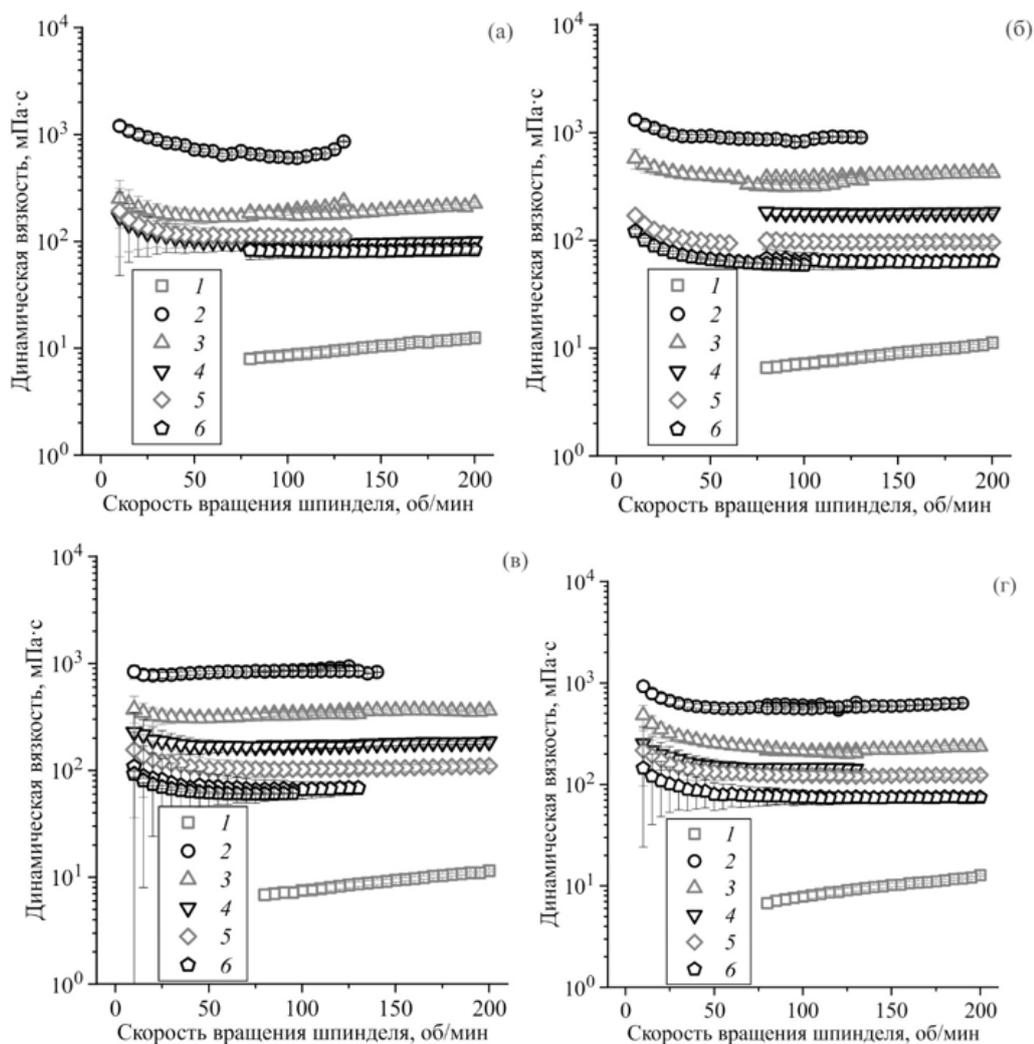


Рисунок 8 - Вязкость суспензии, приготовленной на связующих: BT13-02У (а); Ставроформ ВС (б); UltraCast One+ (в); UltraCast Prime (г), в зависимости от количества связующего (1 – связующее без наполнителя; 2 – 400 мл; 3 – 450 мл; 4 – 500 мл; 5 – 550 мл; 6 – 600 мл). Количество связующего приведено на 1 кг пылевидного кварцевого микропорошка

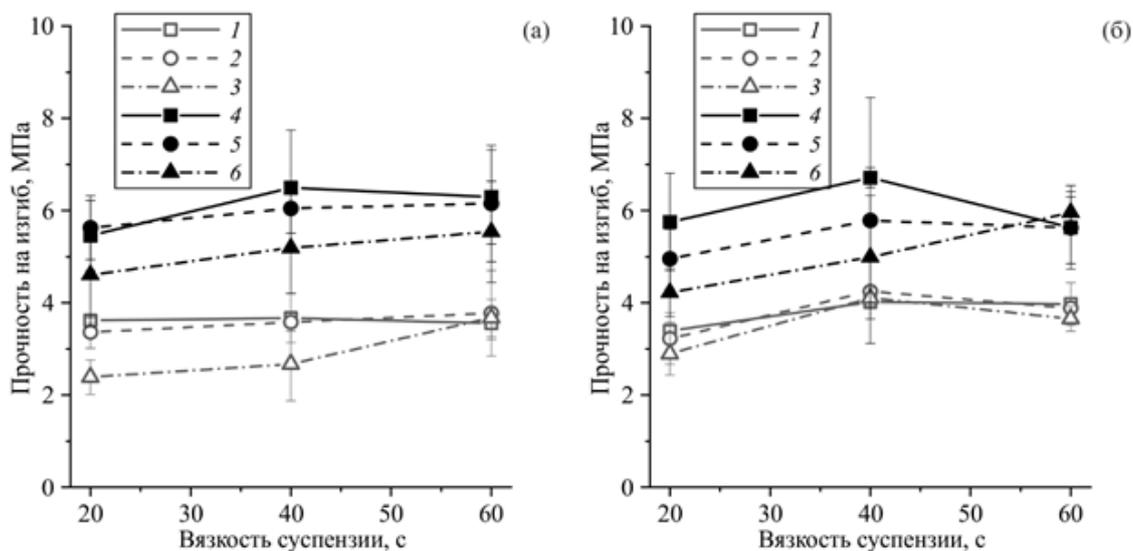
Вязкость всех связующих возрастает при увеличении скорости вращения шпинделя, что говорит о том, что они ведут себя как неньютоновские жидкости. Вязкость самих связующих находится в интервале 6–8 мПа·с при скорости

вращения шпинделя  $v = 75$  об/мин и 11-13 мПа·с при  $v = 200$  об/мин. Однако вязкость суспензий практически не зависит от скорости вращения шпинделя, небольшое уменьшение вязкости наблюдается при скорости вращения шпинделя до 50 об/мин. Таким образом, по своим реологическим свойствам суспензии близки к ньютоновским жидкостям [101].

### 3.3 Прочность керамической оболочки

Наиболее важной характеристикой керамической оболочки является её прочность, то есть прочность материала, из которого она изготовлена. На значение прочности влияет структура, а именно: фазовый состав, пористость, размер и форма керамических зёрен.

На рисунке 9 представлена прочность керамики в зависимости от вязкости суспензии. На графиках можно наблюдать, что прочность керамических образцов увеличивается с увеличением вязкости суспензии. Вязкость суспензии также увеличивается с увеличением количества вводимого наполнителя ПКП 0,045. В свою очередь, мелкодисперсная твёрдая фаза при спекании образует дополнительные места скрепления между частицами обсыпчного материала, что способствует увеличению прочности.



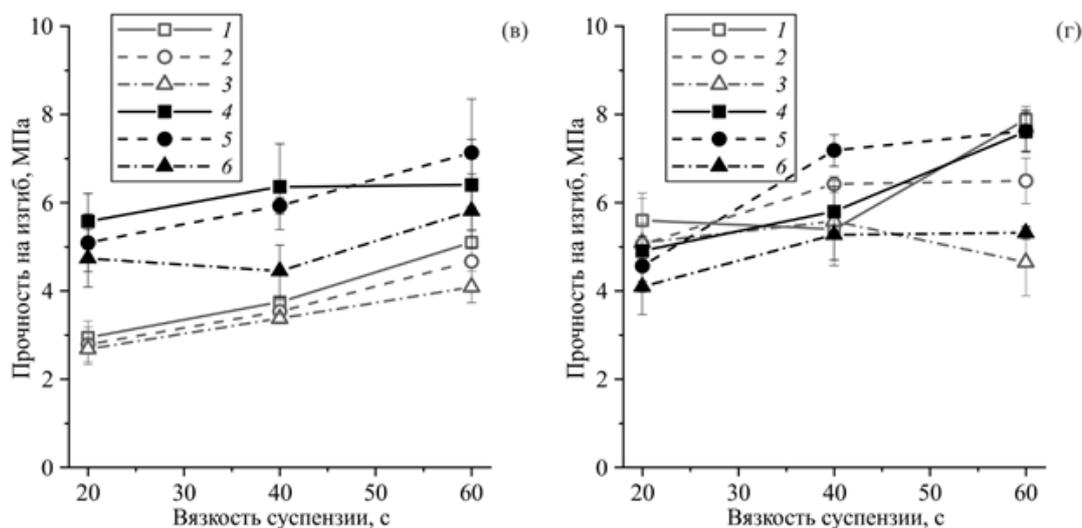
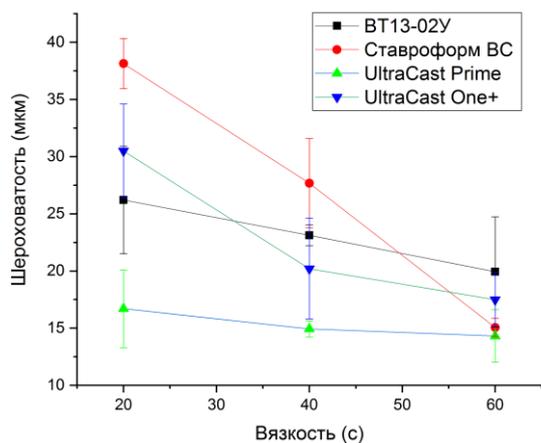


Рисунок 9 - Зависимости прочности от вязкости суспензии: BT13-02У (а); Ставроформ ВС (б); UltraCast One+ (в); UltraCast Prime (г) в состоянии после сушки (1-3) и прокалки (4-6). Фракция плавленного кварца: ПК 0,25-0,4 мм (1, 4); ПК 0,4-0,6 мм (2, 5); ПК 0,5-1,0 мм (3, 6)

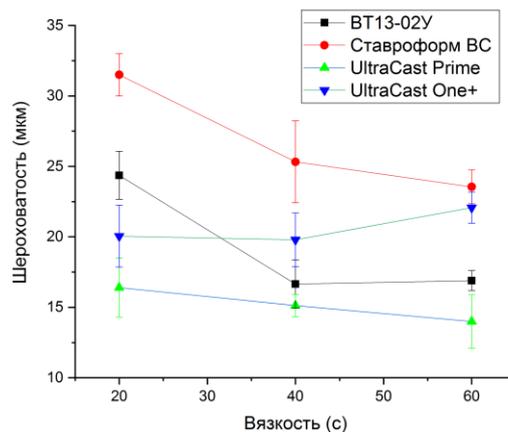
Прочность керамических образцов, изготовленных на связующем Ultracast One+, до прокалки и после является наибольшей по сравнению с другими связующими. До прокалки прочность составляет 5,10 МПа. После прокалки их при 900 °С прочность повысилась до 7,13 МПа. Высокие показатели прочности связующего Ultracast One+ связаны с наличием в его составе полимера, который придает связующему повышенные прочностные свойства в сыром состоянии по сравнению с другими связующими.

### 3.4 Шероховатость формообразующей поверхности керамической оболочки

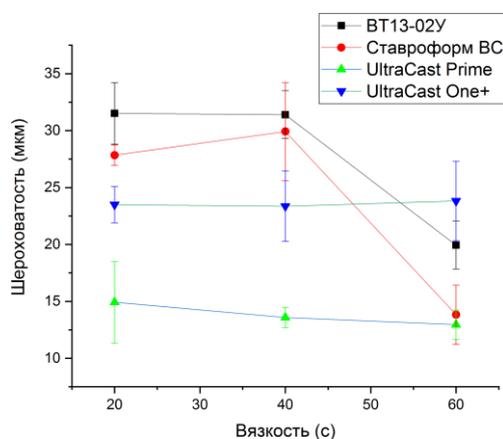
Большое влияние на шероховатость отливки оказывают качество поверхности модели, дисперсность материала наполнителя, наличие выгорающих добавок в связующем и равномерность нанесения суспензии на поверхность модели. На рисунке 10 представлены значения шероховатости формообразующей поверхности в зависимости от вязкости суспензии и фракция обсыпки.



а)



б)



в)

Рисунок 10 - Шероховатость формообразующей поверхности керамической оболочки (Rz) в зависимости от вязкости суспензии и размера материала обсыпки:  
а) ПК 0,25-0,4; б) ПК 0,4-0,6; в) ПК 0,5-1,0

Наименьшим значением шероховатости обладает керамическая оболочка, изготовленная на связующем UltraCast Prime. Использование в качестве материала обсыпки плавленного кварца фракции 0,4-0,6 мм позволяет получать шероховатость Rz 15,7 мкм, при фракции 0,25-0,4 мм – Rz 15,3 мкм, при фракции 0,5-1,0 мм – Rz 13,8 мкм.

Водные связующие Ставроформ ВС и BT 1302 У показывают более высокие значения шероховатости по сравнению со связующим UltraCast Prime. При использовании фракций 0,25 мм и 0,4 мм шероховатость керамики, изготовленной

на связующих Ставраформ ВС и ВТ 1302 У, составляет Rz 26,9 мкм и Rz 23,1 мкм, соответственно.

Водное связующее UltraCast One+ при использовании обсыпки фракции 0,25-0,4 мм также показывает снижение шероховатости с увеличением вязкости. При вязкости 20 с шероховатость составляет 30,49 мкм, однако при увеличении вязкости до 60 с шероховатость снижается до 17,49 мкм. Снижение шероховатости с увеличением вязкости при использовании связующего UltraCast One+ наблюдается только при использовании наименьшей (0,25-0,4 мм) фракции материала обсыпки. При использовании более крупных частиц обсыпки (0,4–0,6 мм), выгорание полимера не сильно влияет на шероховатость. Однако с увеличением вязкости суспензии шероховатость может возрасти с 19,79 мкм до 22,07 мкм. При использовании обсыпки более крупной фракции (0,5–1,0 мм) шероховатость остаётся практически неизменной.

На основании полученных данных было установлено, что образцы с наибольшей шероховатостью, независимо от марки связующего материала, были изготовлены при использовании наибольшей фракции огнеупорного материала обсыпки (0,5-1,0 мм) и суспензии наименьшей вязкости (~20 с), при этом шероховатость формообразующей поверхности увеличивается с 10 мкм до 37 мкм.

Наименьшая шероховатость, независимо от фракции материала обсыпки, наблюдается при использовании суспензии с наибольшей вязкостью ~60 с, поскольку при увеличении вязкости в суспензии становится больше мелкозернистого наполнителя (~50 мкм), способного заполнить межзёрненное пространство обсыпочногo материала, тем самым снижая шероховатость керамической формы.

### **3.5 Пористость керамической оболочки**

На рисунке 10 представлена открытая пористость керамической оболочки при различных вязкостях суспензии в зависимости от материала обсыпки.

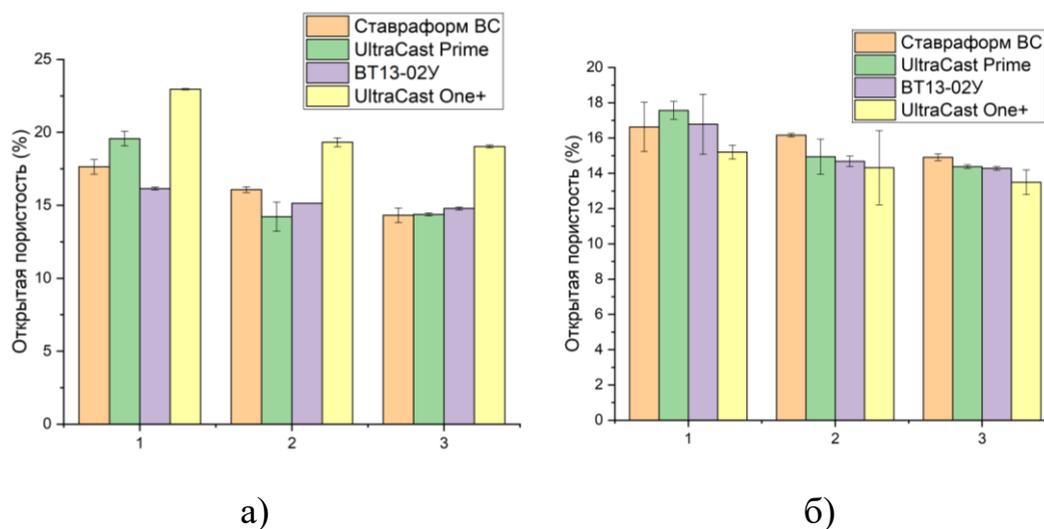


Рисунок 11 - Открытая пористость в зависимости от материала обсыпки:  
 1 – ПК 0,24-0,4; 2 – ПК 0,4-0,6; 3– ПК 0,5-1,0 мм; а) вязкость суспензии 40 с;  
 б) вязкость суспензии 60 с

При использовании суспензии с вязкостью 40 с наибольшее значение открытой пористости (22 %) имеют образцы керамической оболочки, изготовленные на связующем UltraCast One+. Связующее имеет в своем составе полимерную добавку, которая в процессе прокалики выгорает и образует пористость. При применении суспензий с вязкостью 60 с не наблюдается значительного отличия в величине пористости керамической оболочки в зависимости от марки используемого связующего, поскольку суспензия вязкостью 60 с содержит большее количество наполнителя, которое в процессе прокалики заполняет межзеренное пространство. Вне зависимости от вязкости суспензии, все связующие показывают снижение открытой пористости при увеличении фракции материала обсыпки, поскольку плавный кварц фракции 0,5-1,0 мм имеет неоднородное распределение, за счёт чего обеспечивается наиболее плотная упаковка.

