

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б. Н. Ельцина»  
Институт новых материалов и технологий  
Кафедра литейного производства и упрочняющих технологий

На правах рукописи

Овчинникова Алиса Олеговна

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ  
СУСПЕНЗИИ НА ТЕХНОЛОГИЮ ТОЧНОГО ЛИТЬЯ

2.6.3. Литейное производство

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук

Фурман Евгений Львович

Екатеринбург – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОБОЛОЧКОВАЯ ФОРМА КАК ИСТОЧНИК ДЕФЕКТОВ .....	10
1.1 Технология точного литья .....	10
1.2 Формирование оболочковой формы для точного литья .....	16
1.3 Влияние оболочковой формы на дефекты литья .....	31
1.4 Моделирование процесса литья для минимизации дефектов .....	40
Выводы к главе 1 .....	42
2 СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СУСПЕНЗИИ.....	43
2.1 Исследование вязкости суспензий ЛВМ .....	43
2.1.1 Основные закономерности вязкости суспензий ЛВМ .....	43
2.1.2 Вязкость суспензий на основе огнеупоров ОАО «ДИНУР» .....	56
2.2 Смачивание и растекание суспензий ЛВМ по восковым моделям.....	68
2.3 Методики измерения поверхностного натяжения .....	81
2.2 Измерения поверхностного натяжения суспензий ЛВМ .....	98
2.2.1 Материалы и методы измерения поверхностного натяжения .....	98
2.2.2 Результаты измерений и выводы.....	102
Выводы к главе 2 .....	105
3 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОРМ ДЛЯ ЛВМ .....	107
3.1 Измерение ТКЛР материалов керамической оболочки ЛВМ .....	107
3.2 Измерение теплопроводности и теплоёмкости материалов керамической оболочки ЛВМ.....	116
Выводы к главе 3 .....	131

4 КОРРЕКЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.....	133
4.1 Общая характеристика используемой технологии.....	133
4.2 Механизмы формирования дефектов.....	140
4.3 Ретроспективный анализ брака.....	145
Выводы к главе 4.....	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	182

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

Литейное производство играет значительную роль в работе машиностроительного комплекса. В последнее время предъявляются всё более высокие требования к литым деталям, их эксплуатационным свойствам, а также надежности и точности. Поэтому большое внимание уделяется совершенствованию такого способа изготовления отливок как литье по выплавляемым моделям. Этот способ является одним из самых древних видов литья, а его современная интерпретация позволяет получать отливки высокой точности, практически из любых сплавов, с минимальным припуском на механическую обработку.

Процесс литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) является многостадийным, в связи с этим, иногда сложно понять на каком этапе возникла проблема, которая привела к дефектам отливки. Значительная часть дефектов связана с формированием оболочковой формы – циклического процесса окунания в суспензию и обсыпки восковой модели армирующим наполнителем. Данный процесс чувствителен к большому количеству факторов, которые требуют исследования в связи с развитием материально-сырьевой базы технологии.

В последнее время на отечественном рынке появилось большое количество новых модельных составов, связующих для приготовления суспензии, в том числе, водных связующих, являющихся более экологичной заменой традиционно используемому гидролизованному этилсиликату. Последний готовят непосредственно в литейных цехах или используют готовое связующее.

Для отливок сложной геометрической формы в качестве наполнителя суспензии нерационально использовать маршалит (природный кварц). Широкое распространение получил плавленный кварц. В отличие от природного кварца плавленный прошел фазовые переходы и имеет низкий коэффициент теплового расширения, что помогает избежать растрескивания формы. Но, поскольку плавленный кварц является искусственным материалом, то форма его частиц связана с технологией производства и методами размолла, и может различаться в зависимости от производителя. Соответственно, различаются и свойства суспензии на его основе, а также свойства оболочковой формы.

Поэтому изучение поверхностных и реологических свойств суспензии, процессов смачивания модельных составов является актуальным, т.к. именно эти свойства, в основном, определяют качество керамической оболочки. Требуют изучения и теплофизические свойства оболочковой формы, полученной на основе суспензии для прогнозирования процесса заполнения и кристаллизации металла в форме с целью минимизации усадочных дефектов.

### **Степень разработанности темы исследования**

Исследованиям в области формирования оболочковых форм для ЛВМ посвящены работы Я. И. Шкленника, В. А. Озерова. Они исследовали существовавшие материалы в 60–70-е гг. прошлого века. В настоящее время в этом направлении работают Б. А. Кулаков, В. К. Дубровин, Л. Г. Знаменский, В. Д. Белов, К. В. Никитин, А. А. Шатульский, И. Г. Сапченко, С. И. Репях и другие.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является совершенствование технологии получения керамических оболочек при литье по выплавляемым моделям для снижения уровня дефектности отливок. Для

выполнения поставленной цели требуется изучение влияния на формирование дефектов литья структурно-чувствительных свойств суспензии (вязкость и поверхностное натяжение). В ходе исследования основное внимание было уделено решению следующих задач:

- исследование зависимости вязкости суспензии от доли огнеупорного наполнителя различных фирм-производителей, представленных на отечественном рынке;
- изучение смачивания различных модельных составов суспензиями на основе плавленого кварца и связующих как этилсиликатных, так и водных;
- изучение поверхностного натяжения суспензии плавленого кварца в водных и этилсиликатных связующих;
- на основании полученных результатов скорректировать технологический процесс получения отливок.

Дополнительно для прогнозирования процесса заполнения и кристаллизации отливки проведено исследование термического коэффициента линейного расширения и теплофизических свойств оболочковой формы (теплоемкость, температуропроводность и теплопроводность).

### **Научная новизна**

1. Установлено, что процесс растекания суспензии по модельному блоку затруднен образованием на периметре смачивания зон, состоящих из плотноупакованных частиц огнеупорного наполнителя (эффект «кофейных колец»), что приводит к прекращению течения суспензии и началу фильтрации связующего через огнеупорный наполнитель.

2. Выявлено, что доля огнеупорного наполнителя в суспензии не оказывает влияния её поверхностное натяжение.

3. Экспериментально определены теплофизические свойства (теплопроводность, теплоёмкость, коэффициенты термического расширения) керамической оболочки, изготовленной из плавленного кварца различного фракционного состава, позволившие повысить точность компьютерного моделирования процесса заполнения литейной формы и затвердевания отливки.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Для исследования смачивания суспензией модельных составов использован динамический метод. Статические методы, в основном, метод лежащей капли, используемые для исследования краевых углов смачивания из-за эффекта «кофейных колец», т.е. выноса твёрдых частиц на периметр смачивания, не позволяют получить корректные значения.

Обоснованы рецепты суспензий на наполнителях разных фирм-производителей, обеспечивающие минимальный уровень дефектности оболочковых форм. Установлено преимущество этилсиликатного связующего по сравнению с водными связующими при изготовлении керамических форм для получения сложнопрофильных отливок по причине наилучшего смачивания модельного блока огнеупорной суспензией.

Полученные значения теплофизических свойств керамических форм на основе плавленного кварца позволили корректно проводить компьютерное моделирование процесса кристаллизации отливок.

### **Методология и методы исследования**

Для решения поставленных задач использовались различные методы исследования. Изучение поверхностного натяжения проводилось двумя способами: максимального давления в пузырьке и по методу «пластины Вильгельми». Вязкость суспензий и чистых связующих измерялась с помощью чашечного проточного вискозиметра ВЗ-4. Смачивание оценивали по равновесному краевому углу смачивания, который

фиксирувался в процессе растекания с помощью высокоскоростной камеры «Evercam 1000–16–M». Анализ гранулометрического состава огнеупорных материалов выполнен на лазерном дифракционном анализаторе Shimadzu SALD 2201, дальнейший рассев на фракции производился на «Sieveshaker LPzE-2e» фирмы Morek Multiserw. Микрофотографии порошков сделаны на современном электронном растровом микроскопе высокого разрешения Scios 2 LoVac фирмы ThermoFisher. Для изучения теплофизических свойств выбран прибор «LFA 457 MicroFlash» фирмы Netzsch для определения температуропроводности и теплопроводности методом лазерной вспышки, также для измерения коэффициента температурного расширения использовался дилатометр Linseis L75VD1600C.