### 3.6 Определение влияния времени прокалики на свойства керамической оболочки

Керамическая оболочка в процессе эксплуатации подвергается высокотемпературному обжигу (900-1100 °С), который придает керамике

необходимую прочность. Процесс заливки жаропрочных никелевых сплавов происходит в вакууме. После заливки керамическая оболочка извлекается из вакуумной камеры, и дальнейший процесс охлаждения происходит на воздухе, при этом охлаждение для крупногабаритных отливок длится не менее 24 часов. При этом является важно определить поведение керамической оболочки в процессе длительного высокотемпературного воздействия.

Методом ДСК установлено наличие превращений в материале связующего Ultracast Prime в процессе высокотемпературного нагрева до 1200 °С (рисунок 12).

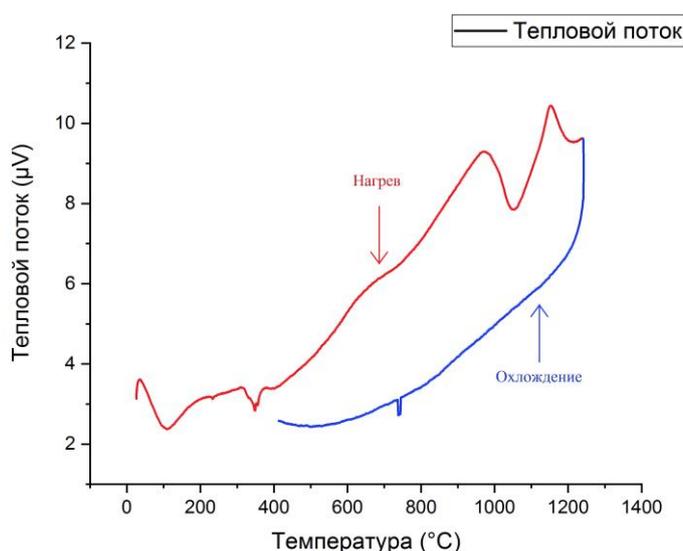


Рисунок 12 – Результаты ДСК связующего Ultracast Prime

Первый пик на кривой «Нагрев» наблюдался в интервале температур 0-200 °С, в момент которого происходит удаление остатков воды. При температуре 350 °С наблюдается пик, который характеризует процесс выгорания органических добавок и удаление химически связанной воды. При 600 °С наблюдается незначительный пик, который характеризует переход  $\beta$ -кварца в  $\alpha$ -кварц. Далее наблюдается переход  $\alpha$ -кварца в  $\alpha$ -тридимит (900-1150 °С) и  $\alpha$ -кристобалит (1150-1200 °С). На кривой «Охлаждение» имеется только один пик в интервале 650-800 °С

Проведённый ДСК анализ материала обсыпки (плавленый кварц фракции 0,25-0,4 мм) представлен на рисунке 13.

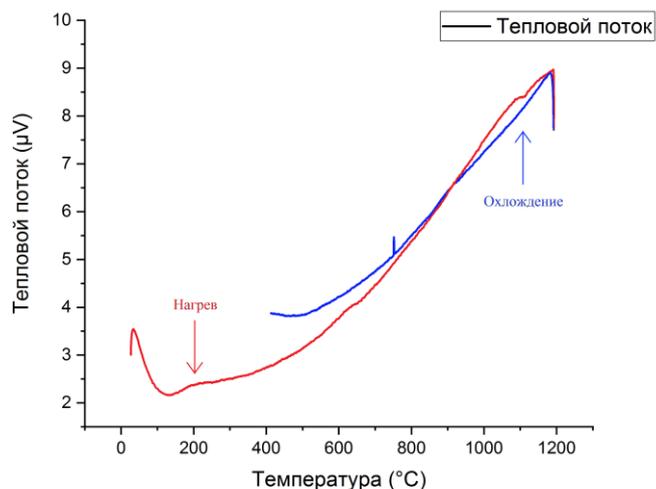


Рисунок 13 – Результаты ДСК плавленого кварца фракции 0,25-0,4 мм

Анализ плавленого кварца показал наличие значимых полиморфных превращений при температуре 1100 °C. Незначительные эффекты при других температурах объясняются наличием в плавленом кварце 0,5 % кристаллической фазы, которая претерпевает фазовые переходы. Отсутствие резких пиков говорит о том, что материал обсыпки в меньшей степени подвержен полиморфным превращениям, в отличие от материала связующего.

Результаты ДСК подтверждаются рентгенофазовым анализом (рисунок 14).

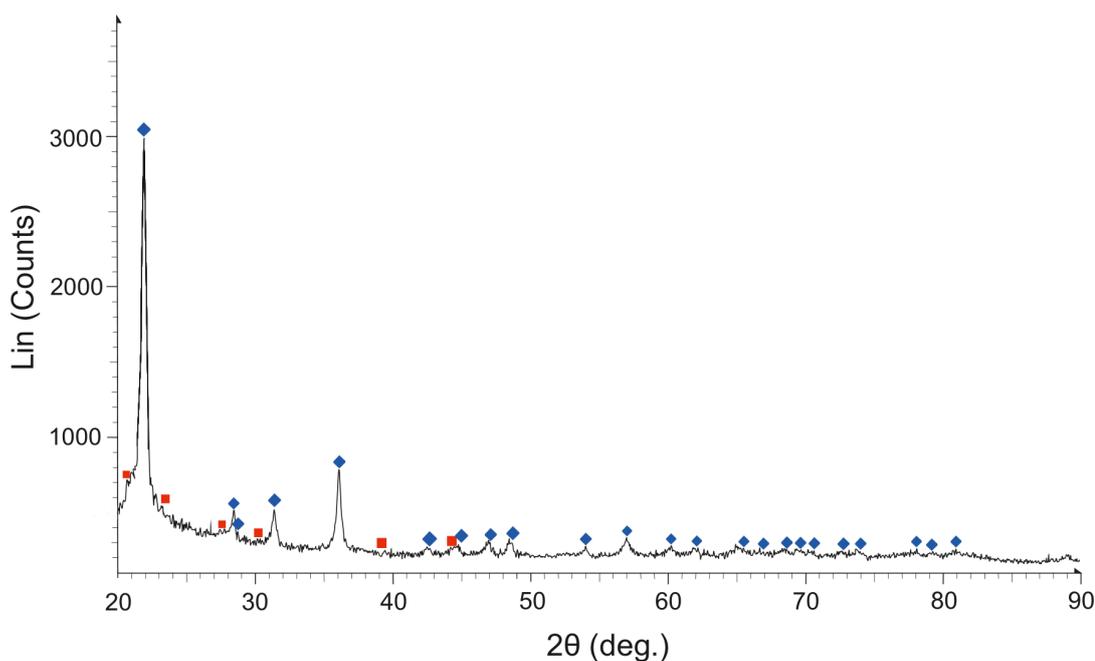


Рисунок 14 – Рентгенограмма керамической оболочки, изготовленной с использованием связующих Ultracast после заливки никелевого жаропрочного сплава при температуре  $\sim 1500$  °С,  
■ - тридимит, ◆ - кристобалит

Результаты рентгенофазового анализа показали, что после заливки никелевого жаропрочного сплава при температуре  $\sim 1500$  °С в керамическую оболочку, изготовленную с использованием плавленного кварца, в её составе, помимо аморфной фазы, также присутствуют фазы кристобалита и тридимита. Ранее в работах также наблюдалось образование тридимита; так как кристобалит является метастабильной фазой, то в процессе охлаждения происходит частичный переход кристобалита в тридимит – более стабильную модификацию [101]. Интенсивность пиков позволяет сделать вывод, что фаза кристобалита представлена в большем количестве, чем фаза тридимита.

На рисунке 15 показано, как меняется открытая пористость керамической оболочки в зависимости от времени выдержки при максимальной температуре 900 °С. Для этого была изготовлена керамическая оболочка на основе связующих Ultracast PRIME, Ultracast ONE+ и гидролизованного раствора этилсиликата.

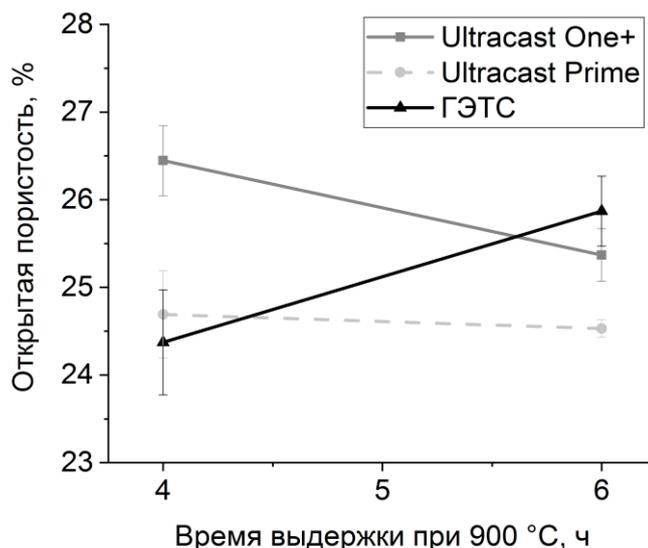


Рисунок 15 - Изменение открытой пористости керамической оболочки от времени выдержки, изготовленной из связующих: Ultracast ONE+, Ultracast Prime и гидролизованном растворе этилсиликата (ГЭТС)

Наибольшую пористость имеют образцы, изготовленные с использованием водного связующего Ultracast ONE+ - пористость 26,44 %. Наименьшая пористость (24,37 %) наблюдается у образцов, изготовленных с использованием гидролизованного раствора этилсиликата.

При повышении температуры и увеличении времени выдержки происходит процесс спекания, в ходе которого происходит сближение частиц материала, что приводит к снижению пористости. Поскольку керамические оболочки, изготовленные из связующих Ultracast ONE+ и Ultracast PRIME, на начальном этапе прокалики имеют высокую пористость, то увеличение времени выдержки при температуре 900 °С приводит к снижению пористости, так как поры позволяют керамическим частицам беспрепятственно расширяться в процессе полиморфных превращений. Для керамической оболочки, изготовленной на связующем ГЭТС, увеличение времени выдержки при температуре 900 °С с 4 до 6 часов, приводит к увеличению пористости, поскольку изначально низкая пористость материала служит препятствием для расширения зерен наполнителя; это приводит к возникновению микротрещин в керамическом материале.

Микротрещины, в свою очередь, способствуют увеличению пористости материала.

Изменение линейных размеров (рисунок 16) керамической оболочки зависит от протекающих полиморфных превращений.

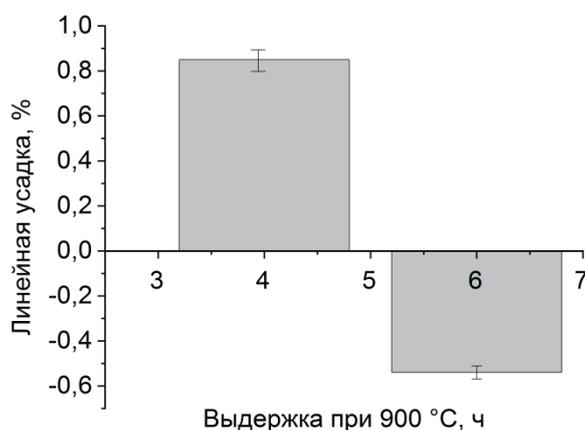


Рисунок 16 – Линейная усадка керамической оболочки, изготовленной на связующем Ultracast PRIME

На начальном этапе прокалики происходит процесс спекания керамики и сближение частиц, выдержка в течение 4 ч при температуре 900 °C приводит к уменьшению линейных размеров образца на 0,8 %. При повторном нагреве образца и увеличении времени выдержки до 6 ч (температура 900 °C) происходит процесс полиморфного превращения аморфной фазы кварца в кристаллическую. Фазовый переход сопровождается изменением объёма, и как следствие – увеличение линейных размеров образца на 0,5 %.

Определение механических свойств керамической оболочки (рисунок 17) в зависимости от времени прокалики показало, что с увеличением времени выдержки при максимальной температуре 900 °C прочность, вне зависимости от марки связующего, снижается.

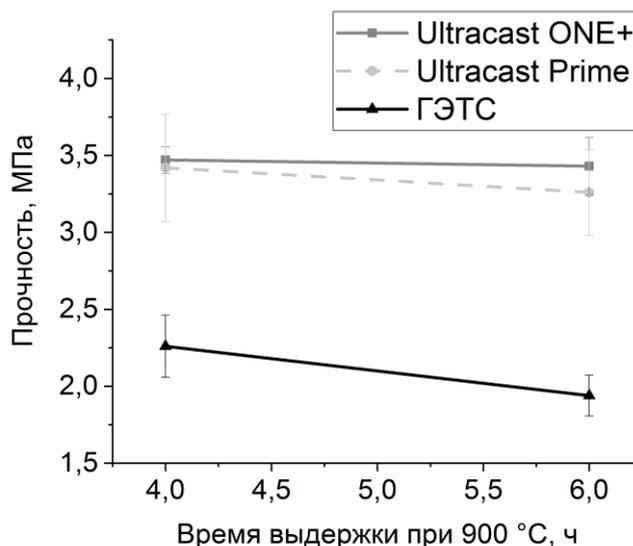


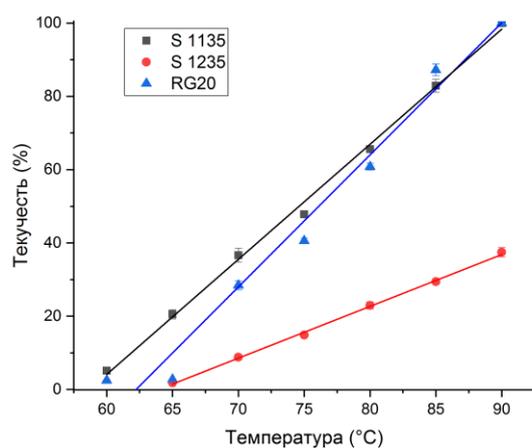
Рисунок 17 - Зависимость прочности от времени выдержки для керамической оболочки, изготовленной из связующих: Ultracast ONE+, Ultracast Prime и гидролизированный раствор этилсиликата (ГЭТС)

Для связующего Ultracast ONE+ с увеличением времени выдержки прочность снижается на 2,8 %, при этом связующие Ultracast PRIME и ГЭТС показывают схожие значения снижения прочности – 14,6 % и 14,16 %, соответственно. Можно предположить, что связующее Ultracast ONE+ показывает наименьшее снижение прочности за счёт большей концентрации диоксида кремния (~27 %), в отличие от связующих Ultracast PRIME (~25 %) и ГЭТС (~20 %). Полученные данные необходимо учитывать при изготовлении керамических оболочек, поскольку высокая прочность формы может привести к образованию горячих трещин в процессе усадки отливки.

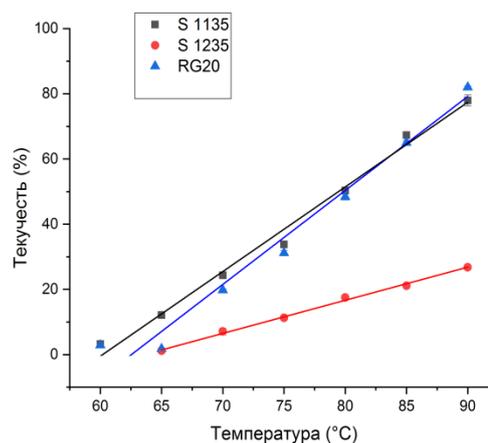
### 3.7 Исследование текучести наполненных восков

Наиболее эффективными свойствами воска являются текучесть и вязкость, которые характеризуют заполняемость модельной массой полости пресс-форм и, как следствие, качество изготовления моделей, в том числе тонкостенных, а также качество удаления модельного состава из полости керамической формы [102-105].

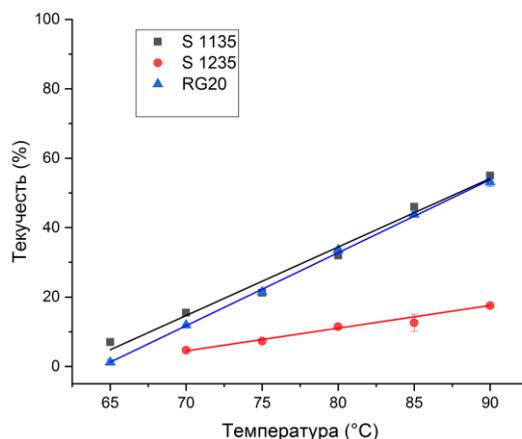
На рисунке 18 представлена зависимость текучести восков от температуры запрессовки. Из графиков видно, что лучшей текучестью обладают воска марок S1135 и RG20, при этом воск S1235 показал наихудшую текучесть по сравнению с другими восками. Воска S1235 и RG20 содержат одинаковый наполнитель – сшитый сферический полистирол в количестве 35 % и 18 %, соответственно. С увеличением количества наполнителя снижается способность материала заполнять полость формы. Например, при давлении 0,2 МПа воск RG20 заполняет полость формы полностью, а воск S1235 – только на 39,69 %. Воск S1135 в своём составе содержит схожее с воском S1235 количество наполнителя – 35 %, при этом в качестве наполнителя используется как сшитый сферический полистирол, так и терефталевая кислота. Воск марки S1135 показывает схожие с воском RG20 значения текучести в интервале температур 80-90 °С, однако при снижении температуры запрессовки ниже 80 °С воск S1135 показывает лучшую текучесть в сравнении с воском RG20. Исходя из этого, можно предположить, что в воске S1135 в качестве наполнителя используется 18 % сшитого сферического полистирола и 17 % терефталевой кислоты.



а)



б)



в)

Рисунок 18 - Текучесть восков S1135, S1235 и RG20 при различных давлениях:  
а) 0,1 МПа, б) 0,15 МПа, в) 0,2 МПа

На рисунке 19 представлен график изменения динамической вязкости в зависимости от температуры наполненных восков марок S1135, S1235 и RG20.

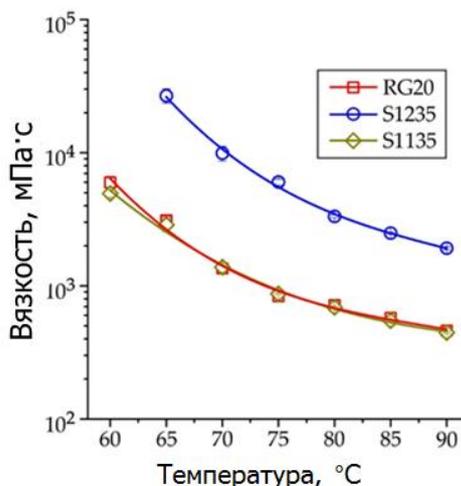
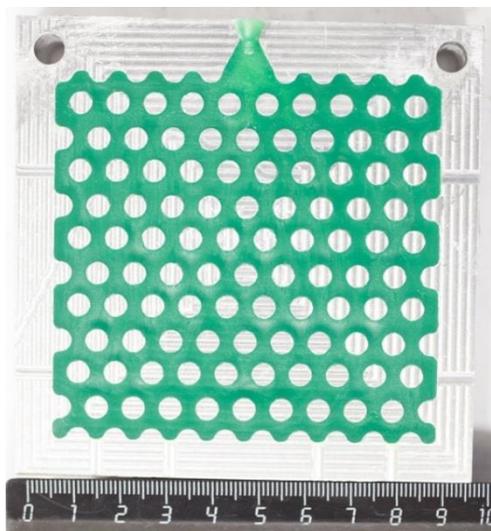


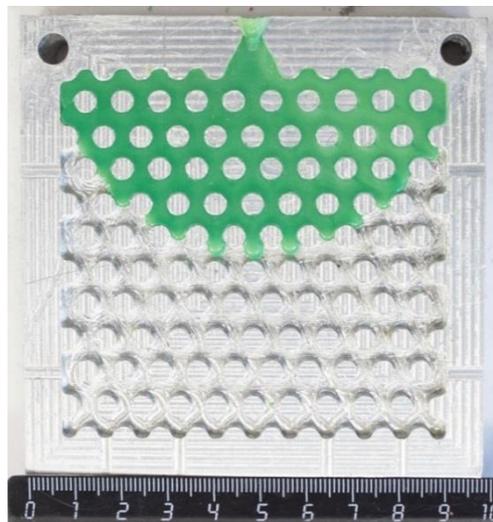
Рисунок 19 - Динамическая вязкость восков S1135, S1235 и RG20  
в зависимости от температуры

Из графика видно, что с увеличением температуры с 60 °C до 90 °C вязкость восков снижается. Полученные значения по вязкости восков согласуются с данными по текучести. Воск S1235, обладающий высокими показателями вязкости, показывает наименьшую текучесть.

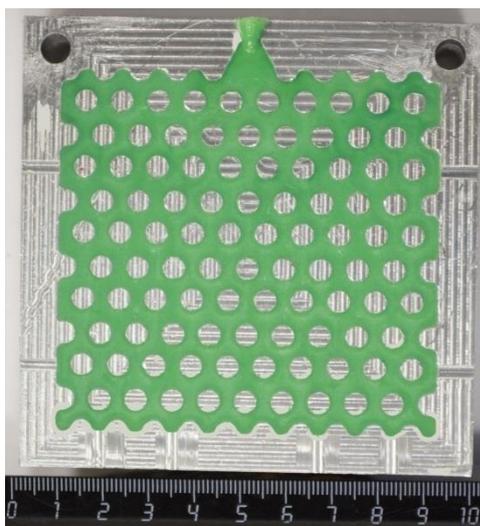
Форма для определения текучести восковых материалов после запрессовки (давление прессования 0,2 МПа, температура прессования 90 °С) представлена на рисунке 20.



а)



б)



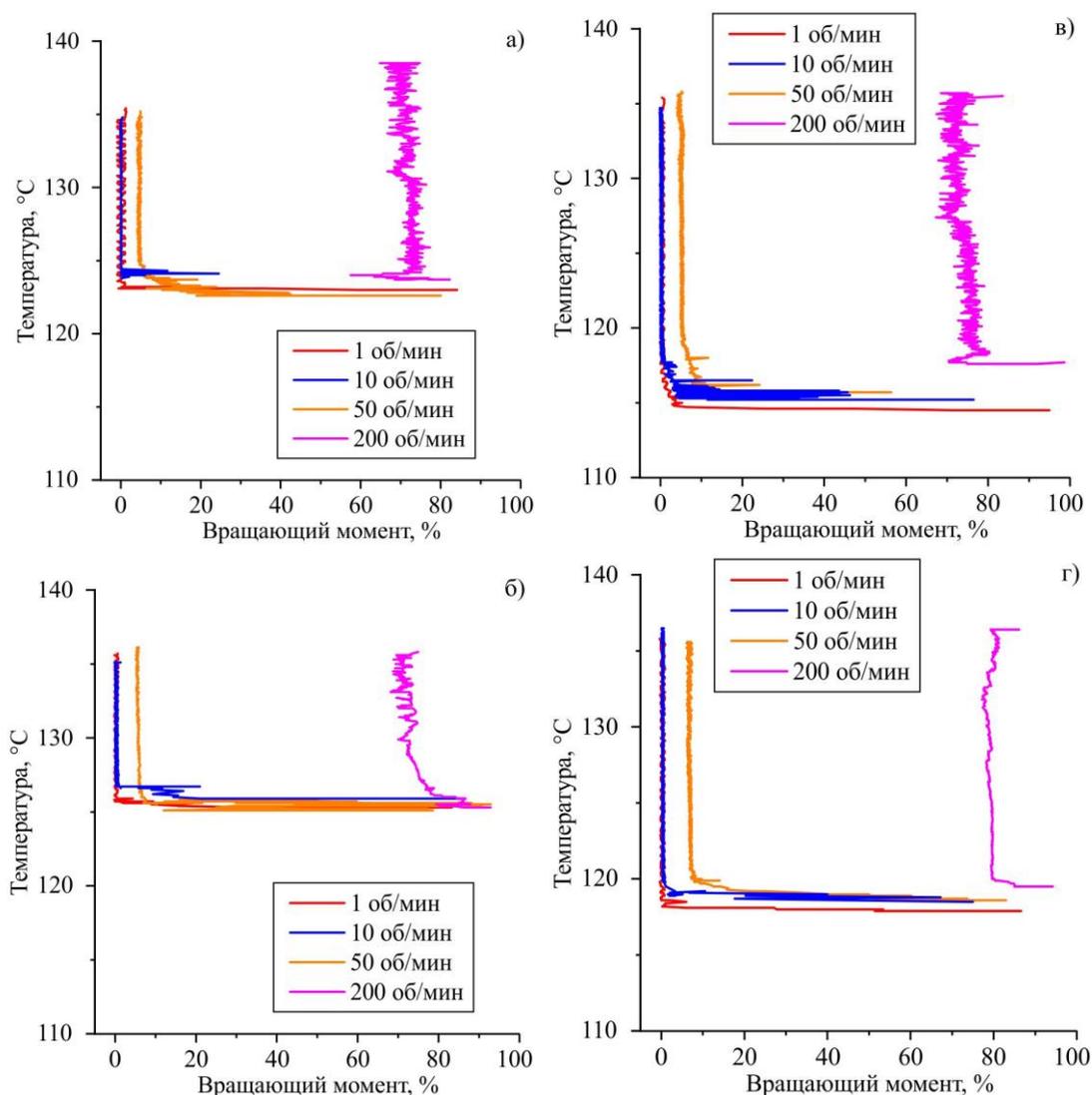
в)

Рисунок 20 – Форма для определения текучести восковых материалов после запрессовки (давление прессования 0,2 МПа, температура прессования 90 °С) модельным воском RG20 (а), S1235 (б), S1135 (в)

### 3.8 Исследование влияния добавок на свойства водорастворимых модельных составов

Введение различных добавок в модельные композиции на основе карбамида приводит к изменению их технологических свойств.

Основным технологическим свойством является температура плавления модельной композиции, поскольку от неё будет зависеть процесс изготовления модели. На рисунке 21 представлена зависимость вращающего момента от температуры.



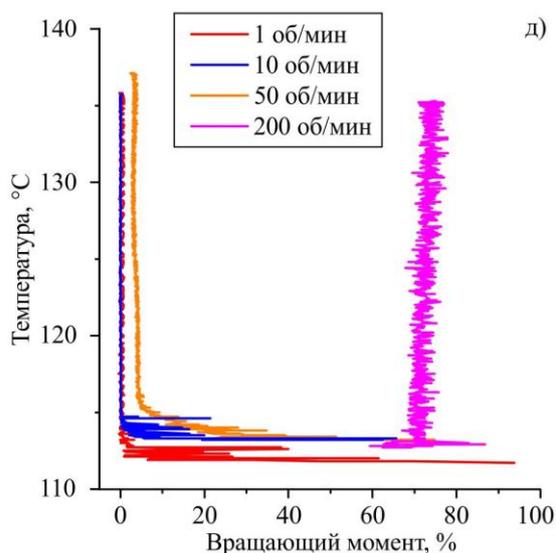


Рисунок 21– Вращающий момент модельных композиций на основе карбамида с различными добавками: а) 2 %  $MgSO_4$ , б) 2 %  $MgSO_4$  + 2 % ПВС, в) 10 %  $KNO_3$ , г) 10 %  $KNO_3$  + 2 % ПВС, д) 10 %  $KNO_3$  + 2 % диметилглиоксим

На начальном этапе при температуре 135-130 °C не наблюдается изменений во вращающем моменте, однако при снижении температуры ниже 125 °C в некоторых составах наблюдается резкое увеличение вращающего момента. Данные изменения соответствуют температурам, при которых происходит образование кристаллического каркаса. Так, для составов, содержащих добавку  $KNO_3$ , он формируется при температурах 115-120 °C, а для составов с добавкой  $MgSO_4$  – 123–126 °C.

Определение величины линейной усадки (рисунок 22) показало, что наименьшую усадку имеют составы с добавками 10 %  $KNO_3$  и 10 %  $KNO_3$  + 2 % диметилглиоксима, которая составила  $(0,3 \pm 0,02)$  мм и  $(0,3 \pm 0,12)$  мм, соответственно. Наибольшую усадку показали образцы 2 %  $MgSO_4$  + 2 % ПВС –  $(0,5 \pm 0,09)$  мм и 2 %  $MgSO_4$  –  $(0,4 \pm 0,07)$  мм. Установлено, что добавка 2 % ПВС, вне зависимости от других добавок, увеличивает величину усадки водорастворимой модели на ~0,1 %.

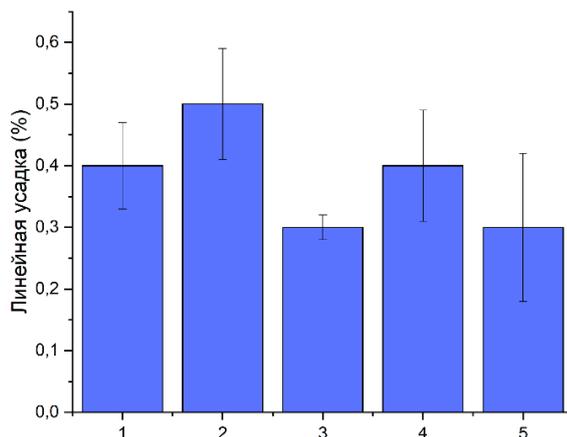


Рисунок 22 - Линейная усадка модельных композиций на основе карбамида с различными добавками: 1 – 2 %  $MgSO_4$ , 2 – 2 %  $MgSO_4$  + 2 % ПВС, 3 – 10 %  $KNO_3$ , 4 – 10 %  $KNO_3$  + 2 % ПВС, 5 – 10 %  $KNO_3$  + 2 % диметилглиоксим

Методом трёхточечного изгиба установлено, что добавка 10 %  $KNO_3$  в состав модельной композиции на основе карбамида приводит к увеличению её прочности (рисунок 23), которая составляет  $(13,42 \pm 1,5)$  МПа, при этом добавка 2 % ПВС приводит к дополнительному увеличению прочности до  $(15,92 \pm 2,8)$  МПа.

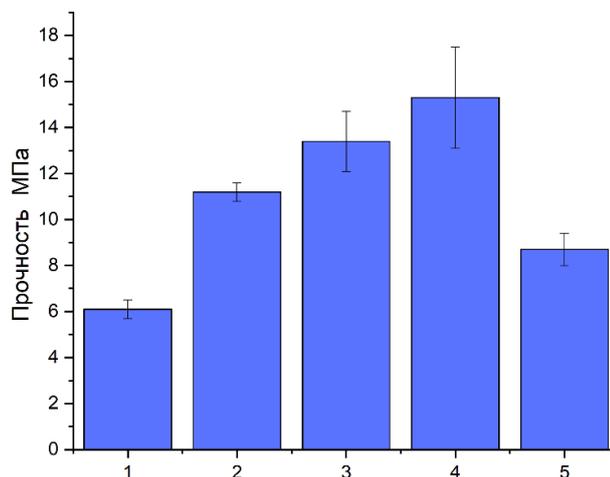


Рисунок 23 – Прочность модельных композиций на основе карбамида с различными добавками: 1 – 2 %  $MgSO_4$ , 2 – 2 %  $MgSO_4$  + 2 % ПВС, 3 – 10 %  $KNO_3$ , 4 – 10 %  $KNO_3$  + 2 % ПВС, 5 – 10 %  $KNO_3$  + 2 % диметилглиоксим

Увеличение прочности материала модельной композиции происходит из-за особенностей кристаллизации карбамида и нитрата калия. В процессе охлаждения частицы  $KNO_3$  выступают в роли центров кристаллизации, которые начинают интенсивно выделяться по мере охлаждения раствора; тем самым создается прочный каркас, который обеспечивает высокие механические свойства, при этом выделяющиеся частицы уменьшают линейную усадку материала модельной композиции. Введение в расплав 10 %  $KNO_3$  позволяет получать модели шероховатостью до  $Rz\ 7,7$  мкм, при этом дополнительное введение 2 % ПВС или 2 % диметилглиоксима снижает шероховатость до  $Rz\ 4,1$  мкм и  $Rz\ 4,6$  мкм, соответственно (рисунок 24).

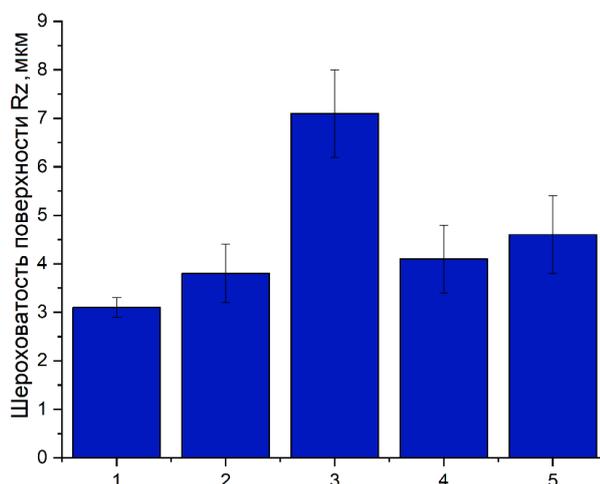


Рисунок 24 – Шероховатость поверхности модельных композиций в зависимости от добавок: 1 – 2 %  $MgSO_4$ , 2 – 2 %  $MgSO_4$  + 2 % ПВС, 3 – 10 %  $KNO_3$ , 4 – 10 %  $KNO_3$  + 2 % ПВС, 5 – 10 %  $KNO_3$  + 2 % диметилглиоксим

Образец с добавкой 2 %  $MgSO_4$  обладает прочностью  $(6,07 \pm 0,4)$  МПа, добавка 2 % ПВС увеличивает прочность до  $(9,33 \pm 0,4)$  МПа, при этом, наряду с увеличением усадки, увеличивается шероховатость поверхности [107,108]. Так, у образца с добавкой 2 %  $MgSO_4$  шероховатость составляет  $Rz\ 3,1$  мкм, при введении 2 % ПВС шероховатость возрастает до  $Rz\ 3,8$  мкм.

Определение плотности водорастворимых моделей показало, что плотность всех составов близка к плотности карбамида и находится в диапазоне 1,3–1,4 г/см<sup>3</sup>.

Знание величины скорости растворения модельных составов в воде позволяет прогнозировать их поведение при взаимодействии с водным связующим в процессе нанесения суспензии. Растворимость в воде различных композиций на основе карбамида представлена на рисунке 25. Из полученных данных установлено, что высокая растворимость в воде образцов наблюдается для составов, содержащих 10 % KNO<sub>3</sub>, а также 10 % KNO<sub>3</sub> + 2 % диметилглиоксима. При этом добавка 2 % ПВС в состав с 10 % KNO<sub>3</sub> снижает его растворимость на 58 %, поскольку поливиниловый спирт обладает малой растворимостью при комнатной температуре. Добавка 2 % ПВС в состав с 2 % MgSO<sub>4</sub> также приводит к снижению растворимости с 81 % до 14 %, что оказывает благоприятное влияние на процесс нанесения керамической оболочки.