Моделирование процесса заливки и затвердевания проводилось в программном пакете ProCast с использованием полученных теплофизических характеристик для керамической формы.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Механизм растекания огнеупорной суспензии по поверхности восковой модели.
2. Влияние гранулометрического состава огнеупорного наполнителя (плавленый кварц) на вязкость суспензии.
3. Влияние формы частиц и доли наполнителя в суспензии на теплофизические свойства и термический коэффициент линейного расширения оболочковой формы.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Основные результаты работы докладывались на Всероссийской научно-технической конференции «Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении» (Самара, 2023) и на 82–й Международной научно-технической конференции «Актуальные

проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2024).

По материалам диссертации опубликовано 10 научных работ из них 8 в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных БД Scopus и WoS.

Новые рецептуры, рекомендации по использованию наполнителя для суспензии и теплофизические расчеты были внедрены в литейном цехе №13 предприятия ООО «Литейное производство УБМ» (Свердловская область).

**Личный вклад** автора заключается в теоретическом обосновании поставленной цели и задач, проведении экспериментальных исследований и опытно-промышленных испытаний, анализе полученных результатов и их обобщении.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 183 страницах, содержит 86 рисунков, 18 формул и 17 таблиц. Список литературы включает в себя 203 наименования.

## 1 ОБОЛОЧКОВАЯ ФОРМА КАК ИСТОЧНИК ДЕФЕКТОВ

### 1.1 Технология точного литья

Термин «точное литье» в России используется для определения литья по выплавляемым моделям (ЛВМ). Классик технологии И. Дошкарж считает, что это имеет под собой законные основания, т.к. ЛВМ обеспечивает наибольшую точность из всех способов литья [1], в том числе даже в металлические формы. ЛВМ называется процесс литья, в котором для получения отливки используются разрушаемые неразъемные керамические формы, полученные по разовым (выплавляемым, выжигаемым, растворяемым) моделям [2].

Миру известны отливки, изготовленные шесть тысяч лет назад, в нижнем Евфрате в стране Урарту, позднее в Египте, Палестине, Испании, Персии, Китае, в ацтекской Мексике, в Италии и других странах. На модель из пчелиного воска вручную наносилась глина, а полости в отливке формировались также глиняными стержнями [1].

Одна из первых отливок, которая предположительно была выполнена методом ЛВМ, была обнаружена в древнем городе Мергарх во время археологических раскопок в Пакистане (1974 г.). После различных процедур и анализа этой находки ученые выяснили, что этот медный амулет (рисунок 1.1) диаметром 2 см в форме колеса с шестью спицами был изготовлен за 5000 до н.э. именно методом «утраченного» или «потерянного» воска (в английском языке «lost wax casting») [3].



Рисунок 1.1 – Внешний вид древнего медного амулета, полученного методом ЛВМ [3]

Французские ученые с помощью метода фотолюминесцентной спектроскопии выяснили, что амулет изготовлен заливкой расплава меди высокой чистоты в предварительно подготовленную глиняную форму [3, 4]. Схематичный процесс изготовления древнего амулета изображен на рисунке 1.2.

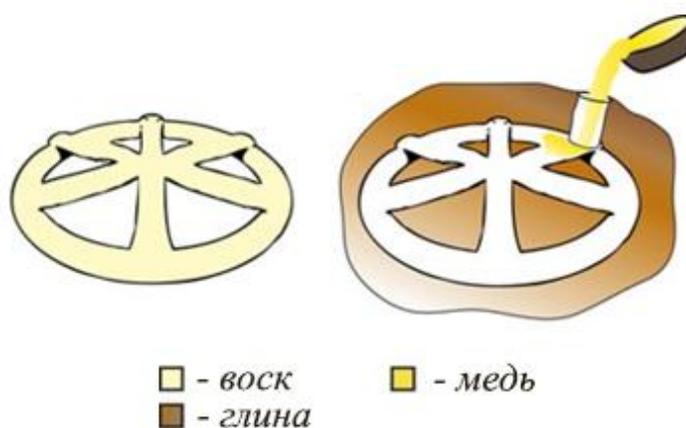


Рисунок 1.2 – Процесс создание древнего амулета методом ЛВМ [3]

Также есть и другие примеры использования метода ЛВМ древним человеком, например, находки в Месопотамии, которые датируются примерно 3700 до н. э. [5, 6].

Метод ЛВМ, который используется сейчас для получения отливок, очень разнится с тем, что было в древнем мире, кроме общего принципа получения отливки по удаляемой модели. На многие века процесс ЛВМ подвергся некоей стагнации, в частности, из-за развития других видов литья. Пока использовались цветные металлы и их сплавы, имеющие относительно небольшую температуру плавления, использование глины или гипса, в качестве формовочного огнеупорного материала, в целом, устраивало человека.

Но растущие потребности в отливках, изготовленных из черных металлов и сплавов, а также необходимость получения тонкостенных отливок сильно повлияли на дальнейшее развитие метода ЛВМ, потому что нужно было использовать другие составы для изготовления моделей и формовочные материалы. Использование пчелиного воска и обычной глины не давали требуемого качества. Также, использование пчелиного воска в качестве модельного материала, из-за резкого падения прочности при температуре около 35 °С, очень сильно ограничивало вес и размеры отливок, фактически, метод ЛВМ использовался лишь для ювелирной и некрупной художественной продукции. Для технического литья требуются более технологичные модельные составы, которые начали разрабатывать исследователи и промышленники [7].

Начало XIX в. ознаменовалась несколькими важными открытиями в Европе. В 1820 г. французским ученым Мишелем-Эженом Шевре́лем была открыта стеариновая кислота [8], а уже 1830 г. немецкий химик Карл фон Рейхенбах – парафин [9]. Даже сейчас эти два компонента являются основными наполнителями для большинства литейных МС. Компоненты-наполнители являются структурообразующими, т.к. они способны

препятствовать усадке литейных восков, снижать внутренние напряжения, удешевлять стоимость модельных составов [10].

В результате большого количества экспериментов и изучения свойств перспективных компонентов модельных составов исследователи пришли к выводу, что для получения необходимых значений физических, химических и механических свойств нужно использовать, как минимум два компонента. Из наиболее часто применяемых на производствах модельных составов используют ПС 50–50, состоящий из парафина и стеарина в соотношении 1:1. С использованием данного модельного состава номенклатура отливок, выполняемых ЛВМ, существенно возросла. Хотя парафиностеариновый модельный состав (в разной пропорции) обладает некоторыми недостатками: значительная объемная и линейная усадка, высокий коэффициент объемного расширения при нагревании, низкая прочность и твердость [11, 12].

В связи с этим разработка модельных составов и сейчас не стоит на месте, например, в СССР в различное время было предложено более 200 видов машиностроительных модельных составов, сейчас же их количество насчитывает около 300. Также не стоит на месте и рынок ювелирных восковых составов, которые стоит особняком, в связи с повышенными требованиями к минимальной шероховатости поверхности. Изучение синтетических добавок для модельных составов, улучшающих их свойства, тесно связано и с литьем высокоответственных отливок для авиадвигателестроения из жаропрочных сплавов. Возросшие требования к качеству изготавливаемых деталей заставляют продолжить поиск новых материалов и разработку составов нового поколения с улучшенными технологическими и физико-механическими характеристиками, способных заменить и импортные модельные составы [13].

Следующему витку развития для метода ЛВМ послужило развитие технологии силикатов. В связи с тем, что в начале XX в. развитие метода

ЛВМ все ещё сдерживалось из-за недостатка качественных огнеупорных материалов [14].

По различным источникам только в 1929 г. ученые К. Прангль и Р. Ердл впервые применили огнеупорную суспензию, в которой в качестве связующего они использовали спиртовой коллоидный раствор кремниевого ангидрида. Сначала этот процесс нашел применение в стоматологии в США, а позже для массового производства мелких отливок из стали и тугоплавких сплавов [15]. Сейчас эта технология изготовления оболочковых форм является основной.

Свое современное промышленное воплощение способ ЛВМ получил лишь в 40-е гг. XX в. Ученые стали более серьезно изучать физико-химические процессы, которые лежат в основе многих операций ЛВМ, что при изготовлении керамической оболочки, что при заливке металла в форму. Активно разрабатывались вопросы, касающиеся механизации и автоматизации цехов, а также использования новых материалов при изготовлении керамических оболочек, освоения новых сплавов со специальными свойствами, а самое важное исследования условий обеспечения стабильного качества отливок и минимизации дефектов [16].