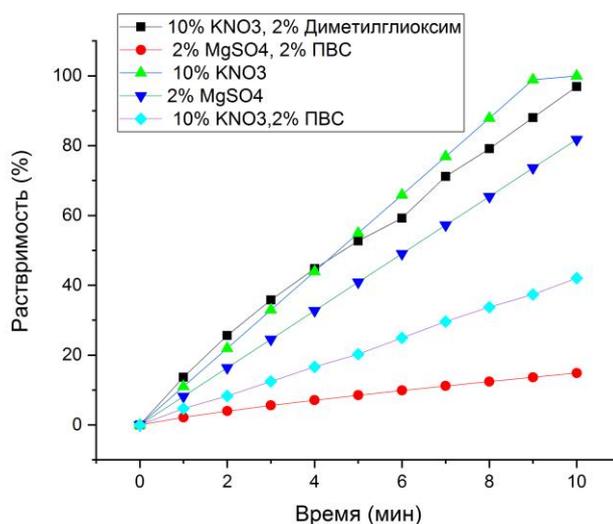


Рисунок 25 – Кинетика растворения в воде материала модельных композиций на основе карбамида в зависимости от времени

Модельный состав с добавкой 2% ПВС имеет малую скорость растворения в воде. Поливиниловый спирт в процессе растворения проходит стадию набухания и только потом растворяется в воде (рисунок 26). При этом в процессе удаления

материала модельной композиции, содержащей ПВС, возможно разрушение керамической формы за счёт разбухания ПВС.



Рисунок 26 - Общий вид образца, содержащего 2 % ПВС, после частичного растворения в воде

### 3.9 Смачиваемость водным связующим Ultracast One+ материала модельных композиций на основе карбамида

Зависимость краевого угла смачивания водным связующим Ultracast One+ материала модельных композиций на основе карбамида от времени представлена на рисунке 27.

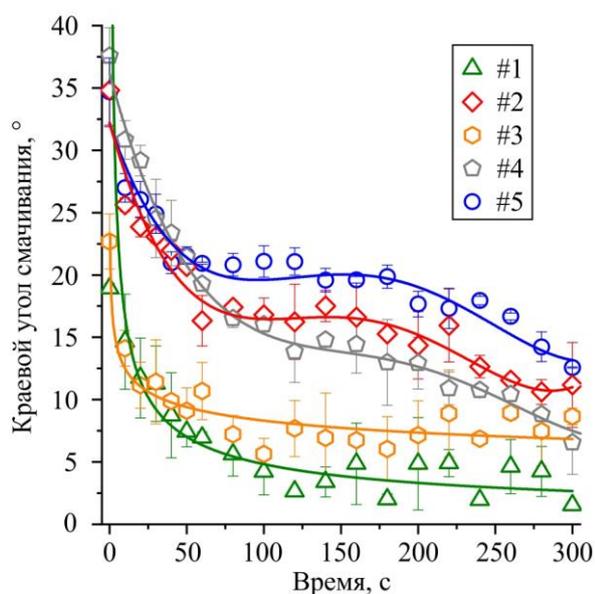


Рисунок 27 - Краевой угол смачивания материала модельных композиций в зависимости от добавок: 1 – 2 %  $MgSO_4$ , 2 – 2 %  $MgSO_4$  + 2 % ПВС, 3 – 10 %  $KNO_3$ , 4 – 10 %  $KNO_3$  + 2 % ПВС, 5 – 10 %  $KNO_3$  + 2 % диметилглиоксим

Из приведённых на данном рисунке результатов видно, что наименьшим краевым углом смачивания обладают составы на основе карбамида с добавками 2 %  $MgSO_4$  и 10 %  $KNO_3$  – 18,9° и 22,7°, соответственно; его величина уменьшается с увеличением временем выдержки. В интервале 120-250 мин наблюдается скачок величины краевого угла смачивания, который характеризуется началом взаимодействия между материалами модели и связующего. При этом происходит рост кристаллов карбамида, который вызывает незначительное увеличение краевого угла смачивания. Установлено, что добавки ПВС и диметилглиоксима в состав связующего приводят к увеличению смачиваемости. На начальном этапе составы с добавками ПВС и диметилглиоксима ведут себя одинаково, однако при увеличении времени выдержки составы с ПВС показывают более существенное снижение краевого угла смачивания по сравнению с модельной композицией, в составе которой присутствует диметилглиоксим. Спустя 5 минут во всех модельных составах на основе карбамида образуются кристаллы, что говорит об интенсивно протекающем взаимодействии между материалами модели и связующего.

На рисунке 28 представлены образцы спустя два часа после взаимодействия в водном связующем Ultracast One+, при этом видно, что на модельном составе, содержащем 10 %  $KNO_3$  наблюдается интенсивный рост кристаллов карбамида. На образце с содержанием 2 % ПВС интенсивного роста кристаллов не наблюдается.



а)



б)

Рисунок 28 – Фото образцов после нанесения водного связующего Ultracast One+:  
а) 10 %  $KNO_3$ , б) 10 %  $KNO_3$  + 2 % ПВС

На рисунке 29 представлена керамическая оболочка, изготовленная на базе водного связующего Ultracast One+.



а)



б)

Рисунок 29 – Керамическая оболочка на модели из карбамида:  
а) 10 %  $KNO_3$ , б) 10 %  $KNO_3$  + 2 % ПВС

На поверхности модели с добавкой 10 %  $KNO_3$  в процессе взаимодействия поверхности модели с водой происходит рост кристаллов карбамида (рисунок 25, а), при этом взаимодействии происходит разрушение керамической оболочки. Добавка 2 % ПВС в состав материала модельной композиции позволило сформировать керамическую оболочку на поверхности модели, при этом в процессе взаимодействия не происходило интенсивного роста кристаллов. Исходя из этого, можно сделать вывод, что добавка поливинилового спирта позволяет сдерживать рост кристаллов карбамида, благодаря чему керамическая форма полностью не разрушается.

### 3.10 Разработка защитного покрытия поверхности карбамидной модели от контакта с водой

Введение добавок в материал модельной композиции на основе карбамида не позволяет добиться получения качественной керамической оболочки с применением водных связующих, поэтому были разработаны различные составы защитных покрытий, наносимых на поверхность модели.

Состав № 1 – 4 % поливинилбутираль (ПВБ), растворитель этиловый спирт – 100 мл;

Состав № 2 – 2 % ПВБ, растворитель этиловый спирт – 100 мл;

Состав № 3 – 4 % парафин П-2, растворитель бензин «Калоша» – 100 мл;

Состав № 4 – 3 % ПС 50-50, растворитель бензин «Калоша» - 100 мл;

Состав № 5 – лак АК-593;

Состав № 6 – 1 слой лак АК-593, 2 слой 5 % канифоли сосновой марки А, растворитель этиловый спирт – 100 мл;

Использование в качестве защитного покрытия составов, содержащих поливинилбутираль (ПВБ), растворенный в этиловом спирте, в момент нанесения привело к значительному снижению (до  $28,4^\circ$ ) краевого угла смачивания между материалами модели и связующего. Такое низкое значение краевого угла может говорить о растворении материала модели в спирте, поскольку спирт растворяет карбамид. Увеличение концентрации ПВБ до 4 % в составе покрытия увеличило краевой угол смачивания до  $62,6^\circ$ , что свидетельствует о плохой смачиваемости им материала модели на основе карбамида (рисунок 30).

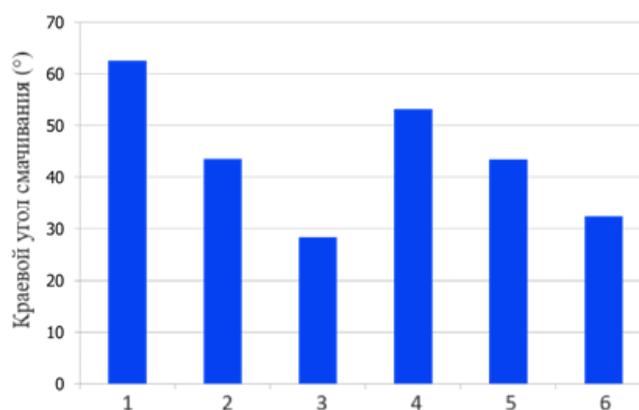


Рисунок 30 - Краевой угол смачивания при использовании в качестве покрытий:

1 – 4 % ПВБ, 2 – 4% парафин, 3 – 2 % ПВБ, 4 – 3 % ПС 50-50,  
5 – лак АК-593 (составы № 1–5)

На рисунке 31 представлена зависимость от времени краевого угла смачивания между материалами модели и связующего, при этом в качестве защитного покрытия использовался лак АК-593 и раствор канифоли в этиловом спирте.

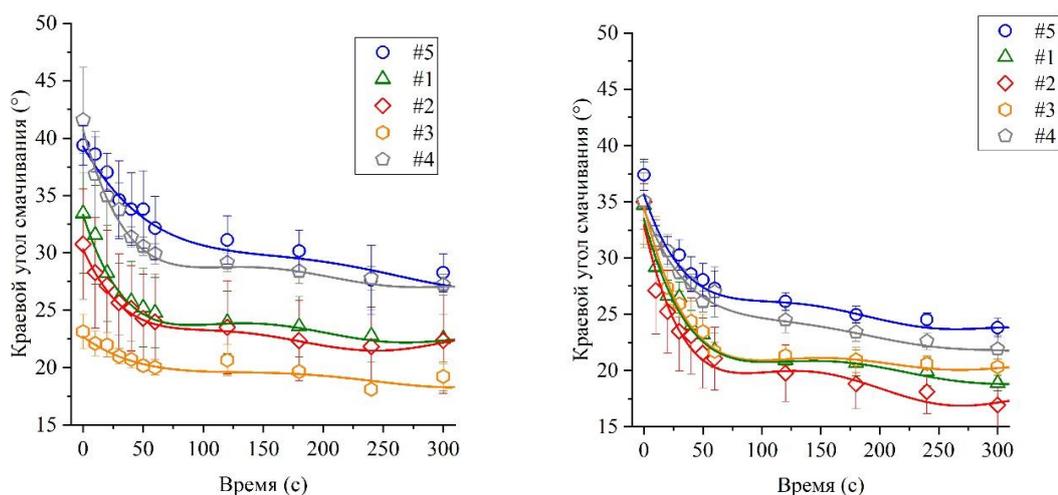


Рисунок 31 - Краевой угол смачивания в зависимости от времени. Составы моделей: 1 – 2 %  $MgSO_4$ , 2 – 2 %  $MgSO_4$  + 2 % ПВС, 3 – 10 %  $KNO_3$ , 4 – 10 %  $KNO_3$  + 2 % ПВС, 5 – 10 %  $KNO_3$  + 2 % диметилглиоксима; а) покрытие - лак АК-593, б) покрытие - лак АК-593 и 5 % канифоли сосновой

Состав на основе карбамида с добавками 10 %  $KNO_3$  + 2 % диметилглиоксима, даже при наличии покрытия, показывает наибольшее значение краевого угла смачивания по сравнению с другими составами. Нанесение дополнительного слоя, состоящего из 5 % канифоли, растворённой в спирте, приводит к снижению краевого угла смачивания между материалами модели и связующего с  $40,5^\circ$  до  $30,7^\circ$ . При применении двухслойного защитного покрытия (1-й слой – лак АК-593 и 2-й – 5 % раствор канифоли в спирте) краевой угол смачивания снижается на  $\sim 5^\circ$  при одновременном уменьшении влияния на этот показатель материала модели.

### 3.11 Исследование поверхности керамической оболочки после заливки жаропрочным никелевым сплавом ВЖЛ14Н-ВИ

Химический состав сплава согласно ОСТ 1-90126-85 представлен в таблице 6.

Таблица 6 - Химический состав сплава ВЖЛ14Н-ВИ, % масс, ОСТ 1-90126-85

C	S	P	Mn	Cr	Ti	Si	Ni	Nb	Mo	Fe	Ce	B	Al
0,03-0,08	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,40	18,0-20,0	2,50-2,90	≤ 0,40	Основа	1,80-2,80	4,0-5,0	8,0-10,0	≤ 0,025	≤ 0,005	1,20-1,50

Исследованию подвергалась керамическая оболочка, изготовленная на основе ГЭТС, заливка расплавом производилась в вакууме. На рисунке 32 представлена морфология поверхности керамической оболочки после контакта с расплавом. Шероховатость поверхности керамической оболочки составила Rz 43,85 мкм, шероховатость отливки Rz 26,5 мкм. Цвет контактирующей поверхности керамической оболочки – черный, размер находится в диапазоне от 5 до 8 мкм.

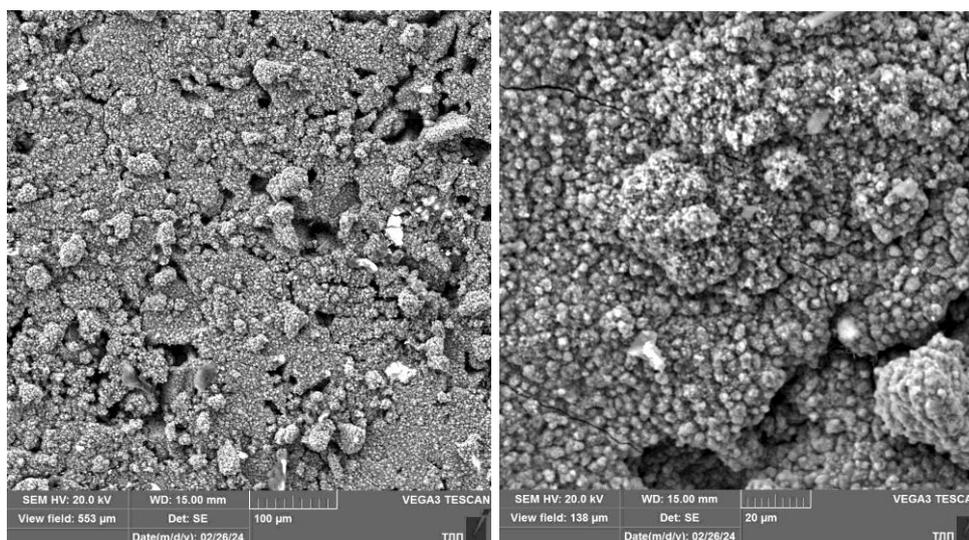
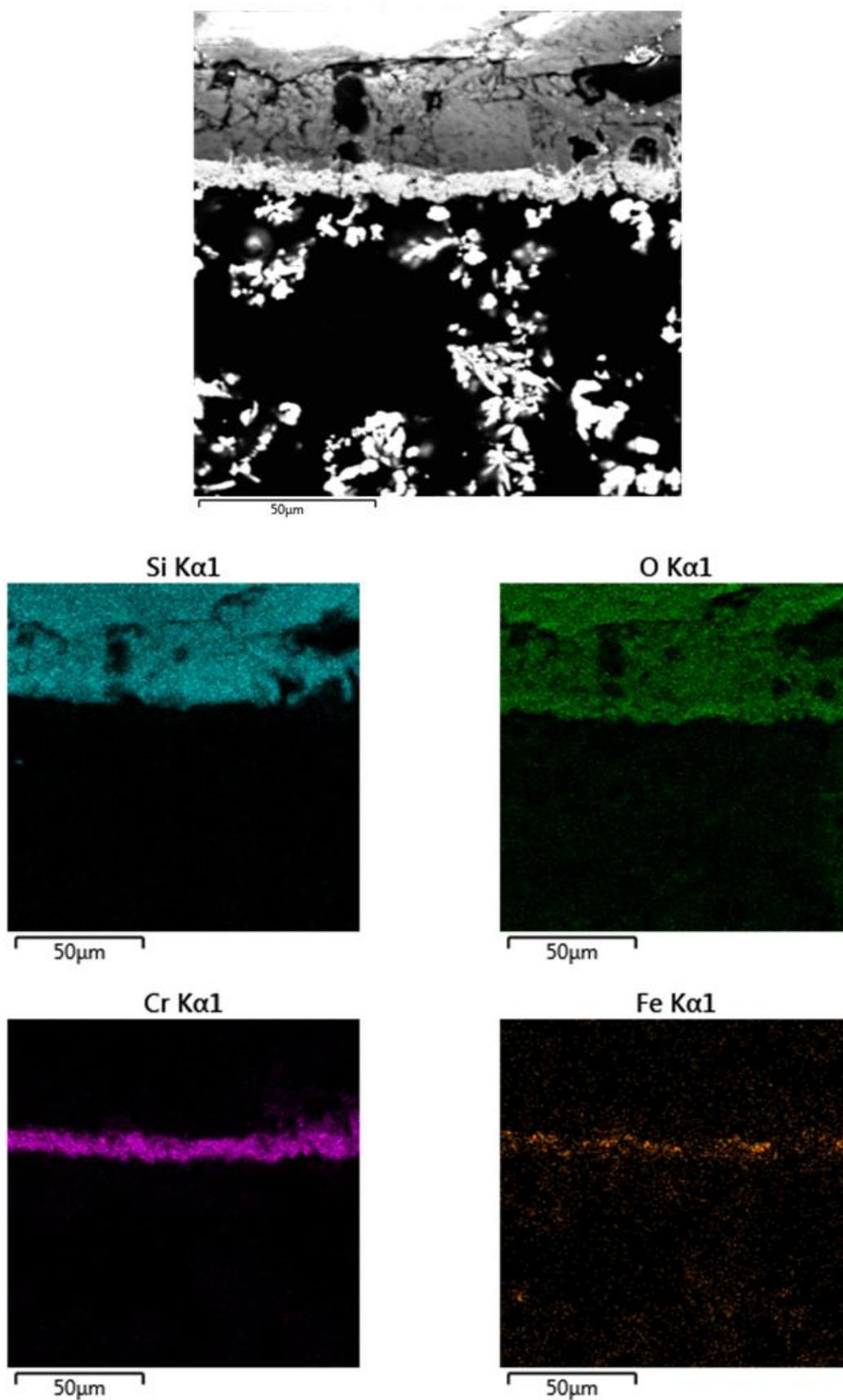


Рисунок 32 - Формообразующая поверхность керамической оболочки

после контакта с расплавленным металлом при различных увеличениях

Результаты микрорентгеноспектрального анализа представлены на рисунке 33.



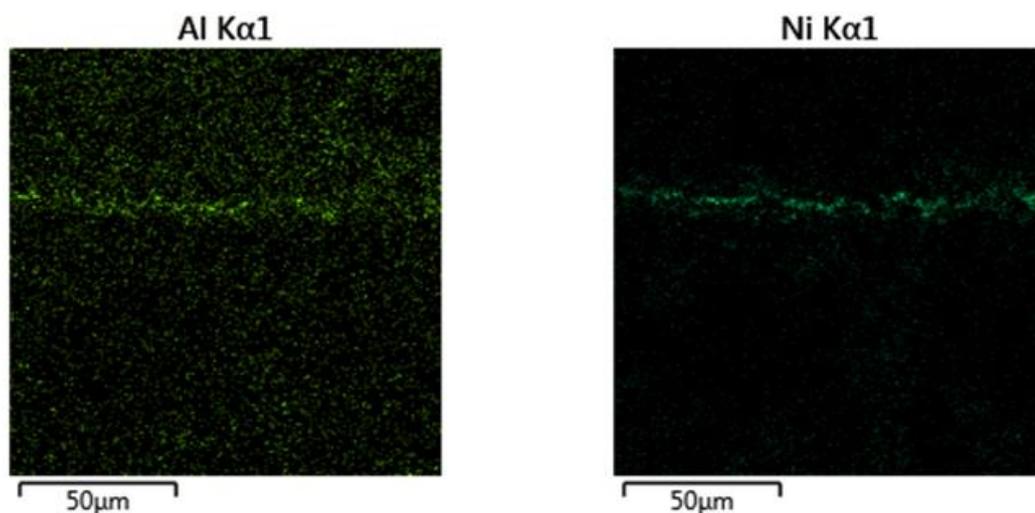


Рисунок 33 - Микрорентгеноспектральный анализ поверхности керамической оболочки, полученной на основе ГЭТС

Сплав ВЖЛ14Н-ВИ содержит значительное количество Cr (от 18 % до 20 %), который в процессе заливки и охлаждения отливки подвергается длительному воздействию высокой температуры, при этом Cr испаряется и переходит в  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в зоне реакции между расплавом и керамической оболочкой (рисунок 34).

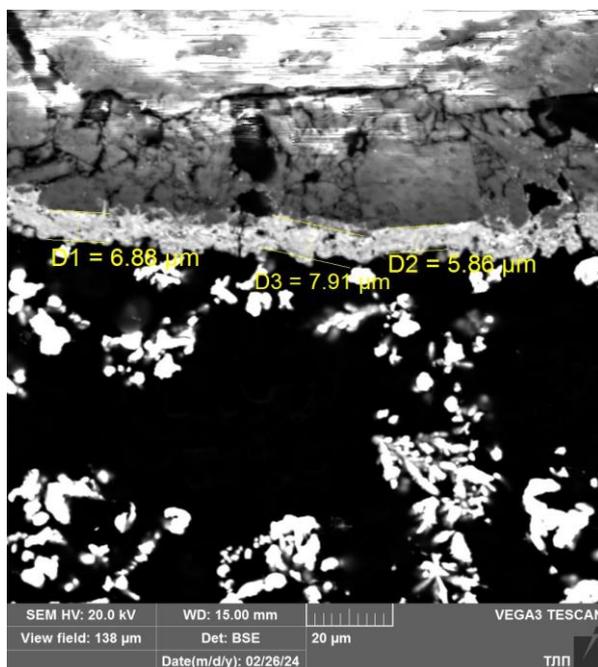
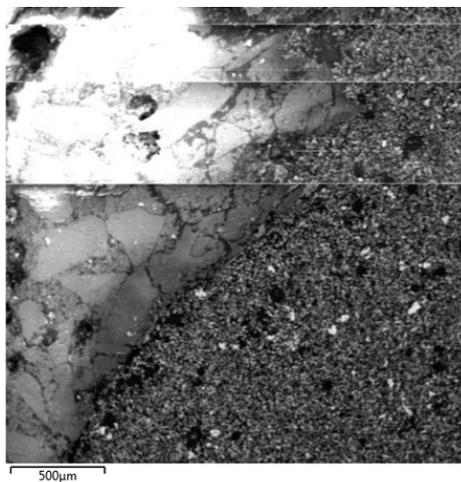
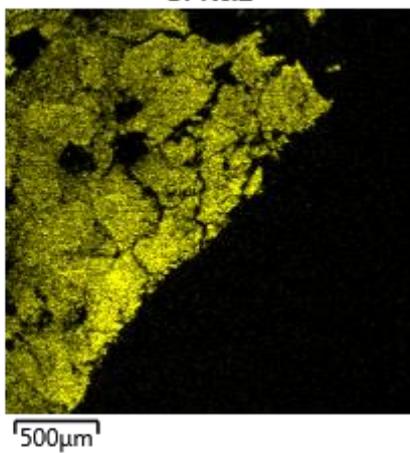


Рисунок 34 - Толщина поверхностного слоя оксида хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  на керамической оболочке

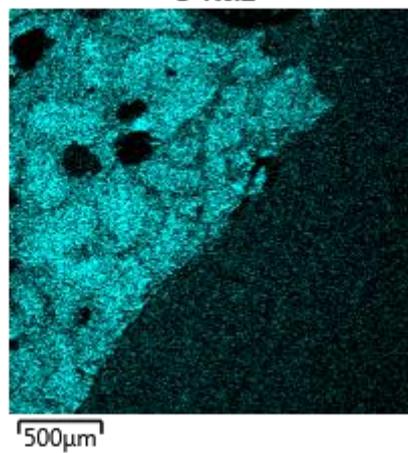
Исследование керамической оболочки, полученной на базе водных связующих UltraCast, показало аналогичный слой в месте контакта расплава с формой (рисунок 34).



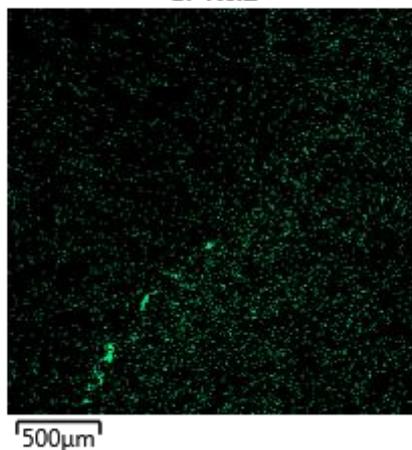
Si Kα1



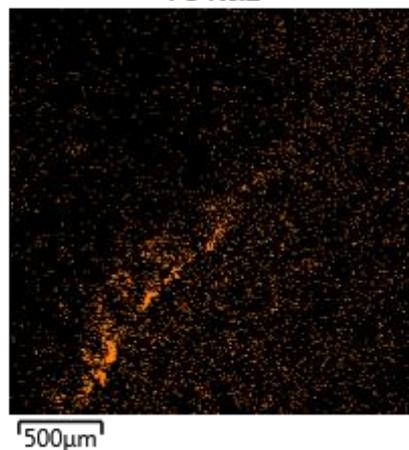
O Kα1



Cr Kα1



Fe Kα1



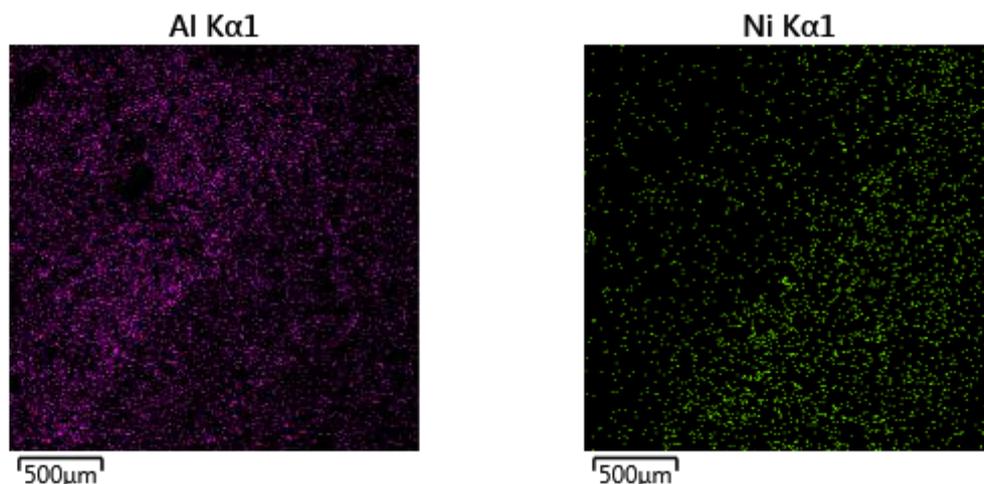


Рисунок 34 - Микрорентгеноспектральный анализ поверхности керамической оболочки, полученной с использованием водных связующих UltraCast, после контакта с жаропрочным никелевым сплавом ВЖЛ14Н-ВИ

Анализ формообразующей части керамической оболочки, которая находилась в непосредственном контакте с расплавом жаропрочного никелевого сплава, ВЖЛ14Н-ВИ, показал отсутствие химического взаимодействия между расплавом и керамической формой, изготовленной на базе связующих на водной основе.

Таким образом, установлено, что керамические оболочки, изготовленные из плавленого кварца с использованием водного связующего UltraCast, обладают термохимической устойчивостью и химической инертностью к жаропрочным сплавам на никелевой основе.

## Выводы по главе

1. Установлено, что испытанные связующие на водной основе отечественного производства (BT13-02У (ООО «Вакуумтех»), Ставроформ ВС (ООО «Полимет»), UltraCast One+ и UltraCast Prime (ООО «Технопарк»)) способны послужить заменой традиционно используемому гидролизованному раствору этилсиликата для получения керамических форм при изготовлении крупногабаритных отливок ответственного назначения из никелевых жаропрочных сплавов.

2. Керамические оболочки, изготовленные на базе водного связующего UltraCast One+, показывают наибольшие показатели прочности, до и после прокалки при использовании суспензии вязкостью 60 с и обсыпке 0,25-0,4 мм (до 7,88 МПа и 6,40 МПа после прокалки). Водное связующее UltraCast Prime показывает схожие значения прочности, которые составляют 5,10 МПа до и 7,61 МПа после прокалки.

3. Увеличение фракции обсыпки с 0,2 до 1,0 мм снижает прочность керамической оболочки: при использовании суспензии вязкостью 60 с возможно снижение прочности на ~2 МПа, при использовании суспензии вязкостью 20 с изменение прочности составляет ~1 МПа, как в сыром, так и в прокалённом виде. Таким образом, комбинируя фракции материала обсыпки, можно регулировать прочность получаемой формы.

4. Значения шероховатости (Rz) керамических образцов, полученных на связующих BT13-02У и Ставроформ, составили  $(25 \pm 2)$  мкм и  $(26 \pm 3)$  мкм, соответственно. Керамические образцы, полученные с использованием связующих UltraCast Prime и UltraCast One+, имели меньшие значения шероховатости, которые составили  $(15 \pm 1)$  мкм и  $(21 \pm 2)$  мкм, соответственно.

5. Увеличение времени прокалки керамической оболочки приводит к снижению прочности, для связующего Ultracast ONE+ прочность снижается на 2,8 %, для связующего UltraCast Prime – на 14,6 %.

6. Установлено, что в керамической оболочке после заливки в нее расплава (температура заливки  $\sim 1500$  °С), помимо аморфной фазы, образуются фазы кристобалита и тридимита.

7. Методом ДСК выявлено наличие полиморфных превращений в материале связующего Ultracast Prime при 600 °С и в интервале температур 900-1200 °С. В материале обсыпки (плавленый кварц фракции 0,25-0,4 мм) наблюдается лишь один пик при 1100 °С.

8. Установлено, что добавка  $\text{KNO}_3$  в модельную композицию на основе карбамида увеличивает её прочность, при этом снижается величина линейной усадки и увеличивается шероховатость поверхности по сравнению с добавкой  $\text{MgSO}_4$ .

9. Введение в состав модельных карбамидных композиций 2 % ПВС способствует повышению их прочности на 10 % и увеличению линейной усадки на 0,1 %, при этом их растворимость в воде снижается на 50 %.

10. Добавки  $\text{MgSO}_4$  и  $\text{KNO}_3$  образуют наименьший краевой угол смачивания, по сравнению с добавками ПВС и диметилглиоксима. При этом способность модельной композиции не вступать во взаимодействие с материалом водного связующего составляет не более 5-ти минут.

11. Определено, что наилучшим способом защиты материала карбамидной модели от взаимодействия с влагой является нанесение на его поверхность лака АК-593 и 5 % канифоли, растворённой в этиловом спирте, при этом нанесение канифоли позволяет снизить краевой угол смачивания независимо от состава водорастворимой модели.

12. Установлено, что наполненные воска RG20 и S1135 обладают лучшей текучестью в сравнение с воском S1235, при одинаковых условиях формования.

13. Установлена термохимическая устойчивость в вакууме керамических форм, изготовленных из плавленого кварца с использованием водного связующего UltraCast.

13. Целесообразно подтвердить в реальных условиях результаты, полученные в ходе проведенных экспериментов.

## **ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖЛ14Н-ВИ**

На основании результатов проведённых исследований предложен следующий технологический процесс изготовления огнеупорных оболочковых керамических литейных форм для изготовления крупногабаритных отливок из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ14Н-ВИ для проведения опытно-промышленного опробования в производственных условиях ПАО «ОДК – Кузнецов».

В качестве наполнителя суспензии использовать плавленный кварц фракции 0,045 мм, а в качестве материалов обсыпки - наиболее распространённые его фракции: ПК 0,3–0,4; ПК 0,4–0,63; ПК 0,63–1,25.

Первые два слоя крупногабаритной керамической оболочки изготавливать на базе водного связующего Ultracast ONE+, которое обеспечивает максимальную сырую прочность первых слоев керамической формы, сводя к минимуму дефекты поверхности, такие как отслоение и растрескивание. В ходе лабораторных исследований, при значениях вязкости ~60 с по вискозиметру ВЗ-4, Ultracast ONE+ показало наибольшую, по сравнению с другими связующими, прочность как в сыром (6,3 МПа), так и в прокалённом (6,85 МПа) состоянии.

Начиная с третьего слоя использовать водное связующее Ultracast Prime. Связующее содержит частицы полимера в количестве 3,5–5,5 %, которые в процессе нанесения суспензии позволят добиться лучшей кроющей способности и, как следствие, снизить количество наносимых на модель огнеупорных слоев; при этом в процессе прокаливания частицы полимера выгорают, обеспечивая высокую открытую пористость керамической оболочки. Индикатор сушки, входящий в состав связующего, позволит контролировать процесс сушки.

Приготовление суспензии для первых и последующих слоёв производить в разных баках. Для первых слоёв в бак загрузить Ultracast ONE+ и материал

наполнителя: при использовании плавленного кварца марки ПКП 0,045 на 1 кг материала наполнителя требуется 470 мл связующего, для достижения вязкости 55-65 с.

Суспензию для последующих слоёв готовить на базе связующего Ultracast Prime: на один килограмм наполнителя марки ПКП 0,045 – 500 мл, для достижения вязкости 35-40 с.

Для приготовления суспензии в бак сначала залить расчётное количество связующего, затем небольшими порциями вводить порошки; после полного перемешивания предыдущей порции порошка вводить новую. Для обеспечения равномерного смачивания связующим огнеупорного наполнителя использовать высокооборотную мешалку, а после стабилизации свойств – использовать лопастную мешалку, которая поддерживает частицы наполнителя во взвешенном положении и не создаёт завихрений, что способствует отсутствию захвата воздуха.

В качестве разделительного покрытия между моделью на основе карбамида и водным связующим использовать АК-593, который в ходе лабораторных исследований показал наилучшие защитные свойства. При этом для улучшения смачивания возможно использование дополнительного слоя из 5 % раствора канифоли, растворенной в спирте.

Для получения крупногабаритных отливок массой более 100 кг и габаритными размерами более 1000 мм на модель наносить не менее 15 слоев керамической оболочки, итоговое количество слоев назначать в зависимости от формы и габаритов модели.

Удаление карбамидной модели проводить в ванне с водой при температуре  $(95 \pm 5) ^\circ\text{C}$ . Модельные составы с добавками 10 %  $\text{MgSO}_4$ , 10 %  $\text{KNO}_3$ , 10 %  $\text{KNO}_3 + 2\%$  диметилглиоксима обладают наилучшей растворимостью; на основании данных о растворимости, этого модельного состава время на его растворение в кипящей воде назначить 1,8 часа, исходя из массы модели отливки «Корпус наружный» ~21,17 кг. Модельные составы, содержащие 2 % поливинилового спирта, обладают низкой растворимостью, поэтому время на

удаление материала модели из керамической формы необходимо увеличить на ~42 %.

Защитная плёнка лака АК-593 на поверхности карбамидной модели предохраняет её от прямого контакта с водой и тем самым препятствует её растворению в воде. Однако нанесение защитного покрытия усложняет процесс удаления модели, поскольку защитная плёнка на поверхности модели защищает модель от воды, тем самым, не давая ей раствориться. Использование двухслойного защитного покрытия - лак АК-593 и 5 % канифоль сосновая - позволяет создать зазор между моделью и керамической формой и тем самым улучшить растворимость материала модели в воде.

Предварительную прокалку керамических форм проводить при температуре 600-850 °С в течение 2-3 часов. Она необходима для удаления остатков модельной массы, поскольку даже небольшая зольность в крупногабаритных формах может привести к засорам в отливке.

Прокалку керамических форм перед заливкой расплавом ВЖЛН14-ВИ проводить при температуре 900-1050 °С в течение 2-6 часов. Определение прочности после прокалики показало, что при увеличении времени выдержки при температуре 900 °С с 1 до 8 часов происходит разупрочнение формы - с 5,7 МПа до 3,4 МПа. Этот факт необходимо учитывать при получении тонкостенных отливок, поскольку тонкостенные элементы отливки в процессе усадки, при недостаточной податливости формы, могут быть подвержены образованию в них горячих трещин.