Развитие этого процесса в части использования новых материалов и методов контроля технологического процесса полностью изменило номенклатуру производимых деталей. Из способа изготовления украшений, к которым не предъявлялось никаких технических требований, технология ЛВМ превратилась в метод получения наиболее ответственных деталей авиационной и автотракторной промышленности, тяжелого, транспортного и нефтяного машиностроения, приборостроения, а также для деталей подшипников, весов, пресс-форм и штампов, бурового, режущего и измерительного инструмента [15]. В ряде случаев способ ЛВМ актуален при изготовлении деталей, когда финишная обработка крайне затруднена [2].

Единственным ограничением этого способа литья относительно других является малый размер получаемых отливок, но другие технические характеристики способа существенно превосходят альтернативы при изготовлении отливок из стали (таблица 1.1). Спорным вопросом является стоимость формообразования традиционно считается, что ЛВМ – дорогостоящий технологический процесс, но с уменьшением доли технологии песчано-глинистого литья, который был взят в качестве элемента сравнения, стоимость оболочковых форм для ЛВМ мало отличается от стоимости объемных форм для ХТС. А у ЛВМ есть еще более высокая точность, снижающая затраты на механическую обработку.

Таблица 1.1 – Ограничения способов литья стальных отливок [17, 18]

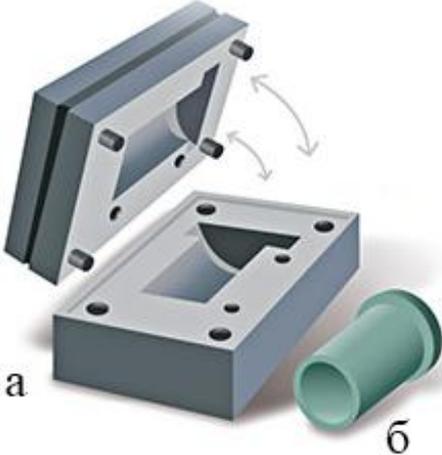
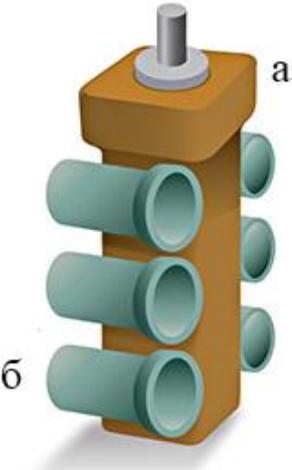
Метод литья	Точность размеров, рекомендуемый класс по ГОСТ 26645-85, не менее	Минимальная шероховатость поверхности, $R_z$ мкм	Минимальная толщина стенки, мм
Песчаные формы (ПГС)	10	25	5
Песчаные формы (кроме ПГС)	9	10	3
По выплавляемым моделям	6	2,5	1,2
Шоу-процесс	7	3	1,6

Представленный в таблице 1.1 метод под названием «Шоу-процесс» является способом литья в керамические формы, но по разъемной модели. Такой метод был предложен в 1938 г. [19]. В качестве формовочной массы используется суспензия на силикатном связующем, что определяет близкое к ЛВМ по технологическим характеристикам положение способа, но всё-таки этот способ проигрывает по параметрам точности и шероховатости классическому методу ЛВМ в оболочковые формы. Одной

из наиболее разрабатываемых в настоящее время проблем в ЛВМ остается именно формообразование.

## 1.2 Формирование оболочковой формы для точного литья

Современная технология точного литья представляет собой сложный многооперационный процесс, который изображен на рисунке 1.3 в виде упрощенной схемы с основными этапами.

I этап – Изготовление восковых моделей	
	<p>Из модельных композиций запрессовкой в металлические пресс-формы (б) изготавливаются модели деталей (а) и запрессовкой/окунанием модели литниково-питающей системы (ЛПС).</p>
II этап – Создание модельного блока	
	<p>Далее после разбраковки восковых моделей требуемых деталей (б) их соединяют с элементами ЛПС (а) в модельный блок.</p>

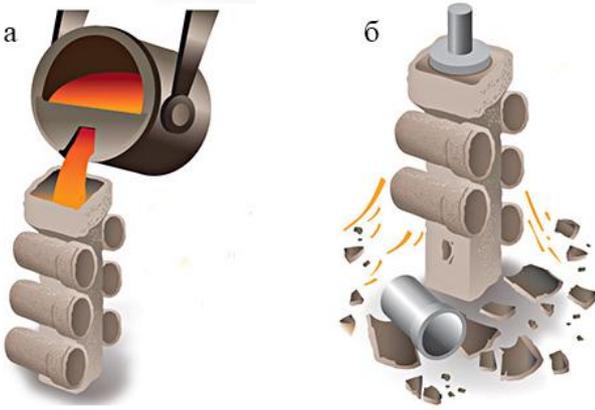
III этап – Формирование оболочковой формы	
 <p>The diagram illustrates the formation of a shell mold. Part (a) shows a model being dipped into a suspension. Part (b) shows the model being coated with refractory granules.</p>	<p>Модельный блок окунают в суспензию (а), состоящую из связующего и огнеупорного пылевидного материала, после модельный блок обсыпается огнеупорным зернистым материалом (б) и сушится. Количество слоев связано с требованиями к прочности оболочковой формы (варьируется от 4 до 8).</p>
IV этап – Выплавление модельного состава и прокалка	
 <p>The diagram shows a model being heated in a furnace. Molten material is being poured into a tray below.</p>	<p>Выплавление модельного блока из формы производится в воде или перегретым паром. Следом идет операция прокаливания формы перед заливкой, которая преследует цели испарения остатков модельного состава, повышения прочности формы, обеспечения заполняемости.</p>
V этап – Заливка металлом (а) и разрушение оболочковой формы (б)	
 <p>The diagram shows the final steps of the process. Part (a) shows molten metal being poured into the shell mold. Part (b) shows the shell mold being broken apart to reveal the metal casting.</p>	

Рисунок 1.3 – Технологическая схема процесса изготовления отливок методом ЛВМ [20, 21]

Отливки, получаемые методом точного литья, имеют те же дефекты, которые встречаются у отливок, изготовленных другими методами литья в разовые формы. Справиться с дефектами в ЛВМ гораздо сложнее, т.к. на их появление влияет больше факторов из-за многоступенчатости процесса и применения большого количества материалов.

Дефекты отливок, получаемых методом ЛВМ в керамические формы можно условно разделить на дефекты формы, включающие в себя (рисунок 1.4), и дефекты металла, включающие в себя несоответствия по химическому составу, структуре и механическим свойствам [22–24]. Значительная часть дефектов возникает в результате физико-химических процессов при изготовлении керамической оболочковой формы и обуславливается её свойствами, а значит и свойствами её основных компонентов: связующего и огнеупорного наполнителя. К таким дефектам можно отнести полностью засоры, и частично газовые раковины, и коробление. Таким образом, по данным [25] керамическая оболочка является причиной 30–40 % дефектов ЛВМ. Естественно, что влияние керамической оболочки на долю дефектов связано с конфигурацией и размером отливок. При сложной конфигурации, особенно в художественном литье, влияние керамической оболочки увеличивается, увеличивается оно и при увеличении размеров отливок.

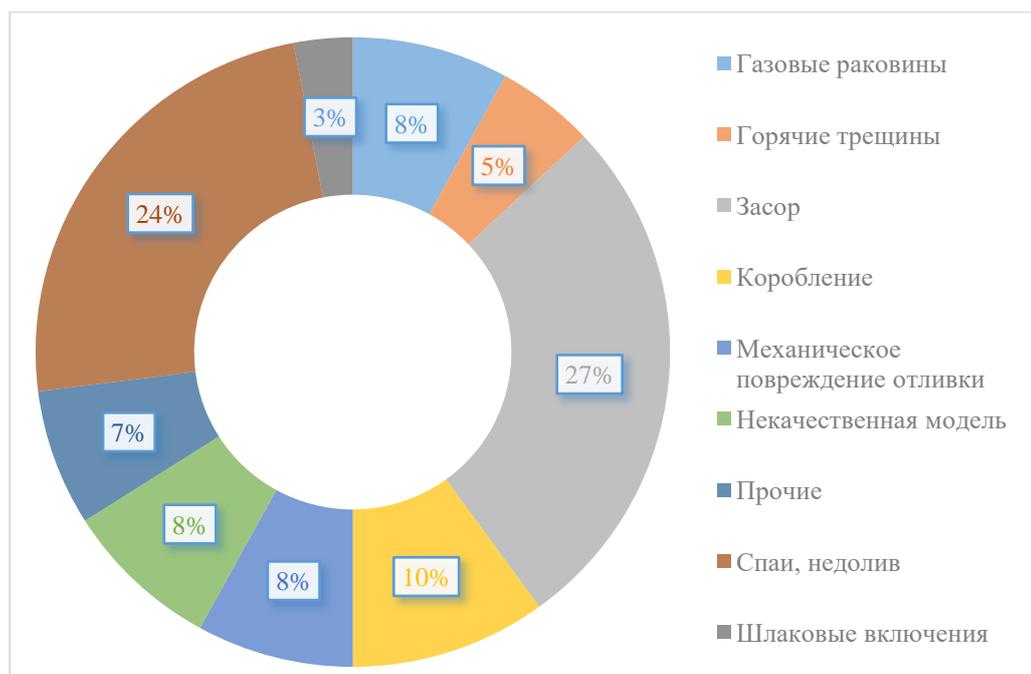


Рисунок 1.4 – Распределение дефектов ЛВМ [25]

Оболочковая форма является основой способа ЛВМ: неразъёмная, негазоторная, газопроницаемая, жёсткая, но податливая к разрушению по окончании кристаллизация сплава, с гладкой контактной поверхностью, точная [22]. Оболочковая форма в методе ЛВМ представляет собой структуру из частиц огнеупорного наполнителя, объединенных с помощью связующего вещества. Основные характеристики оболочки формируются благодаря свойствам частиц огнеупорного наполнителя и используемого связующего. Связующие в начальной стадии создания литейной формы представляют собой коллоидные системы, которые из-за протекающих физико-химических процессов во время сушки слоев и прокаливания оболочки превращаются в пленки огнеупорных оксидов. Эти пленки соединяют зерна формовочного материала [26, 27].

Для минимизации дефектов, связанных с керамической оболочкой, необходимо сформулировать технические требования к форме, в целом, а также к её компонентам.

Химическая стойкость керамической оболочки при взаимодействии с расплавленным металлом вынуждает использовать оксиды элементов, которые стоят до основы заливаемого сплава в ряду электрохимических потенциалов. Химические свойства используемых наполнителей представлены в таблице 1.2 [25].

Керамическая оболочка в методе ЛВМ должна быть термостойкой, т.е. способной сохранить свою целостность без нагрузки при резком изменении температуры [1, 28, 29]. Низкая термостойкость приводит к браку по засорам, поверхностным дефектам на отливках (рисунок 1.5), прорывам форм при заливке металла.



Рисунок 1.5 – Дефекты поверхности отливок

Термостойкость является комплексным показателем и зависит от многих факторов, в том числе:

1. Огнеупорный наполнитель в суспензии ЛВМ не должен деформироваться при температурном воздействии жидкого металла и прокалке. Это обеспечивается предотвращением спекания наполнителя [30, 31]. Спекание – это вязкое течение твердых тел, которое протекает как направленное перемещение пор, представляющих собой «вакансии». Количество «вакансий» возрастает при нагревании, т.к. их образование обуславливается срывом атомов со своих мест в результате теплового движения [32]. В результате происходит уменьшение линейных размеров

оболочковой формы. Из-за низкой термостойкости оболочек, проявляющейся при их прокатке и заливке, в отливках образуются различные литейные дефекты типа бороздок, гребешков, зазоров, вследствие появления трещин на корке, что дает повышенный брак точного литья [21]. Путь решения данной проблемы состоит в использовании наполнителей с максимальной температурой плавления. Температуры плавления химически чистых наполнителей представлены в таблице 1.2.

2. Огнеупорный наполнитель должен иметь низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), чтобы избежать растрескивания корочек. ТКЛР наполнителей, используемых для ЛВМ, представлены в таблице 1.2.

3. Пленки связующего, наполнитель суспензии и обсыпочный материал должны иметь одинаковые ТКЛР. Иначе неравномерное изменение размеров в микрообъемах приведет к разрушению корочки при нагреве. Наибольшей термостойкости можно добиться, если оксид связующего и оксид огнеупорного наполнителя будут иметь одинаковый химический состав, либо схожую кристаллическую решетку [30].

4. На термостойкость влияет фракция обсыпочного огнеупорного наполнителя, форма зерен наполнителя и, естественно, количество слоев [1, 21]. Большая прочность оболочек достигается при обсыпке крупной фракцией [1].

Важнейшим экономическим требованием является цена используемых наполнителей и их массовый расход, связанный с плотностью. Поэтому в качестве экономического параметра следует рассматривать приведенную цену (цена  $\times$  плотность). В таблице 1.2 приведен условный показатель, цена  $\times$  плотность кристаллического кварца принята за 1. Определяющим является цена объема, т.к. оболочковая керамическая форма изготавливается исходя из объема сырья, в данном

случае, огнеупорного наполнителя. Характеристикой затрат на формовочные материалы является цена объема. В продаже же формовочные материалы по массе. Поэтому взят и рассчитан по формулам условный показатель.

$$\frac{\text{Цена}}{V} = \text{Цена} \times \rho$$

Таблица 1.2 – Свойства огнеупорных материалов [21, 23, 25]

Название материала	Формула	Свойства			Цена/Объем	Условный показатель
		Температура плавления, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	ТКЛР, 1/°С 10 <sup>6</sup>		
Кварц крист. (маршалит)	SiO <sub>2</sub>	1713	2650	13,7	79500	1
Кварц плавленный	SiO <sub>2</sub>	1713	2020-2150	0,4-0,5	193500	2,4
Электрокорунд белый	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2050	3990	8,8	590520	7,4
Оксид магния (периклаз)	MgO	2825	3580	13,5	1245840	15,7
Дистен-силлиманит	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · SiO <sub>2</sub>	1545	3250-3600	4,2-5,5	437500	5,5
Шамот	3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · SiO <sub>2</sub>	1600	3000	5,3	225000	2,8
Муллит	3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2SiO <sub>2</sub>	1850	3040	4,3	577600	7,3
Оксид циркония	ZrO <sub>2</sub>	2675	5560	4,1	17447280	219,5
Силикат циркония	ZrO <sub>2</sub> · SiO <sub>2</sub>	2420	4570	4,2	3098460	39,0
Муллитцирконий	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · SiO <sub>2</sub> · ZrO <sub>2</sub>	1870	4400	6,1	5500000	69,2

Наиболее распространенным огнеупорным наполнителем до недавнего времени являлся кристаллический кварц, уже давно нашедший применение в других способах литья как огнеупорный наполнитель в силу своей дешевизны и распространенности в природе. Кристаллический кварц

обладает достаточно высокой температурой плавления, термостойкостью, доступностью, низкой стоимостью. Для обсыпки слоев используются различные фракции (первый слой – 0,16–0,20 мм и 0,315–0,40 мм последующие), а для приготовления суспензии используется пылевидная фракция – маршалит. Пылевидный кварц (маршалит) – это тонкодисперсный порошок, получаемый размолотом из природных месторождений. Кварц молотый пылевидный по ГОСТ 9077–59 [33] выпускают трех марок с содержанием кремнезема не менее 98 % и влаги не более 2 % [34].

Отличительной особенностью кристаллического кварца  $\text{SiO}_2$  является обладание полиморфизмом, т.е. способностью пребывать в нескольких кристаллических фазах, которые отличаются друг от друга структурой. Для  $\text{SiO}_2$  было установлено и изучено более 12 кристаллических полиморфных разновидностей: две модификации кварца ( $\alpha$  и  $\beta$ ), три разновидности тридимита ( $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ ), две – кристобалита ( $\beta$  и  $\lambda$ ), а также модификации, полученные при высоких давлениях, такие как коэсит, стимовит, китит, волокнистая форма W–кремнезем и меланофлогит [35].

Полиморфные превращения любых веществ заключаются в перестройке кристаллической решетки под воздействием высоких или низких температур, что приводит к возникновению новой разновидности минерала, часто с сильно отличающимися свойствами. В таблице 1.3 приведены температуры модификационных превращений кварца, а также их соотношение с изменением объема [36].