## **ГЛАВА 5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВКИ «КОРПУС НАРУЖНЫЙ» ИЗ СПЛАВА ВЖЛ14Н-ВИ В УСЛОВИЯХ ПАО «ОДК-КУЗНЕЦОВ» С ПРИМЕНЕНИЕМ КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ НА БАЗЕ СОЛЕВОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ КАРБАМИДА И ВОДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО**

Главной целью опытно-промышленного опробования являлось установление (на базе применяемых серийных технологий плавки и литья) возможности использования керамической оболочки, изготовленной с применением материалов, состав которых был определён входе предварительно проведённых лабораторных исследований: карбамид с добавкой 2 %  $MgSO_4$  для модели отливки, связующее на водной основе Ultracast для приготовления суспензии, лак АК-593 для формирования защитного разделительного покрытия.

Промышленное опробование предлагаемой технологии проводилось на отливках «Корпус наружный 26.300.001-2» и «Корпус наружный 36.468.001» с учётом технологического процесса изготовления керамической оболочки, изложенного в главе 4.

Основные характеристики отливки «Корпус наружный 26.300.001-2»:

- внешний диаметр отливки – 1010 мм;
- толщина стенки 15-31 мм;
- шероховатость литых поверхностей Rz – не более 80 мкм;
- масса отливки – 145 кг.
- класс размерной точности отливки – Лт5 по ОСТ 1.41154-86.

Основные характеристики отливки «Корпус наружный 36.468.001»:

- внешний диаметр отливки – 1136 мм;
- толщина стенки 5-26 мм;
- шероховатость литых поверхностей Rz – не более 80 мкм;
- масса отливки – 105 кг.
- класс размерной точности отливки – Лт5 по ОСТ 1.41154-86.

Следует отметить, что в ходе промышленного опробования было задействованы только серийно применяемые в производстве оборудование и материалы. Исключение составляет связующее на водной основе Ultracast.

## **5.1 Основные этапы технологического процесса изготовления отливки «Корпус наружный»**

### **5.1.1 Приготовление суспензии для первых слоёв керамической оболочки**

В качестве материала связующего для первых слоёв использовалось связующее UltraCast One+, для последующих слоёв – Ultracast PRIME (ООО «Технопарк», Москва).

Материалом-наполнителем суспензии служил наполнитель ПКП 0,063, серийно применяемый в действующем производстве.

Для первых двух слоёв керамической оболочки использовалась суспензия вязкостью ~55-65 с по ВЗ-4. Для её приготовления в бак ёмкостью 2,5 м<sup>3</sup> поочерёдно порциями вводилось рассчитанное количество связующего (310 л) и огнеупорного наполнителя (500 кг). Для стабилизации свойств суспензия выдерживалась в течение 24 ч, после чего при необходимости производилась корректировка вязкости.

### **5.1.2 Приготовление суспензии для третьего и последующих слоев керамической оболочки**

Приготовление суспензии для третьего и последующих слоев керамической оболочки осуществлялось аналогично технологии её приготовления для первого и второго слоёв. Различие заключалось в материале связующего и вязкости используемой суспензии. Вязкость суспензии для третьего и последующих слоев находилась в диапазоне 35-40 с, материал связующего - водное связующее Ultracast Prime (ООО «Технопарк», Москва).

## 5.2 Этапы технологического процесса изготовления керамической оболочки на базе солевой модели на основе карбамида и водного связующего, реализованные в рамках опытно-промышленного опробования при изготовлении отливки «Корпус наружный» из сплава ВЖЛ14Н-ВИ

Технологический процесс изготовления керамической оболочки на базе солевой модели на основе карбамида и водного связующего состоял из следующих этапов:

1) Изготовление по серийной технологии модели отливки «Корпус наружный» с литниковой системой (далее «Модель отливки») из карбамида с добавкой  $MgSO_4$  (рисунок 35).



Рисунок 35 - Модель отливки «Корпус наружный 26.300.001-2»

2) Очистка и обезжиривание модели отливки от остатков смазочного материала путём её протирки ветошью, пропитанной растворителем, и обдувом сжатым воздухом. Визуальный осмотр поверхности модели отливки на предмет качества обдува и наличия дефектов поверхности.

3) Нанесение на поверхность модели отливки слоя разделительного покрытия лака АК-593 в два слоя. Способ нанесения – ручной, с помощью

краскопульты и кисти. Сушка в атмосфере цеха, температура 22-25 °С, длительность сушки – 120 мин. Визуальный контроль поверхности модели отливки на предмет наличия «непрокрасов».

4) Нанесение слоя суспензии на поверхность модели отливки с лаковым покрытием путём её окунания с вращением в бак с суспензией, приготовленной в соответствии с изложенной в п 4.1.1 технологией. Модель отливки, после полного покрытия суспензией поверхности, извлекается из бака при постоянном медленном вращении для обеспечения равномерного покрытия модели суспензией, а также стекания с её поверхности излишков суспензии.

5) Транспортировка с помощью кран-балки модели отливки, покрытой суспензией, и её последующее окунание в бак с «псевдокипящим» слоем обсыпочно материала из плавленого кварца с размером фракции 0,3-0,4 мм.

6) Сушка первого слоя огнеупорного покрытия керамической оболочки на воздухе при температуре 22-25 °С и влажности 50-70 % в течение 2-х часов. В случае несоблюдения режимов сушки, а именно повышенной влажности (до 80 %), время сушки увеличивается до 3-х часов; при этом на модели возможно отслоение первого слоя покрытия.

7) Визуальный контроль качества поверхности первого огнеупорного слоя керамической оболочки. На поверхности выявлены места «вздутия» (рисунок 36), что связано, как это было установлено входе лабораторных исследований, с процессом проникновения воды под слой защитного покрытия.

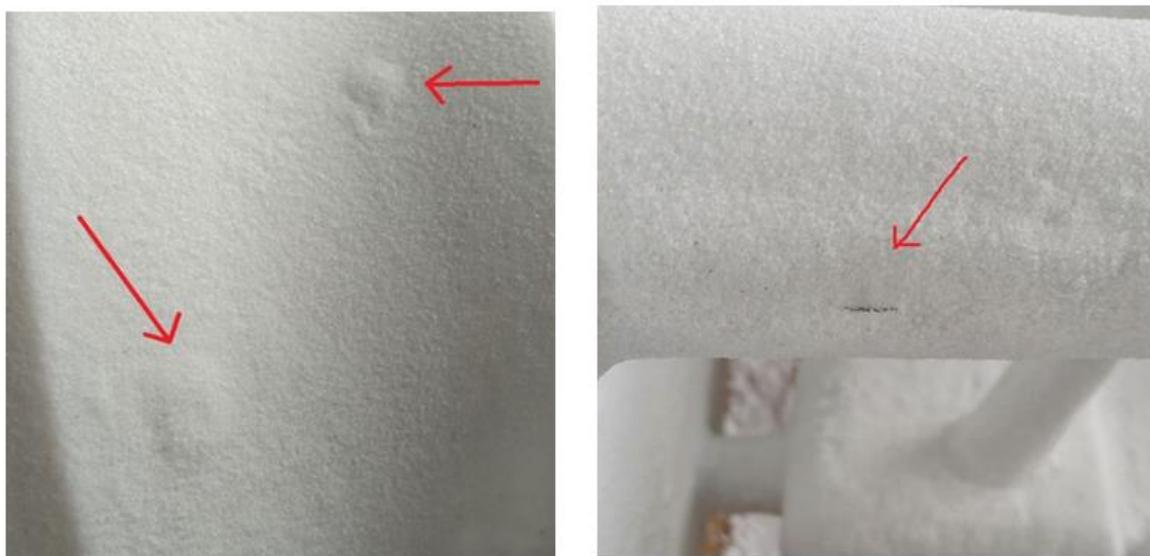


Рисунок 36 - Места «вздутия» керамического покрытия

8) Восстановление целостности защитного слоя путем удаления дефектного участка (рисунок 37) с последующим нанесением на очищенную поверхность модели отливки слоя лака, суспензии и материала обсыпки. Сушка покрытия.



Рисунок 37 - Зачищенное место «вздутия»

9) Формирование 3-го и последующих 17-ти огнеупорных слоёв керамической оболочки с применением связующего на основе Ultracast PRIME. Материал обсыпки для 3-го и 4-го слоя - плавленный кварц фракцией 0,4-0,63 мм.

Материал обсыпки для 5-го и последующих слоев - плавленный кварц с фракцией 0,63-1,25 мм.

10) Сушка огнеупорных слоёв керамической оболочки при помощи принудительного обдува воздухом, рекомендованная температура сушки 22-25 °С, влажность 40-50 %. Длительность сушки устанавливалась методом подбора в зависимости от конфигурации конкретного участка поверхности модели отливки и составляла 2 часа. При несоответствии параметров сушки указанным выше, рекомендуется увеличивать время сушки. Принудительный обдув воздухом – от 1 до 10 м/с (2-й слой – 1 м/с, 3-й слой - 2 м/с, 4-й слой - 4 м/с, 5-й слой - 6 м/с, после 5-го слоя - 10 м/с). Поскольку модель имеет сложную конфигурацию и множество поднутрений, её необходимо периодически вращать для обеспечения равномерности сушки каждого слоя.

11) Контроль качества сушки огнеупорных слоёв керамической оболочки по изменению её цвета с зелёного на оранжевый. Установлено, что в местах контакта водорастворимой модели на основе карбамида с материалом суспензии на основе готового водного связующего Ultracast PRIME цвет огнеупорной керамической оболочки в процессе сушки не меняется.

12) Визуальный контроль качества поверхности огнеупорной керамической оболочки литейной формы на предмет отсутствия «вздутий».

13) Нанесение закрепляющего слоя. Во избежание осыпания финального слоя материала обсыпки, форму окунают в бак со связующим, тем самым создается более плотный, не подверженный осыпанию, финальный слой.

14) Сушка керамического блока литейной формы: температура 22-25 °С, влажность 40-50 %, длительность (время) 24 ч.

15) Удаление модельного состава из керамического блока литейной формы. Метод – «вымочка» в баке с кипящей водой. Длительность операции (время полного удаления материала модели из полости керамической оболочки) составляет 1,5-2 часа после закипания воды. Контроль – визуальный.

16) Предварительная прокалка керамической литейной формы: температура 650 °С, длительность (время) 4-5 часов.

17) Визуальный контроль поверхности керамической литейной формы на предмет наличия трещин. Небольшие трещины замазываются ремонтным составом (жидкое стекло с добавлением электрокорунда фракцией F230 70-80 %, F60 или F70 20-30 %), а также обвязыванием жаропрочной проволокой. При наличии крупных разрывов, не подлежащих ремонту, керамическая литейная форма бракуется.

18) Сборка опоки для прокалки керамической литейной формы. Питатели обматываются утеплителем для обеспечения направленного затвердевания. Использовалась опока, серийно применяемая в производстве (материал – углеродистая сталь; размеры: диаметр 1500 мм, высота 500 мм). Для исключения контакта на дно опоки засыпается керамический бой, на который устанавливается форма. Форма в опоку устанавливается таким образом, чтобы не допустить нависающих массивных частей.

19) Прокалка керамической литейной формы в прокалочной печи. Температурный режим 970 °С, время выдержки 8 часов.

20) Извлечение опоки с керамической литейной формой из прокалочной печи при температуре 970 °С и её транспортировка с помощью мостового крана для установки в литейный модуль плавильно-литейной установки ВИАМ-24. Длительность (время) с момента извлечения опоки с керамической литейной формой из прокалочной печи до момента её заливки расплавом ВЖЛ14Н-ВИ составила 14 мин, в том числе время нахождения формы на воздухе - 4 минуты.

### **5.3 Приготовление расплава ВЖЛ14Н-ВИ и его заливка в керамическую литейную форму**

Приготовление расплава ВЖЛ14Н-ВИ в плавильном модуле установки ВИАМ-24 проводилось по серийной технологии, действующей на предприятии ПАО «ОДК-Кузнецов».

Шихта состояла из готового сплава ВЖЛ14Н-ВИ (ОСТ 1-90126-85) и возврата собственного производства в количестве не более 50 % от массы шихты.

Плавка сплава ВЖЛ14Н-ВИ в плавильном модуле установки ВИАМ-24. В процессе плавки и заливки величина вакуума составляла примерно 799,93 Па.

Температура заливки расплавом керамической литейной формы составила 1450 °С.

После завершения заливки керамической литейной формы расплавом ВЖЛ14Н-ВИ произведена разгерметизация плавильной камеры, дальнейшее охлаждение формы происходило на воздухе.

#### **5.4 Финишные операции при изготовлении отливки «Корпус наружный» из сплава ВЖЛ14Н-ВИ**

Извлечение керамической литейной формы из опоки после охлаждения.

Механическое удаление керамической оболочки с поверхности отливки на выбивном плацу.

Дробеструйная обработка отливки для удаления с её поверхности остатков керамики.

Обрезка литниковой системы от отливки.

#### **5.5 Контроль качества отливки на соответствие требованиям нормативной документации**

Контроль качества отливки на соответствие требованиям нормативной документации: визуальный – на наличие видимых поверхностных дефектов; обмер – на соответствие геометрии 3D модели отливки; спектральный – для определения химического состава сплава; механические испытания – для определения механических свойств сплава в прилитых к отливке образцах; неразрушающий – на наличие трещин, внутренних дефектов в теле отливки и на величину шероховатости необрабатываемых поверхностей отливки.

В результате проведённого контроля качества отливок «Корпус наружный» установлено:

- Наличие поверхностного дефекта в виде «наплыва» в местах не устранённых «вздутий» керамической оболочки на поверхности модели отливки (рисунок 38);



Рисунок 38 - Дефекты в виде «наплыва» на поверхности отливки

- Шероховатость необрабатываемых поверхностей отливки (Rz) составляет 20-30 мкм, что в полной мере отвечает требованиям чертежа литой детали;

- Химический состав сплава полученной отливки полностью соответствует требованиям ОСТ 1-90126-85 на сплав ВЖЛ14Н-ВИ;

- В результате контроля геометрии было установлено, что отливки, полученные с использованием готового водного связующего UltraCast, имеют расхождения в геометрии не более 2-3 мм на 1000 мм по сравнению с отливками, полученными по серийной технологии; данное отклонение находится в пределах допуска (рисунок 39).

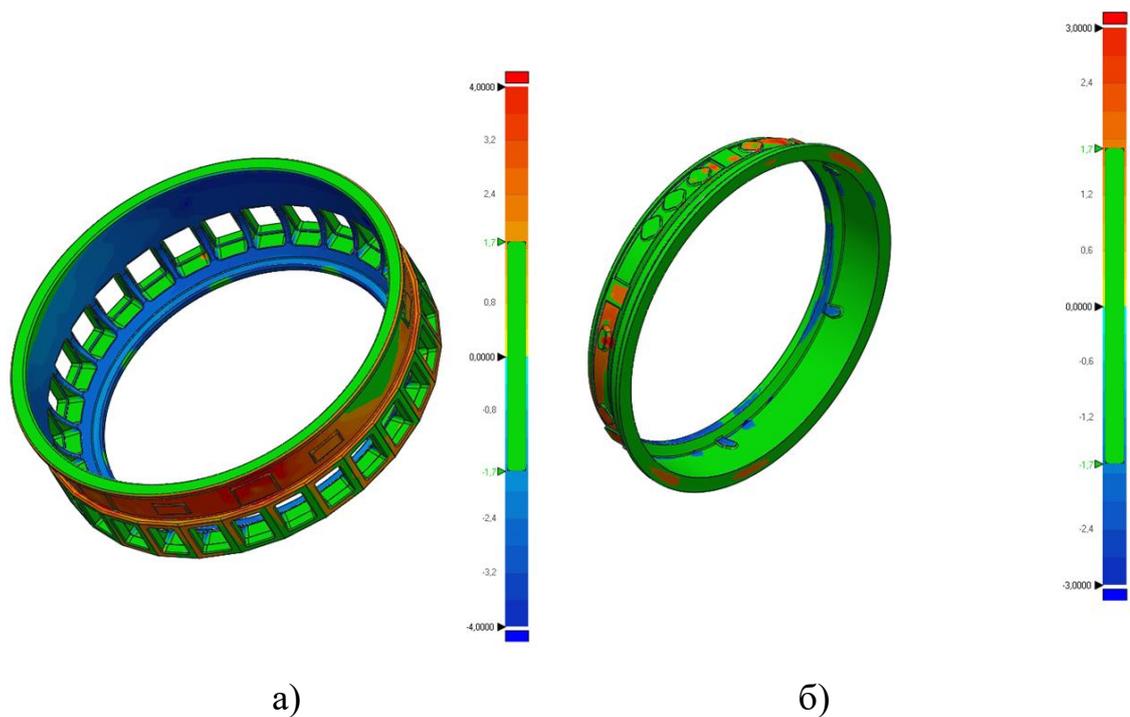
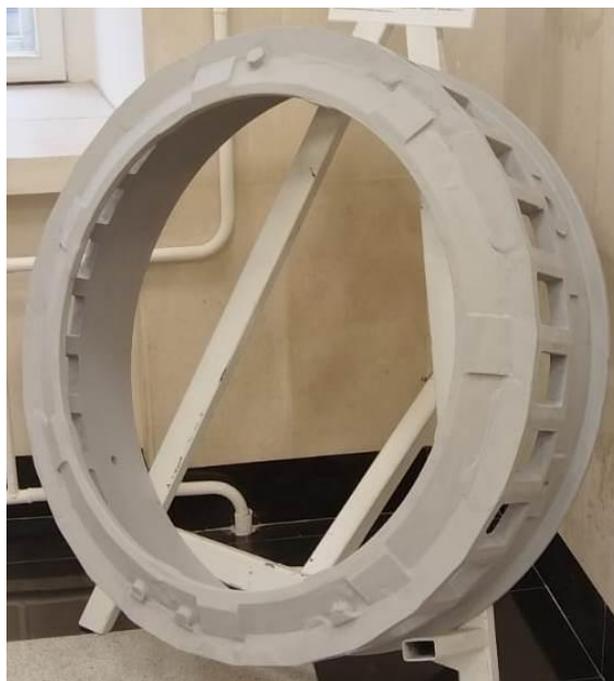


Рисунок 39 – Анализ геометрии отливок, полученных в керамические формы на водном связующем: Корпус наружный 26.300.001-2 (а), Корпус наружный 36.468.001 (б)

На рисунке 40 представлены фото отливок «Корпус наружный», полученных в ходе опытно-промышленного опробования.