Таблица 1.3 – Модификационные превращения кристаллического кварца [37]

Превращение	Температура, °С	Увеличение объема, %
$\alpha$ -кварц $\rightarrow$ $\beta$ -кварц	573	0,8
$\beta$ -кварц $\rightarrow$ $\alpha$ -тридимит	870	12,7
$\alpha$ -тридимит $\rightarrow$ $\alpha$ -кристобалит	1470	4,7
$\alpha$ -кристобалит $\rightarrow$ плавление	1713	0,1

Исходя из таблицы 1.3 видно, что наиболее сильное изменение объема происходит при температурах 870 °С и 1470 °С, однако эти процессы происходят достаточно медленно, поэтому за время изготовления и прокаливания оболочки существенных изменений не происходит. Скорость протекания различных типов полиморфных превращений зависит от количества и степени разрыва связей. Превращение из  $\alpha$ -кварц  $\rightarrow$   $\beta$ -кварц сопровождается небольшим изменением объёма, но с разрывом химических связей, поэтому скорость велика [38].

Полиморфизм огнеупорного наполнителя керамической оболочки может привести к ее растрескиванию, т.к. эти превращения сопровождаются значительными скачкообразными изменениями объема. Если же оболочка не треснет, то изменения объема приведут к неточности в размерах отливок. Во избежание растрескивания минимизируют скорость нагрева корочек при прокалке, что также удлиняет процесс изготовления керамической оболочки.

Кроме того, природный кварц в своём составе может содержать ряд элементов, существенно снижающих его огнеупорность и вступающих в реакции со связующим. Ещё одним немаловажным фактором является неэкологичность использования кристаллического кварца. Например, в Европе на некоторых предприятиях запрещено использование пылевидного кварца из-за возникновения такого заболевания легких, как силикоз. Исследования подтверждают, что смертность от заболеваний, связанных с нарушением функций лёгких, все ещё является высокой, что свидетельствует о недостаточной гигиене труда и оснащённости цехов системами вентиляции [39]. Конечно, в случае использования плавленного кварца, в качестве огнеупорного наполнителя, можно минимизировать

образование кремниевой пыли, вследствие того, что керамические оболочки меньше подвержены разрушению, например, во время прокалики.

В свете вышеуказанных проблем в последнее время в технологии получения керамической оболочки для ЛВМ, кристаллический кварц вытесняется плавленным кварцем, как наиболее дешевой альтернативой маршалиту.

Преимущество плавленного кварца перед кристаллическим заключается в том, что у него нет превращений и нет кристаллической решетки, т.к. он аморфный. Поэтому он имеет низкий ТКЛР (ниже, чем у других альтернативных наполнителей из таблицы 1.2), что позволяет сделать процесс прокаливания менее энергозатратным, а значит более экономически выгодным, т.к. прокаливание КО является самой энергоемкой операцией технологического процесса ЛВМ. Благодаря этому свойству появляется возможность загружать керамические литейные формы для прокаливания при любой температуре в печи, что сократит общее время прокаливания.

Плавленный кварц также имеет и другое название – это кварцевое стекло. В зависимости от сырья кварцевое стекло бывает, как прозрачным (оптическое и техническое), так и непрозрачным. Прозрачное стекло обычно производят из синтетического диоксида кремния или из природного сырья с высоким коэффициентом светопропускания.

Непрозрачное кварцевое стекло (НКС) производят, как правило, плавлением природного кварцевого песка повышенной чистоты. НКС является непрозрачным из-за большого количества пузырей (диаметром 0,03–0,3 мкм), диффузно рассеивающие свет и придающие ему непрозрачность [40]. Это явление можно увидеть на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Непрозрачное кварцевое стекло

НКС чаще всего применяют в высокотемпературных процессах. Из него изготавливают огнеупорные изделия и кварцевую керамику (тигли, кожухи, ролики, разливочные стаканы в металлургическом производстве и многое другое). Но всё-таки значимой областью использования непрозрачного плавленого кварца является литейное производство, а именно, изготовление термоустойчивых керамических оболочек в ЛВМ.

Сейчас промышленное кварцевое стекло получают различными способами: электротермическим, газопламенным, плазменным, паросинтетическим [35]. Каждый из этих способов имеет большое количество вариантов и модификаций [41].

При электротермическом способе процесс проходит в небольшом вакууме при остаточном давлении 0,01–1,0 Па в среде гелия или водорода. Природный кварц подается в пламя электрической дуги, а полученный расплав стекает в графитовые либо молибденовые тигли. У этого метода есть основной недостаток в виде повышенного образования пузырей из-за невысокой температуры процесса, т.е. вследствие высокой вязкости.

Во время газопламенного способа сырье поступает сверху в пламя, которое образовано водородно-кислородными горелками, расположенными по кругу. По сравнению с электротермическим способом

обеспечивается большая однородность расплава и меньшее количество пузырей. Основным недостатком и того, и другого способа является загрязнение примесями оксидов металлов (Cu, Fe, Ni, Mn), которые содержатся в природном неочищенном сырье, а также оксидами из материала тигля.

Для синтеза из газовой фазы (паросинтетический метод) используется реакция образования  $\text{SiO}_2$  при воздействии паров воды или кислорода на четыреххлористый кремний. Процесс идет в пламени водородно-кислородной горелки, состав смеси которой регулируется для обеспечения оптимальных условий реакции. Частицы диоксида кремния имеют радиус примерно 0,1 мкм и слипаются, падая в накопитель [41].

К перспективным способам получения НКС для производства огнеупорного наполнителя для керамических оболочек следует отнести плазменные агрегаты, которые все больше применяются для получения силикатных расплавов [42]. Например, на производстве ОАО «ДИНУР» (г. Первоуральск) плавку кварцевого песка осуществляли в плазмотронах ПР-450. Рабочий ток дуги реактора составляет 1300–1400 А при напряжении 300–400 В (точные характеристики плавки зависят от содержания в песке примесей оксидов алюминия и железа). По мере наплавления блока из непрозрачного кварцевого стекла, он вытягивается из камеры с помощью специального механизма для вытягивания, а затем транспортируется на специальную площадку. Там его тщательно очищают от поверхностной кварцевой корки, состоящей из не расплавившегося кварцевого песка, а также частиц графита, которые могли попасть из электродов. Средняя скорость наплавления составляет 2 см/мин и может варьироваться в пределах 1 см стекла за 20–40 с в зависимости от качества песка и скорости загрузки сырья [43, 44].

Для тонкого размола применяются барабанные или вибромельницы. В барабанных мельницах при вращении барабана шары увлекаются

центробежной силой вверх и по достижении некоторой высоты падают на стенку барабана. В вибромельнице шары под действием вибратора совершают неупорядоченные движения. Обычно в шаровой мельнице материал можно измельчать до величины, примерно, 50 мкм. Дальнейшего уменьшения размера частиц можно достичь, только значительно увеличив продолжительность операции размолла. Благодаря гораздо большему числу столкновений вибромельница позволяет осуществлять размол значительно интенсивнее, вследствие чего удовлетворительная диспергация кварца, достигается после получасового помола, в то время, как в обычной шаровой мельнице для этого требуются сотни часов [44].

Вторым компонентом оболочковой формы является связующее. Связующее с огнеупорным пылевидным материалом образует формовочную смесь – суспензию. Для изготовления керамических оболочек связующие вещества по химическим свойствам делят на три группы: кислые, амфотерные и основные [21, 25].

К кислым связующим относится один из самых распространенных материалов для получения суспензии – этилсиликат (ЭТС), но сами по себе тетраэтоксисиланы не обладают связующими свойствами. Поэтому проводится реакция гидролиза по уравнению 1.1 [24]:



Полученный продукт гидролиза этилсиликата представляет собой органический коллоидный раствор кремниевой кислоты (кремнезоль), которые при сушке и прокалке оболочковых форм выделяют  $\text{SiO}_2$ , который в свою очередь соединяет зерна огнеупорной основы суспензии [21, 26] в термостойкую керамическую оболочку [45].

Но ЭТС является токсичным и пожароопасным, также имеющим малый срок сохранения стабильных свойств после гидролиза (не более

семи суток), сопровождаемый введением ацетона на стадии гидролиза и аммиака на стадии сушки [21, 46, 47].

Конечно, в Восточной Европе и Российской Федерации производство оболочек на основе гидролизованного ЭТС, пока остается традиционным. Но с каждым годом увеличивается внимание к проблеме загрязнения окружающей среды. Например, в странах Европейского союза и других европейских странах согласовано ужесточение верхних пределов выбросов вредных веществ, таких как: диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), летучие органические соединения и аммиак ( $\text{NH}_3$ ). Примерно, 80 % предприятий ЛВМ Западной Европы и США переходят на связующие на водной основе.

По итогам заседания исполнительного органа Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (LRTAP), на котором были приняты изменения в Гетеборгский протокол. Такие страны как Канада, США, Российская Федерация, страны Южной и Восточной Европы, Центральной Азии выразили своё намерение присоединиться к этому протоколу [48].

Поэтому в настоящее время на рынке литейных материалов появляется все больше предложений по использованию устойчивых кремнезоль, представляющих собой готовое связующее, не требующее приготовления в цеховых условиях, а также, гидролизованный этилсиликат (ГС) в готовом виде, который выпускает НПК «Пента-91» [45, 49].

В отличие от этилсиликатов (ЭТС-40 и ЭТС-32) готовое связующее не требует проведения операции гидролиза. Это даёт возможность исключить влияние человеческого фактора и формировать оболочки на стабильной по характеристикам качественной жидкой составляющей [50].

Вызывают несомненный интерес связующие на водной основе (ВС) таких торговых марок как «Сиалит» [51], «Армосил» [52], «Армалит», «Силарм» [53] и ряд других, импортных марок «Ремет» [54], «Ultracast», «Primcote® PLUS», «KEYCOTE», «Matrixcote» и многих других (таблица 1.4). Они представляют собой гидрозоль (аквазоли), в которых  $\text{SiO}_2$  присутствуют в виде коллоидных частиц в щелочной среде (рН 9–10).

Таблица 1.4 – Свойства различных видов связующих [21]

Наименование показателей	Армосил К	Армосил SR	Сиалит-20	Силарм	Keycote	Matrixcote	ЭТС-32	ЭТС-40	ГС-20
Массовая доля $\text{SiO}_2$ , % масс.	24-27	39-41	20-22	23	31	26,7	31-34	39-42	17-21
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,16 - 1,18	1,29-1,31	1,133-1,135	1,17-1,20	1,203	1,156	0,95 - 0,99	1,04-1,07	0,95
рН, ед. рН	3,3-4,5	10-11	9,5-10,5	9,5	7,5	10,6	5	6	6-7
Краевой угол смачивания МС	45	45	45-50	45	50	48	15	15	20

Почти все авторы отмечают более высокую экологичность ВС [55–57], но при этом ВС имеют и довольно значимые недостатки, такие как: склонность к седиментации, низкую смачиваемость моделей, что ограничивает их использование при высокой детализации моделей, например, в художественном литье, а также низкая скорость высыхания, что довольно сильно может увеличить время процесса создания керамической оболочки [58, 59].

Большое влияние на технологические параметры керамической формы и экономику производства оказывает способ сушки: конвективная при атмосферном давлении, воздушно-аммиачная, вакуумно-аммиачная, инфракрасная. В зависимости от выбора связующего будет выбран способ и сушки. Например, для сушки форм, изготовленных на этилсиликатном

связующем, применяется воздушно-аммиачная сушка, что очень ускоряет процесс в сравнении с сушкой на воздухе для водных связующих. Для связующих на водной основе может применяться инфракрасная сушка.

Кроме этого, гидрозолы, в отличие от ЭТС, не могут транспортироваться, и храниться при отрицательных температурах [24], закупая значительные объемы, необходимо позаботиться о «теплом» складе либо о способе транспортировки в холодное время года.

В целом ясно, что данные по экономической эффективности применения связующих разных типов спорны и носят, в определенной мере, коммерческий характер [45]. Также выбор типа связующего обусловлен характеристиками отливок и некоторыми особенностями производства, в том числе, даже, расположением предприятия.

Таким образом, объектом исследования по минимизации дефектов керамической оболочки по результатам сравнительного анализа выбрана суспензия с наполнителем – плавленный кварц, а связующие будут опробованы, как водные, так и на основе этилсиликата.

### **1.3 Влияние оболочковой формы на дефекты литья**

Значительная часть дефектов ЛВМ – 30–40 % (рисунок 1.4) – возникает как результат нарушений в структуре керамической оболочки. «Идеальная» керамическая форма (рисунок 1.7) представляет собой перемежающиеся слои затвердевшей суспензии и обсыпочногo материала определённой толщины. В том числе, затвердевшая суспензия обеспечивает механические свойства всей керамической оболочки при манипуляциях, нагреве при прокалке и заливке. Разнообразные отклонения от «идеальной» структуры провоцируют формирование дефектов литья.

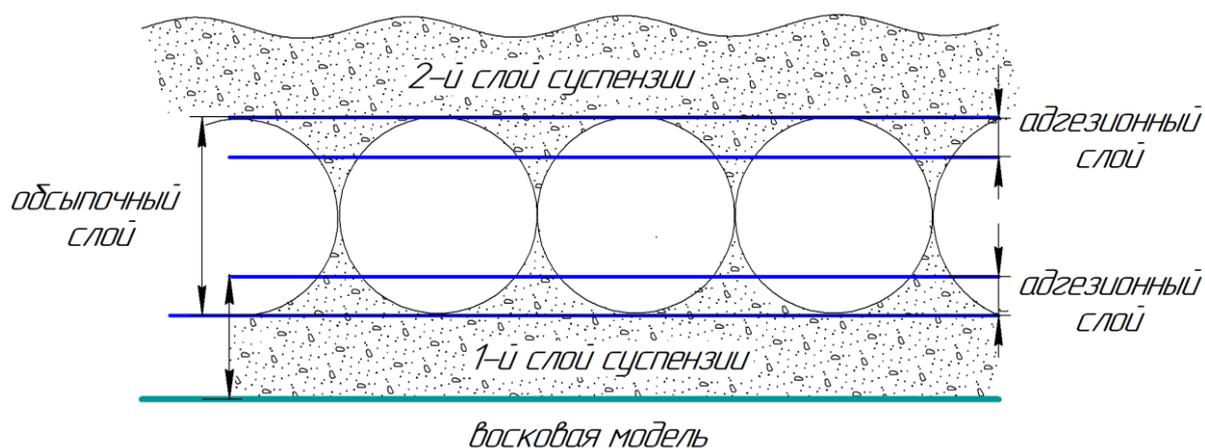


Рисунок 1.7 – Структурный элемент «идеальной» керамической оболочки

Технологические процессы изготовления керамической оболочки, к сожалению, без более глубокого изучения физико-химических процессов формообразования, практически не позволяют свести к минимуму брак отливок по дефектам, поверхностным, либо нарушениям геометрических размеров и т. д., вследствие недостаточной прочности, трещиностойкости, термостойкости, податливости и газопроницаемости оболочковых форм [60–63].

В точном литье в керамические формы одними из самых распространенных видов дефектов являются дефекты поверхности. Качество поверхности отливок, полученным ЛВМ, является одним из определяющих факторов для его реализации, т.к. именно высокое качество поверхности является одним из основных преимуществ метода ЛВМ перед другими (таблица 1.1).

Поэтому четкость отпечатка, оставленного модельным блоком, является важной характеристикой, которая сказывается на качестве поверхности. Этот параметр, по большей части, зависит от капиллярного взаимодействия суспензии с поверхностью восковой модели и обсыпочно материала, которое определяется свойствами модельного состава, связующего и огнеупорного наполнителя [64, 65].

При увеличении толщины слоя огнеупорной суспензии могут формироваться газовые дефекты – газовые раковины и газовая пористость (рисунки 1.8 – 1.9), образуемые вследствие снижения газопроницаемости из-за увеличенной толщины всей керамической оболочки. Завышенная толщина слоев суспензии приводит к повышению вероятности захвата газов при формировании оболочки, неполному удалению остатков модельного состава и влаги при прокатке.

Большая толщина слоя суспензии ведет к тому, что слой получается не полностью армированным огнеупорным наполнителем, вследствие этого и возникают дефекты. Механизм образования газовых дефектов представлен на рисунке 1.10.



Рисунок 1.8 – Дефект в виде шероховатости, возникшей из-за газовой пористости

Дефект в виде газовых раковин (полость в теле отливки) или скопления этих раковин в полости отливки (вскип) также образуется, вследствие попадания газов из керамической оболочки в металл (рисунок 1.9 – 1.10). Также газовые раковины в теле отливки могут появиться из-за высокого содержания влаги в керамической оболочке. В свою очередь, для того чтобы избежать дефекта такого рода, формы необходимо держать

подогретыми и заливать, непосредственно, после извлечения из прокалочной либо сушильной печей.