а)



б)

Рисунок 40 – Отливки, полученные в ходе опытно промышленного опробования:  
Корпус наружный 26.300.001-2 (а), Корпус наружный 36.468.001 (б)

## **Выводы по главе**

1. В результате опытно-промышленного опробования установлена возможность использования лака АК-593 в качестве гидрофобного покрытия для защиты крупногабаритной водорастворимой модели на основе карбамида от воздействия влаги в составе готового водного связующего.

2. Рекомендовано использование готового водного связующего UltraCast взамен связующего на основе гидролизованного раствора этилсиликата для получения керамических форм при получении крупногабаритных отливок из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ14Н-ВИ.

3. Выявлено, что использование готового водного связующего Ultracast PRIME для последующих слоев увеличивает прочность получаемой керамической оболочки, что, в свою очередь, снижает податливость формы, из-за чего наблюдается расхождение по геометрии на 2-3 мм по сравнению с традиционной технологией. Исходя из этого, рекомендовано при использовании готового водного связующего Ultracast PRIME снижать количество наносимых слоев керамической оболочки по сравнению с традиционной технологией.

4. Установлено, что повышение влажности помещения в процессе сушки (до 80 %) выше рекомендованной (50-70 %) ведёт к увеличению времени сушки, а это, в свою очередь, приводит к отслоению первого слоя керамической оболочки, а также к большему взаимодействию между водорастворимой моделью и водным связующим.

5. Автоматизация процесса нанесения защитного покрытия может минимизировать риск возникновения неокрашенных участков на поверхности модели и тем самым снизить риск отслоения оболочки и получения дефектов на поверхности отливки.

## ВЫВОДЫ

1. Доказана возможность использования водорастворимых солевых моделей для получения крупногабаритных керамических оболочковых форм с применением суспензии, приготовленной на основе готового водного связующего, содержащего силиказоль (Приложение А, Приложение Б).

2. Установлены основные свойства суспензии и керамической оболочки, изготовленной с использованием водных связующих ВТ13-02У, Ставроформ ВС, UltraCast One+ и UltraCast Prime. Оптимальным соотношением, позволяющим получать суспензию с условной вязкостью 35-60 с, является 1 кг наполнителя к 500 мл связующего.

3. Наибольшие показатели прочности, как в сыром, так и в прокалённом виде, при вязкости 60 с и обсыпке 0,25-0,4 мм продемонстрировали образцы, изготовленные на основе связующих UltraCast One+ (7,88 МПа до и 6,40 МПа после прокалики) и UltraCast Prime (5,10 МПа до и 7,61 МПа после прокалики).

4. Установлено, что добавка  $KNO_3$  увеличивает прочность модельной композиции на основе карбамида, при этом снижается величина линейной усадки и увеличивается шероховатость поверхности по сравнению с добавкой  $MgSO_4$ . Введение в состав 2 % ПВС способствует увеличению прочности на 10 % и увеличению линейной усадки на 0,1 %, при этом введение ПВС в состав модельных карбамидных композиций приводит к снижению их растворимости в воде на 50 %.

5. Определено, что наилучшим способом защиты материала карбамидной модели от воздействия с влагой является нанесение на её поверхность лака АК-593 и 5 % канифоли, растворённой в изопропиловом спирте, при этом нанесение канифоли позволяет снизить краевой угол смачивания независимо от состава водорастворимой модели.

6. Определение текучести восков RG20, S1235 и S1135 с помощью разработанной в ходе работы пробы показывает линейную зависимость влияния температуры и давления впрыска на текучесть воска. Снижение температуры с

90 °С до 60 °С увеличивает вязкость воска более чем в 10 раз, за счёт чего происходит снижение текучести.

7. Разработана и опробована в производственных условиях ПАО «ОДК-Кузнецов» технология, которая позволяет получать крупногабаритные керамические формы с применением модельного состава на основе карбамида и водного связующего. При этом качество полученных отливок соответствует качеству отливок, изготовленных по традиционной технологии с использованием в качестве связующего гидролизованного раствора этилсиликата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов В. О. и др. Современная технология ЛВМ для художественного литья //Инструмент и технологии. – 2011. – №. 31. – С. 34-39
2. Литье по выплавляемым моделям / [В. Н. Иванов, С. А. Казеннов, Б. С. Курчман и др.]; Под общ. ред. Я. И. Шкленника, В. А. Озерова. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва: Машиностроение, 1984. - 407 с
3. Дадеко С. И., Годлин Н. А., Фролченков Д. С. Специальные виды литья, как способ совершенствования летательных аппаратов //Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2019. – С. 524-525
4. ГОСТ Р 53464-2009. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку. - М.: Издательство стандартов, 2009
5. Степанов Ю. А., Баландин Г. Ф., Рыбкин В. А. Технология литейного производства. – 1983
6. Специальные способы литья: Справочник / Под об. ред. В.А. Ефимова. М., Машиностроение, 1991, С. 234
7. Воронов В.А., Чайникова А.С., Ткаленко Д.М. Особенности использования органических или водных связующих на основе оксидов элементов III или IV Групп при изготовлении керамических форм для литья отливок из химически активных сплавов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. №2 (63)
8. Janos E. Kanyo, Stefan Schafföner, R. Sharon Uwanyuze, Kaitlynn S. Leary, An overview of ceramic molds for investment casting of nickel superalloys, Journal of the European Ceramic Society, 40, 15, (2020)
9. Varfolomeev, M.S., Shcherbakova, G.I. Interaction of a Ceramic Casting Mold Material of the  $Al_2O_3$ – $Al_2O_3$  Composition with a Nickel-Based Superalloy. Inter Metalcast 15, 1309–1316 (2021)
10. Дубровин В.К., Кулаков Б.А., Карпинский А.В., Заславская О.М. Новые технологические решения при изготовлении термохимически стойких

керамических форм для литья титановых сплавов. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2022;(5):55-65

11. Выбор формовочных материалов для литья по разовым моделям / В. К. Дубровин, Б. А. Кулаков, А. В. Карпинский, Ю. Н. Гойхенберг // *Литейщик России*. – 2015. – № 7. – С. 12-15

12. Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В., Авдеев В.В. Особенности разработки технологий изготовления и удаления керамических стержней на основе плавленого кварца для литья турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов // *Труды ВИАМ*. 2022. №2 (108)

13. Знаменский Л. Г., Ивочкина О. В., Варламов А. С. Экономичные керамические формы в литье по выплавляемым моделям // *Пром-Инжиниринг*. – 2015. – С. 153-156

14. Дьячков, В. Н. Эффективная технология изготовления керамических форм на основе плавленого кварца для литья по выплавляемым моделям / В. Н. Дьячков, К. В. Никитин, А. Ю. Баринов // *Литейные процессы*. – 2016. – № 15. – С. 99-102

15. Dooley G. et al. Передовые технологии изготовления керамических оболочек ADBOND® QUIKSET Быстросохнущая суспензия // *Литейщик России*. – 2017. – №. 9. – С. 33-39

16. Сапченко И. Г. Влияние конструкционных особенностей строения структур керамических оболочек на их трещиностойкость // *руководство конференции Почетный председатель: НФ Морозов Сопредседатели: БГ Миронов, АВ Манжиров Зам. председателя: ЮН Радаев, АИ Шашкин Ученые секретари: ЕВ Мурашкин, СВ Тихонов*. – С. 175

17. Вдовин, Роман Александрович В25 Формирование технологических основ изготовления рабочих лопаток турбины ГТД: монография / Р.А. Вдовин. – Самара: Издательство Самарского университета, 2021. – С. 209  
ISBN 978-5-7883-1678-9

18. Каблов Е. Н., Голубовский Е. Р. Жаропрочность никелевых сплавов. – 1998.

19. Kanyo J. E., Schafföner S., Uwanyuze R.S., Leary K.S., An overview of ceramic molds for investment casting of nickel superalloys / Kanyo J. E. // Journal of the European Ceramic Society. – 2020. - Vol.40, №20. – P. 4955-4973

<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.07.013>

20. Кузнецов, В.П. Структура и свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов: учебное пособие / В.П. Кузнецов, В.П. Лесников, Н.А. Попов. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016.— С. 160

21. Знаменский Леонид Геннадьевич, Ивочкина Ольга Викторовна, Солодянкин Анатолий Алексеевич Взаимодействие химически активных расплавов с материалами керамических форм в вакууме // Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy. 2022. №2

22. Камалов, И. И. Усовершенствование технологии изготовления керамических форм при литье по выплавляемым моделям / И. И. Камалов, П. А. Черноглазов // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Материалы докладов, Казань, 08–10 августа 2018 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2018. – С. 324-327

23. Патент № 2697678 С1 Российская Федерация, МПК В22С 1/00. Способ изготовления керамических форм для литья по выплавляемым моделям: № 2018144662: заявл. 17.12.2018: опубл. 16.08.2019 / В. Д. Белов, А. В. Фадеев, Ю. И. Фоломейкин [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

24. Патент № 2245212 С1 Российская Федерация, МПК В22С 1/00. суспензия для изготовления керамических форм: № 2003128891/02: заявл. 26.09.2003: опубл. 27.01.2005 / И. П. Боровинская, В. А. Горшков, В. В. Деев [и др.]; заявитель Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской Академии Наук, Федеральное государственное

унитарное предприятие – «Московское машиностроительное производственное предприятие «Салют»

25. Ганеев А. А. и др. Расчет физико-химического взаимодействия титановых сплавов с материалами литейной формы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2016. – Т. 16. – №. 3. – С. 70-78

26. Выбор формовочных материалов для литья по разовым моделям / В. К. Дубровин, Б. А. Кулаков, А. В. Карпинский, Ю. Н. Гойхенберг // Литейщик России. – 2015. – № 7. – С. 12-15

27. Дубровин В. К., Заславская О. М. Термохимически стойкий керамический тигель для плавки и литья титановых сплавов // Теория и технология металлургического производства. – 2019. – №. 1 (28). – С. 30-34

28. Дубровин В. К. и др. Способ изготовления керамических форм по выплавляемым моделям для получения точных отливок из химически активных и жаропрочных сплавов. – 2021

29. Роговский, А. Н. Теоретические основы процессов взаимодействия в системах металлургических огнеупоров: Учебное пособие / А. Н. Роговский, А. А. Шипельников, Т. В. Кравченко. – Липецк: Липецкий государственный технический университет Полиграфическое подразделение Издательства ЛГТУ., 2014. – С. 55. ISBN 978-5-88247-693-8

30. Минакова Т.С., Екимова И.А. Фториды и оксиды щелочноземельных металлов и магния. Поверхностные свойства. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. – С. 148

31. Шатульский, А. А. Выявление причин образования дефектов в отливках из никелевых жаропрочных сплавов на стадии заполнения формы расплавом / А. А. Шатульский, Г. М. Кимстач // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2013. – № 1(24). – С. 48-52

32. Земляной, К.Г. Служба огнеупоров: учеб.-метод. пособие / К.Г. Земляной.— Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018.— С. 172. ISBN 978-5-7996-2398-2

33. Воронов В. А., Чайникова А. С., Ткаленко Д. М. Особенности использования органических или водных связующих на основе оксидов элементов III или IV групп при изготовлении керамических форм для литья отливок из химически активных сплавов (обзор) //Авиационные материалы и технологии. – 2021. – №. 2 (63). – С. 73-84
34. Кулаков Б. А. и др. Оценка материалов керамических тиглей для выплавки химически активных металлов и сплавов //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2013. – Т. 13. – №. 1. – С. 51-55
35. Chen S. et al. Alumina-based ceramic mold with integral core and shell for hollow turbine blades fabricated by laser powder bed fusion //Additive Manufacturing. – 2022. – Т. 58. – С. 103046
36. Дубровин В.К., Кулаков Б.А., Карпинский А.В., Заславская О.М. Новые технологические решения при изготовлении термохимически стойких керамических форм для литья титановых сплавов. Известия вузов. Цветная металлургия. 2022. Т. 28. №. 5. С. 55–65. DOI: 10.17073/0021-3438-2022-5-55-65.
37. Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В., Авдеев В.В. Исследование составов керамических стержней на основе плавленного кварца и технологии их изготовления // Труды ВИАМ. 2021. №1 (95)
38. Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В., Авдеев В.В. Особенности разработки технологий изготовления и удаления керамических стержней на основе плавленного кварца для литья турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов // Труды ВИАМ. 2022. №2 (108)
39. Волокитин О. Г., Шеховцов В. В. Расчет времени расплавления частицы кварца в высокотемпературном силикатном расплаве //Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – №. 3 (50). – С. 159-162
40. Земляной, Кирилл Геннадьевич. Фазовые равновесия в оксидных системах: учебник / К.Г. Земляной, И.А. Павлова; М-во науки и высш.

образования РФ — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021.— 228 с. — (Учебник УрФУ). ISBN 978-5-7996-3332-5

41. Суздальцев, Е. И. Свойства кварцевой керамики / Е. И. Суздальцев // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – № 7-8. – С. 21-34

42. Непомнящих, А. И. Полиморфные превращения в диоксиде кремния / А. И. Непомнящих // Функциональные стекла и стеклообразные материалы: Синтез. Структура. Свойства. GlasSPSchool: Сборник тезисов Научной школы-конференции с международным участием для молодых учёных, Санкт-Петербург, 03–07 октября 2022 года. – Санкт-Петербург: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2022. – С. 19-20

43. Точилкина, С. В. Анализ связующих материалов, используемых при изготовлении оболочковых форм ЛПВМ / С. В. Точилкина // Мавлютовские чтения : Материалы XV Всероссийской молодежной научной конференции: в 7 т., Уфа, 26–28 октября 2021 года. Том 2. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021. – С. 331-336

44. Верещака В. В., Тамазов М. В., Довженко И. Г. Особенности процесса обжига объемно-окрашенного керамического кирпича с применением высококальциевого силикатного техногенного сырья //Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2011. – №. 4. – С. 36-40.

45. Sun B. et al. Preparation process of ceramic shells //Precision Forming Technology of Large Superalloy Castings for Aircraft Engines. – 2021. – С. 101-167

46. Breneman R. C., Halloran D.W., Effect of Cristobalite on the Strength of Sintered Fused Silica Above and Below the Cristobalite Transformation // Journal of the American Ceramic Society. – 2015. – Vol. 98, №5. – P. 1385-1683

47. Ospennikova O.G., Pikulina L.V., Antipin L.M., Application of a Hydrolyzed Ethyl Silicate in Investment Casting // Neorganicheskie Materialy. – 2010. - Vol. 46, № 5. – P. 633–635

48. Знаменский, Л. Г. Экологичное точное литье для производства авиационной техники / Л. Г. Знаменский, А. А. Солодянкин, В. Б. Полиновский // Военный научно-практический вестник. – 2021. – № 1-2(14-15). – С. 47-55
49. Камалов И. И., Черноглазов П. А. Усовершенствование технологии изготовления керамических форм при литье по выплавляемым моделям // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли. – 2018. – С. 324-327
50. Ордин Д.А. Физико-химические основы и технология литейных керамических форм на основе водно-коллоидного кремнезоля // Порошковая металлургия и композиционные материалы. 2020
51. Иванов В.Н., Казеннов С.А. и др. Литьё по выплавляемым моделям. Под ред. Шкленника Я.И., Озерова В.А.. М., «Машиностроение», 1984 (3-е издание, перераб. и доп.), - С. 408
52. Знаменский Л. Г., Ивочкина О. В., Солодянкин А. А. Взаимодействие химически активных расплавов с материалами керамических форм в вакууме // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2022. – Т. 22. – №. 2. – С. 5-13
53. Стадничук, В. И. Исследование влияния состава связующих растворов на технологические свойства керамических суспензий / В. И. Стадничук, В. С. Бессмертный // Огнеупоры и техническая керамика. – 2011. – № 1-2. – С. 14-16
54. Абызов А. М. Оксид алюминия и алюмооксидная керамика (Обзор). Часть 1. Свойства  $Al_2O_3$  и промышленное производство дисперсного  $Al_2O_3$  // Новые огнеупоры. – 2019. – №. 1. – С. 16-23
55. Патент № 2531335 С1 Российская Федерация, МПК В22С 9/04. Способ изготовления литейных керамических форм: № 2013137106/02: заявл. 06.08.2013: опубл. 20.10.2014 / В. С. Бессмертный, В. И. Стадничук; заявитель Автономная некоммерческая организация высшего профессионального образования «Белгородский университет кооперации, экономики и права»