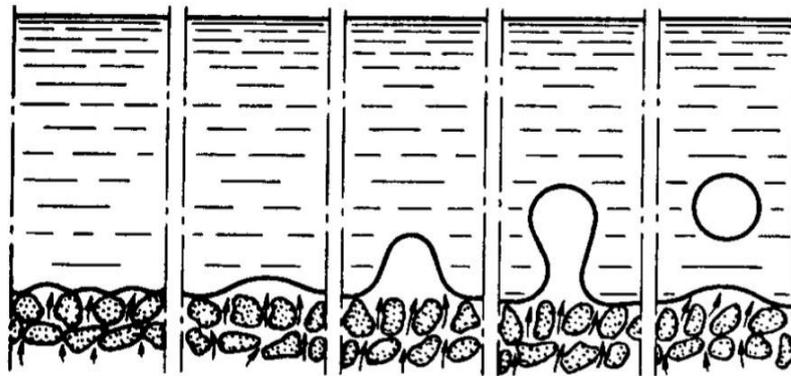


Рисунок 1.9 – Механизм образования газовых дефектов [66]



Рисунок 1.10 – Дефект в виде скопления газовых раковин

Формирование недолива (рисунок 1.11), особенно в тонких стенках отливок, также может быть обусловлено низкой газопроницаемостью литейной формы (как одним из факторов) из-за увеличения толщины слоя суспензии [67].



Рисунок 1.11 – Дефект в виде недолива

Влияние газопроницаемости на недолив подтверждается и тем, что при переходе с маршалита на плавленный кварц термостойкость керамической оболочки и размерная точность отливок существенно повысилась, но одновременно повысился и брак по недоливу из-за снижения газопроницаемости (таблица 1.5) [67]. Это обусловлено значительным термическим расширением и образованием микротрещин в формах на маршалите, и отсутствием такого явления в формах на плавленном кварце. Для улучшения заполняемости формы потребовалось повысить температуру заливки керамических форм из плавленного кварца, а также обеспечить создание специальных вентиляционных систем. Данные для таблицы 1.5 предоставлены производством ООО «Литейное производство УБМ» [68].

Таблица 1.5 – Процент недолива и пробоя от общего уровня брака [68]

Процент от общего уровня брака	Недолив, %	Пробой, %
Маршалит	12	22

Плавленный кварц	21	10
------------------	----	----

Ещё один специфический дефект поверхности отливок, полученных методом ЛВМ – это отслоение (рисунок 1.12), соответствующее пригару (рисунок 1.13) по ГОСТ 19200–80 [69]. Механизм образования данного дефекта состоит в разрушении поверхностного слоя оболочки из-за недостаточной адгезии к обсыпчному материалу, возникает при высокой вязкости суспензии, что также ассоциировано с повышенной толщиной ее слоя. Пригар обычно формируется в наиболее термически нагруженных местах отливки [70]. Отслоение возникает локально, и связано с мануальными условиями формирования оболочки, не обеспечившими эффективную адгезию поверхностного слоя к обсыпчному.



Рисунок 1.12 – Дефект на отливках после отслоения керамической оболочки



Рисунок 1.13 – Дефект отливки в виде пригара

Дефект, характерный исключительно для ЛВМ – это так называемый «пробой» (рисунок 1.14). Механизм образования пробоя представлен на рисунке 1.15. При недостаточной толщине контактного слоя суспензии на модели, зерна огнеупорного наполнителя при обсыпке «пробивают» его, вследствие того, что краевой угол смачивания суспензии по отношению к наполнителю будет выше, чем к материалу восковой модели, формируются пустоты, впоследствии заполняемые расплавом.

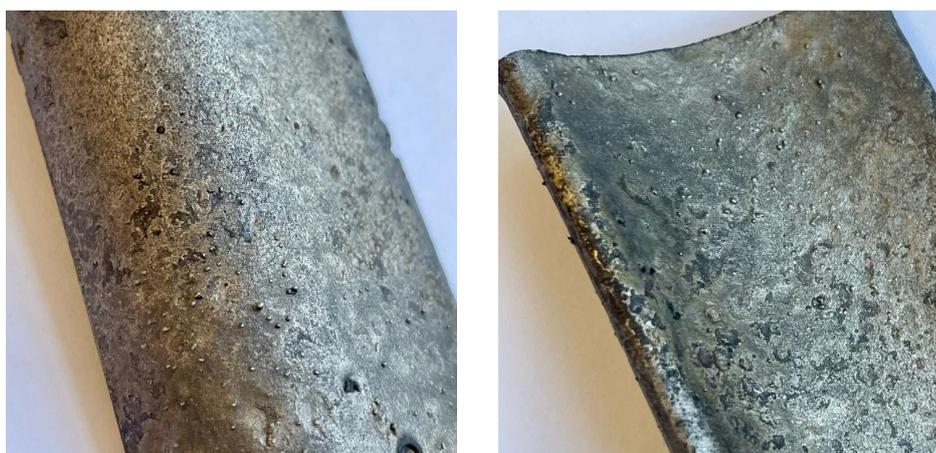


Рисунок 1.14 – Дефект «пробой» на отливке «Лопатка»

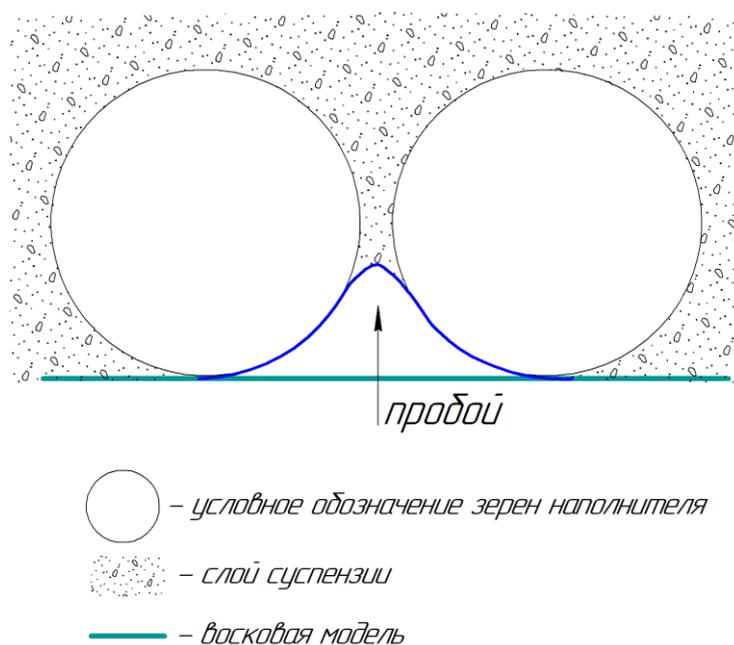


Рисунок 1.15 – Механизм образования пробоя

К дефектам поверхности отливки относится также появление просечек, заливов, наростов или обля (рисунок 1.16), которые, хоть и классифицируются отдельно по ГОСТ 19200–80 [69], но в ЛВМ имеют одну причину – разрушение керамической оболочки под действием различных факторов [21, 63]. В то же время, очевидно, что значимым фактором повышения прочности керамической оболочки является толщина слоя суспензии, которая отвечает за ее механические свойства. При уменьшении толщины слоя суспензии снижаются и механические свойства оболочки, провоцируя данную группу дефектов.



Рисунок 1.16 – Дефекты хрупкого разрушения керамической оболочки

Проведенный анализ формирования некоторых дефектов поверхности отливки показывает, что провоцирующим их фактором является толщина слоя суспензии, отличная от оптимальной. Толщина слоя суспензии является функцией ее вязкости и поверхностного натяжения.

## 1.4 Моделирование процесса литья для минимизации дефектов

Как уже было сказано ранее, качество и надежность литых деталей является приоритетным направлением для точного литья и для того чтобы обеспечить эти понятия, нужно приложить немало усилий. В связи с высокими темпами развития научно-технического прогресса в промышленности, сейчас трудно себе представить обеспечение повышенных показателей по качеству без систем компьютерного моделирования [71].

Золотым стандартом современного технологического процесса литейного производства является моделирование процессов затвердевания отливки с целью минимизации и предотвращения дефектов на итоговых отливках. Это помогает снизить финансовые и временные затраты цехов точного литья, т.к. отработка технологических процессов (элементы литниково-питающей системы и температурно-временные параметры) проходит в виртуальном пространстве, а не на реальных отливках, что очень немаловажно для точного литья, ввиду, достаточно высокой цены на используемые формовочные материалы.

При внедрении компьютерных технологий снижаются расходы, уменьшается трудоемкость проектирования и освоения производства новых сложных изделий. На 30–40 % уменьшаются расходы на подготовку технологической документации, также сокращаются сроки выпуска новых сложных изделий [72].