56. Тиунова А. В., Саулин Д. В. Разработка технологии нанесения химически инертных оксидов на внутреннюю поверхность керамических оболочек для литья титановых сплавов //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2020. – №. 3. – С. 110-122
57. Дьячков В. Н. и др. Совершенствование технологии получения стальных отливок ответственного назначения литьем по выплавляемым моделям с целью повышения их качества //Литейщик России. – 2013. – №. 10. – С. 36-38
58. Патент № 2725921 С1 Российская Федерация, МПК В22С 1/02, В22С 9/12. Способ изготовления керамической оболочковой формы: № 2020104786: заявл. 03.02.2020: опубл. 07.07.2020 / А. В. Шилов, Н. Н. Черкашнев, А. В. Малеев; заявитель Акционерное общество «ОДК-Авиадвигатель»
59. Чернов, В. П. Исследование живучести огнеупорных суспензий на основе ЭТС-40 / В. П. Чернов, Е. А. Сафонова // Литейщик России. – 2014. – № 11. – С. 29-32
60. Болдин, А.Н. Инженерная экология литейного производства: учеб. пособие / под общ. ред. А.Н. Болдина. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 352
61. Kosmulski M. Surface charge and zeta potential of silica in mixtures of organic solvents and water // Surfactant science series. – 2000. – С. 343-368
62. Ferenc-Dominik J., Matysiak H., Kurzydowski K. J., Organic Viscosity Modifiers for Controlling Rheology of Ceramic Slurries Used in the Investment Casting // Advances in Science and Technology. – 2010. – Vol. 70. – P. 102-107
63. Wisniewski P. Polymer Binders of Ceramic Nanoparticles for Precision Casting of Nickel-Based Superalloys / P. Wisniewski // Nanomaterials. - 2021, Vol. 11, №7 - 1714
64. Карбаинова С. Н. Коллоидная химия: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2009. – С. 87
65. Практикум по физической химии: учеб.-мет. пособие / И. В. Кулеш, О. И. Валентюкевич.- Гродно: ГГАУ, 2013 – С. 94

66. Hartmann E. F., Johnson P. Health, Safety and Environmental Legislation //Investment Casting. – CRC Press, 2023. – С. 212-239
67. Kolczyk J., Zych J. Rheological properties of ceramic slurries with colloidal binders used in the investment casting technology / Kolczyk J// Metalurgija. – 2013. – Vol. 52, №1. – P. 55-58
68. Современные технологии при производстве крупногабаритных отливок деталей ГТД: монография / Р.А. Вдовин, А.В. Балякин, Е.С. Гончаров. – Самара: Издательство Самарского университета, 2022. – С. 112
69. Вдовин Р. А. и др. изготовление крупногабаритных выжигаемых моделей с использованием FDM печати //НаукоСфера. – 2022. – №. 10-1. – С. 163-169
70. Третьякова А. А., Ермакова В. А., Ермаков А. И. Кукуруза как основное сырье для производства PLA-пластика. – 2021
71. Дожделев А. М., Лаврентьев А. Ю. Оптимальный выбор пластика для 3d печати //Юность и знания-гарантия успеха-2019. – 2019. – С. 180-183
72. Вдовин Р. А. Современные технологии при производстве крупногабаритных отливок деталей ГТД: монография / Р.А. Вдовин, А.В. Балякин, Е.С. Гончаров. – Самара: Издательство Самарского университета, 2022. – С.112 ISBN 978-5-7883-1853-0
73. Мамина Л.И., Формовочные материалы: учеб. Пособие / Л.И. Мамина, Б.А. Кулаков. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – С. 344 ISBN 978-5-7638-2436-0.
74. Тимохов Ф. С. Сравнительный анализ методов получения заготовок при помощи аддитивных технологий и литья по выплавляемым моделям //Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2023. – С. 66–68
75. Патент № 2536130 С2 Российская Федерация, МПК В22С 9/04. Способ изготовления литейных керамических форм по выплавляемым моделям: № 2013116626/02: заявл. 11.04.2013: опубл. 20.12.2014 / В. С. Бессмертный, В. И. Стадничук; заявитель Автономная некоммерческая организация высшего

профессионального образования «Белгородский университет кооперации, экономики и права»

76. Стадничук В. И., Бессмертный В. С. Формирование защитных гидрофобных пленок на рабочей поверхности литейных керамических форм //Огнеупоры и техническая керамика. – 2011. – №. 4-5. – С. 8-10

77. Авторское свидетельство № 1113961 А1 СССР, МПК В22С 1/18, В22С 7/02. Смесь для изготовления легкоудаляемых стержней: № 3562319: заявл. 11.03.1983: опубл. 23.11.1990 / В. Г. Арсеньев, Ф. М. Ваньшев, М. И. Воробьев; заявитель Предприятие П/Я В-8231

78. Авторское свидетельство № 1227308 А1 СССР, МПК В22С 1/00, В22С 7/02, В22С 9/10. Состав для изготовления водорастворимых стержней и моделей: № 3686148: заявл. 05.01.1984: опубл. 30.04.1986 / А. Т. Аксенов, В. Ф. Крейз, С. В. Пепенко [и др.]; заявитель Предприятие П/Я М-5481

79. Громаков А. И., Михнёв М. М., Усков Д. И. смесь для изготовления водорастворимых стержней //Решетневские чтения. – 2016. – Т. 2. – С. 332–333

80. Авторское свидетельство № 555966 А1 СССР, МПК В22С 1/00, В22С 7/02, В22С 9/10. Смесь для изготовления водорастворимых стержней: № 2084051: заявл. 18.12.1974: опубл. 30.04.1977 / В. Д. Присяжный, С. М. Коваленко, В. М. Белецкий [и др.]; заявитель Институт общей и неорганической химии Украинской ССР, предприятие П/Я А-3395

81. Авторское свидетельство № 1766582 А1 СССР, МПК В22С 7/02. Композиция для изготовления водорастворимых стержней и моделей: № 4772721: заявл. 22.12.1989: опубл. 07.10.1992 / Д. Н. Доскинский, М. М. Мазавина; заявитель Всесоюзный научно-исследовательский институт технологии судового машиностроения «Сириус»

82. Шилов А. В. Способ удаления модельного блока из керамической формы в литье по выплавляемым моделям. – 2022

83. Патент № 2591886 С2 Российская Федерация, МПК В22С 1/00, В22С 9/10. Смесь для изготовления водорастворимых стержней: № 2014124447/02: заявл. 16.06.2014: опубл. 20.07.2016 / М. М. Михнев, В. В. Злотенко, А. И.

Громаков [и др.]; заявитель Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева»

84. Авторское свидетельство № 1135523 А1 СССР, МПК В22С 1/18, В22С 7/02, В22С 9/10. Композиция для изготовления водорастворимого стержня: № 3556126: заявл. 23.12.1982: опубл. 23.01.1985 / П. Я. Лернер, Р. А. Хусаинов, В. И. Никонов; заявитель Всесоюзный Научно-Исследовательский Институт Технологии Насосного Машиностроения

85. Патент № 2499651 С1 Российская Федерация, МПК В22С 9/04. способ изготовления керамических форм по растворяемым моделям: № 2012130894/02: заявл. 20.07.2012: опубл. 27.11.2013 / В. И. Стадничук; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

86. Стадничук В. И. и др. Исследование кинетики формирования гидрофобных пленок на внутренней поверхности литейных керамических форм //Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2011. – №. 4. – С. 139–141

87. Варламов А. С. Технологические процессы ускоренного формообразования в литье по выплавляемым моделям Специальность 05.16. 04 – «Литейное производство»

88. Знаменский Л. Г., Солодянкин А. А., Полиновский В. Б. Технология ускоренного формообразования при получении литых лопаток авиационных газотурбинных двигателей //Военный научно-практический вестник. – 2019. – №. 2. – С. 71–79

89. Aslanyan I. R., Eremkina M. S. Research Methodology of Model Compositions for Casting Gas-Turbine Engine Blades //Polymer Science, Series D. – 2023. – Т. 16. – №. 2. – С. 392-395. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-3-13

90. Оспенникова О. Г. Исследование влияния наполнителей на свойства и стабильность модельных композиций, выбор оптимальных составов //Авиационные материалы и технологии. – 2014. – №. 3 (32). – С. 14–17

91. Zhang Y., Bu K., Liu C. Prediction of Shrinkage Allowance Coefficient of Investment Castings Based on Geometric Parameters //Metallurgical and Materials Transactions B. – 2024. – С. 1-15
92. Вдовин Р. А. и др. Исследование усадки восковых моделей, полученных технологией быстрого прототипирования //Самара: Изд-во Самар. ун-та. – 2017
93. Никитин К. В. и др. Исследование линейной усадки модельных составов и механизмов взаимодействия в системе «выплавляемая модель–огнеупорная керамическая форма» //Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya. – 2019. – №. 6. – С. 621.74
94. Barati E., Akbari J. The effect of injection parameters on dimensional accuracy of wax patterns for investment casting //Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME). – 2020. – Т. 9. – №. 2. – С. 313-322
95. Changhui Liu, Sun Jin, Xinmin Lai, Bo He & Fei Li Influence of complex structure on the shrinkage of part in investment casting process / The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. - Vol. 77, - P. 1191–1203
96. Баринов А. Ю. Повышение эффективности литья в керамические формы за счет аддитивного производства воско-полимерных моделей: дис. – Сибирский федеральный университет, 2022
97. Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н. Экспериментальное моделирование процессов формирования объемных прессовок из сферических воскообразных элементов // Известия вузов. Черная металлургия. - 2022. – Т. 65. – № 11. – С. 758–768
98. Vazhenov, V.E., Sannikov, A.V., Kovyshkina, E.P., Belov, V.D., Dmitriev, D.N., The Influence of Injection Temperature and Pressure on Pattern Wax Fluidity //Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Т. 7. – №. 4. – С. 141
99. Шабанова Н. А., Белова И. А., Маркелова М. Н. Реакционная способность и эволюция агрегативной устойчивости коллоидного кремнезема //Физика и химия стекла. – 2020. – Т. 46. – №. 1. – С. 90–98

100. Шабанова Н. А., Юй Ц. Т. И., Мусабеков К. Б. Агрегативная устойчивость смесей золя коллоидного кремнезема и полистирольного латекса //Коллоидный журнал. – 2001. – Т. 63. – №. 5. – С. 711–714

101. Анализ свойств суспензии и керамики для литья по выплавляемым моделям, полученных на отечественных связующих на водной основе / Баженов В.Е., Ковышкина Е.П., Санников А.В., Колтыгин А.В., Тен Д.В., Рижский А.А., Белов В.Д., Лазарев Е.А. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2023 Т. 29 № 2 С. 15-28

102. Li W. et al. Microstructure study of phase transformation of quartz in potassium silicate glass at 900° C and 1000° C //Crystals. – 2021. – Т. 11. – №. 12. – С. 1481

103. Оспенникова О. Г. Исследование и разработка параметров технологического процесса изготовления моделей из модельных композиций на основе синтетических восков //Авиационные материалы и технологии. – 2014. – №. 3 (32). – С. 18–21

104. Гусева М. А., Асланян И. Р., Пономаренко С. А. Исследование реологии модельных композиций для литья по выплавляемым моделям в зависимости от природы и соотношения основных компонентов //Труды ВИАМ. – 2020. – №. 1 (85). – С. 126–134

105. Гусева М. А., Асланян И. Р. Влияние наполнителей на реологические характеристики модельных композиций для литья по выплавляемым моделям //Труды ВИАМ. – 2019. – №. 5 (77). – С. 94–102

106. Ключев А. Ю. Получение, исследование свойств и разработка технологии модельных составов для точного литья с использованием модифицированной канифоли //Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2021. – №. 1 (241). – С. 139–146

107. Разработка разделительного состава для растворяемых солевых моделей при литье по выплавляемым моделям / Баженов В.Е., Ковышкина Е.П., Колтыгин А.В., Белов В.Д., Дмитриев Д.Н. // Литейное производство. 2023 № 6 С. 30–37

108. Влияние различных добавок на свойства солевых водорастворимых модельных масс на основе карбамида / Баженов В. Е., Ковышкина Е. П., Никитина А. А., Колтыгин А. В. // Цветные металлы. 2024. № 8. С. 82–89

УТВЕРЖДАЮ  
 Руководитель проекта  
 ПАО «ОДК-Кузнецов»

  
 Е.А. Лазарев  
 «22» мая 2023г.

**АКТ 3.2.1.1**

изготовления экспериментальных образцов  
 по Соглашению № 075-11-2022-023 от 06.04.2022 г.

« 22 » мая 2023 г.

г. Самара

Комиссия, назначенная приказом по ПАО «ОДК-Кузнецов» от 06.02.2023г. № 131 в составе:

председатель	Руководитель проекта	Е.А. Лазарев
члены комиссии	Начальник ОМП Ведущий специалист	Н.А. Семенихина Е.С. Моисеева

В период с 15.05.23 по 22.05.2023 г. комиссия проверила факт изготовления экспериментальных образцов огнеупорных оболочковых форм по п.3.2.1 «Исследовательские испытания технологического процесса получения огнеупорной оболочки (ТП1)» плана-графика работ по комплексному проекту «Создание технологии изготовления уникальных крупногабаритных отливок из жаропрочных сплавов для газотурбинных двигателей, ориентированной на использование отечественного оборудования и организацию современного ресурсоэффективного, компьютероориентированного литейного производства».

**1. Комиссии предъявлены:**

- 1.1. Технические требования к результатам выполнения комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием российского высшего учебного заведения, Соглашение № 075-11-2022-023 от 06.04.2022 г.
- 1.2. Комплект технологической документации на технологический процесс получения огнеупорной оболочки (ТП1) МГТК.01310.00030.
- 1.3. Программа и методики исследовательских испытаний технологического процесса получения огнеупорной оболочки (ТП1) МГТК.01310.00030 ПМ.
- 1.4. Огнеупорные оболочки для изготовления отливок «Корпус наружный 36.468.001»; «Корпус внутренний 36.410.003-8»; «Корпус наружный 26.300.001-2» в количестве 1 комплект,
- 1.5. Образцы для испытаний огнеупорной оболочки на статический изгиб в количестве 24 штуки.

2 Комиссия провела проверку:

2.1 Комплектности изготовленных огнеупорных оболочек, образцов и технологической документации на технологический процесс получения огнеупорной оболочки (ТП1) МГТК.01310.00030

3. В результате проверки установлено:

3.1 На ПАО «ОДК-Кузнецов» в период с 13 марта 2023 г по 15 мая 2023 г. в соответствии с МГТК.01310.00030 и МГТК.01310.00030 ПМ в установленной комплектности изготовлены: 1 комплект огнеупорных оболочек для изготовления отливок «Корпус наружный 36.468.001»; «Корпус внутренний 36.410.003-8»; «Корпус наружный 26.300.001-2» и образцы для испытаний огнеупорной оболочки на статический изгиб в количестве 24 штук.

3.2 Объекты испытаний соответствуют: технологической документации на технологический процесс получения огнеупорной оболочки (ТП1) МГТК.01310.00030;

4. Вывод

4.1 Объект испытаний изготовлен в соответствии с требованиями технологической документации и пригоден для проведения исследовательских испытаний.

Председатель комиссии

  
Е.А. Лазарев

Члены комиссии

  
Н.А. Семенихина  
Е.С. Моисеева

СОГЛАСОВАНО

Главный металлург

ПАО «ОДК-Кузнецов»

 Е.Ю. Щедрин

«01» 11 2023 г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

НИТУ МИСИС



М.Р. Филонов

2023 г.

**АКТ 4.1.4 ИИ  
исследовательских испытаний**

исследовательских испытаний экспериментальных образцов огнеупорной оболочки по договору №002702 от 22.12.2021 г.

«01» ноября 2023 г.

г. Москва

Комиссия в составе:

председатель	Заведующий кафедрой ЛТиХОМ, проф., д.т.н. (НИТУ МИСИС)	В.Д. Белов
члены комиссии	доцент кафедры ЛТиХОМ, к.т.н. (НИТУ МИСИС)	А.В. Колтыгин
	с.н.с. ИЦ «ЛТМ», к.т.н., (НИТУ МИСИС)	В.Е. Баженов
	Инженер ИЦ «ЛТМ» (НИТУ МИСИС)	Е.П. Ковышкина

назначенная распоряжением по кафедре ЛТиХОМ НИТУ МИСИС от 04 июля 2022 г., проверила факт выполнения, в соответствии с п. 4.1.4 Календарного плана на выполнение НИОКТР, экспериментальных образцов огнеупорной оболочки, изготовленных на ПАО «ОДК-Кузнецов» по технологии ТП1 МГТК.01310.00030, а именно:

**1. Комиссии предъявлены:**

- 1.1. Технические требования к результатам выполнения комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием российского высшего учебного заведения, Соглашение № 075-11-2022-023 от 06.04.2022 г (ТТ).
- 1.2. Комплект технологической документации ТП1 МГТК.01310.00030.
- 1.3. Программа и методики исследовательских испытаний экспериментальных образцов огнеупорной оболочки и жаропрочных отливок МГТК.01310.00029.001 ПМ.
- 1.4. Акт изготовления экспериментальных образцов б/н от 22 мая 2023 г.
- 1.5 Экспериментальные образцы огнеупорной оболочки №№ 1-10.
- 1.6. Протоколы испытаний:

№4.1.4.1 от 25 октября 2023 г.,  
№4.1.4.2 от 24 октября 2023 г.,  
№4.1.4.3 от 30 октября 2023 г.

## **2. Комиссией установлено:**

2.1. Исследовательские испытания по программе и методике экспериментальных образцов огнеупорной оболочки и жаропрочных отливок МГТК.01310.00029.001 ПМ выполнены полностью.

2.2. Объект испытаний выдержал исследовательские испытания по Программе и методикам МГТК.01310.00029.001 ПМ в части свойств образцов огнеупорной оболочки.

2.3. Полученные образцы полностью соответствуют ТТ в части свойств огнеупорной оболочки.

## **3. Выводы**

3.1. Объект испытаний полностью соответствует техническим требованиям в части свойств огнеупорной оболочки.

3.2. Технологический процесс ТП1 МГТК.01310.00030 может быть предъявлен на следующий этап испытаний.

### **Приложения:**

Акт изготовления экспериментальных образцов:  
б/н от 22 мая 2023 г.

Протоколы испытаний:  
№4.1.4.1 от 25 октября 2023 г.,  
№4.1.4.2 от 24 октября 2023 г.,  
№4.1.4.3 от 30 октября 2023 г.

Председатель комиссии



В.Д. Белов

Члены комиссии



А.В. Колтыгин



В.Е. Баженов

Секретарь комиссии



Е.П. Ковышкина