Для моделирования используется различное программное обеспечение. Сегодня в мире существует большое количество программ, одни из самых распространенных и известных специалистам литейного производства являются MagmaSoft, ProCast, SolidCast, WinCast, а также российские разработки – LVMFlow и «Полигон» [73].

Достоверность результатов моделирования зачастую стоит под большим вопросом, особенно, при применении новых огнеупорных наполнителей и связующих. Программы для моделирования поставляются со стандартными базами данных, которые довольно усреднены и не содержат необходимые данные о формовочных материалах, их составе и теплофизических свойствах. Поэтому, в настоящее время, несмотря на всеобщую компьютеризацию отечественных предприятий, проектирование и отработка технологий получения отливок методом ЛВМ нуждается в доработке и верификации данных [74].

Заявленные значения теплофизических параметров иногда вызывают сомнения, поскольку могут сильно отличаться по данным разных источников. Теплофизические характеристики материалов могут довольно существенно меняться, что сильно влияет на качество конечного продукта, особенно при точном литье. Материал керамических оболочек является мелкодисперсной смесью твердых непроводящих частиц с различными свойствами, поэтому теплофизические характеристики формы достаточно сложно прогнозировать [75].

Этапы моделирования включают в себя подготовку геометрии (3D-модель литейного блока и 3D-сетку), определение теплофизических свойств материалов, задание граничных условий (воспроизведение реального технологического процесса) [72].

Таким образом, можно утверждать, что для получения адекватного результата компьютерного моделирования процессов литья и затвердевания необходимо иметь достоверные данные о свойствах применяемых материалов, которые можно получить экспериментальным путем [74].

## Выводы к 1 главе

1. На основании анализа работы цехов точного литья был сделан вывод, что одними из самых распространенных дефектов в ЛВМ являются дефекты поверхности, а высокое качество поверхности отливок – это существенное преимущество ЛВМ перед другими видами литья.

2. На основании литературных данных проведен анализ современного состояния ЛВМ и показано, что в настоящее время для реализации этого процесса используется большое количество новых материалов для изготовления керамических оболочек.

*Целью диссертационной работы является изучение структурно-чувствительных свойств суспензии (вязкость и поверхностное натяжение), на основе которой изготавливается керамическая оболочка ЛВМ, для получения качественных отливок. Для реализации цели решаются следующие задачи:*

1. Изучить влияния размеров, фракционного состава, форм частиц огнеупорного наполнителя на вязкость и поверхностное натяжение суспензии ЛВМ, а также на коэффициент термического расширения и теплопроводность керамических оболочек;

2. Изучить процессы смачивания модельных составов и обсыпочно материала суспензиями на различных связующих;

3. Разработать рекомендаций для литейных цехов к оптимальным характеристикам суспензий.

## **2 СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СУСПЕНЗИИ**

### **2.1 Исследование вязкости суспензий ЛВМ**

#### **2.1.1 Основные закономерности вязкости суспензий ЛВМ**

Вязкость суспензий для точного литья во многом определяет свойства литейной формы и позволяет контролировать с достаточно высокой точностью рецептуру изготавливаемой керамической оболочки [1, 7, 21].

Значение вязкости связующих необходимо для расчета рецептуры керамических суспензий и показывает, какое количество наполнителя можно ввести в суспензию для получения требуемого качества поверхности отливок. В работах отмечается [51, 76], что вязкость является одним из наиболее важных показателей для литейных цехов, работающих по методу ЛВМ, из-за того, что вязкость суспензий напрямую связана с частотой возникновения дефектов.

Значение величины вязкости для суспензий ЛВМ, является довольно спорным вопросом среди исследователей [55, 77–80]. В некоторых работах считается, что вязкость должна быть достаточно низкой, другие придерживаются мнения о высокой вязкости суспензии. При создании керамической огнеупорной оболочки на модели очень важно получить равномерный слой суспензии, который формируется при окунании или обливании восковой модели. При низкой вязкости суспензия хорошо стекает с модели, слой получается равномерным и расход суспензии небольшой, однако в некоторых местах модели, таких как углы, выступающие части, тонкостенные элементы могут остаться непокрытыми, что впоследствии может привести к дефектам на отливках.

Если же восковая модель имеет довольно развитую поверхность, например, художественные отливки, то возникновение такого дефекта ослабит механические показатели оболочки, что может привести к последующей поломке при транспортировке и хранении.

Кроме того, при низкой вязкости суспензии контактный слой будет достаточно тонким и при обсыпке огнеупорным наполнителем может возникнуть пробой керамической оболочки, который приведет к последующей повышенной шероховатости поверхности.

Высокая вязкость суспензии способствует возникновению на поверхности восковой модели достаточно толстого слоя, и при извлечении модельного блока из бака будет происходить медленное стекание суспензии. В результате на поверхности модели могут возникнуть разнотолщинность слоя суспензии, а также волнистая поверхность, что может привести к неравномерному высыханию слоя керамической оболочки, что, в свою очередь, может увеличить шансы к появлению растрескивания оболочки.

Для изучения вязкости суспензий используются различные формулы, расчеты по которым во многих случаях заметно отличаются от экспериментальных данных. Это связано с тем, что реологические свойства суспензий зависят от большого количества факторов: жидкая фаза, химический состав огнеупорного наполнителя, размер и конфигурация частиц, температура, поверхностные свойства жидкой фазы, электрохимические процессы, протекающие на поверхности частиц и жидкой фазы и многие другие. Учесть все эти факторы затруднительно, поэтому авторы строят приближенные модели и закладывают значительные упрощения для описания вязкости суспензии.

Наиболее простой моделью, полученной с большим количеством допущений, является модель Эйнштейна, которая удовлетворительно в некоторых случаях описывает суспензию с низким содержанием твердой

фазы при условии, что твердые частицы одинаковы и имеют шарообразную форму [81–83].

При значительном отклонении частиц от шарообразной формы может происходить их спиновое движение, которое также приведет к увеличению вязкости [83]. По мере увеличения твердой фазы в жидкости, вязкость не подчиняется уравнению Эйнштейна, т.к. происходит взаимодействие частиц друг с другом, приводящее к заметному увеличению вязкости.

Таким образом, суспензия, используемая в литейном производстве, в большинстве своём является неньютоновской жидкостью, описываемая более сложными законами, требующими учитывать взаимодействие частиц наполнителя, их форму и сложную траекторию движения.

Однако определение коэффициента вязкости жидкостей имеет большое практическое значение для разных сфер, например, нефтеперерабатывающая промышленность, медицина, строительство (использование лакокрасочных материалов). В связи с этим существует большое количество методов определения коэффициента вязкости [81, 84].

Абсолютное измерение вязкости гарантируют капиллярный, ротационный методы и метод падающего шарика [84]. В остальных случаях необходимо прибегать к помощи калибровочных жидкостей с известными значениями вязкости. Приборы для измерения вязкости называются вискозиметрами. По принципу действия наиболее распространены такие вискозиметры, как капиллярные, ротационные и вискозиметры с движущимся шариком. Следовательно, измерение вязкости основано на трех принципах.

Первый вид вискозиметров работает по принципу сдвига жидкости между концентрическими цилиндрами, конусообразными и параллельными пластинами (ротационный вискозиметр). Измерение

проводят в различных условиях сдвига и определяют кажущуюся вязкость [84].

Вискозиметры Брукфилда – это ротационные вискозиметры, принцип работы которых основан на измерении закручивания калиброванной пружины при вращении шпинделя (цилиндра и др.) в тестируемой жидкости с постоянной скоростью [85]. Динамическая вязкость может быть измерена по движению шарика в вертикальной или наклоненной, заполненной жидкостью цилиндрической трубке, т.е. это вискозиметры, основанные на классическом методе Стокса, где измеряется скорость, с которой шарик из известного материала падает в вязкой среде.

Данный метод хорошо применим для прозрачных вязких жидкостей. Однако при использовании этого метода возникают трудности, связанные с непрозрачностью суспензии для ЛВМ. Кроме того, суспензия, содержащая мелкодисперсные частицы огнеупорного наполнителя, которые, согласно Стоксу, со временем оседают из-за явления седиментации. Значит без постоянного помешивания суспензия в процессе исследований будет расслаиваться, что приведет к погрешности измерения. Таким образом, встает вопрос о взаимодействии частиц суспензии и прибора, т.е. шарика. Возможно, будет иметь место слабое взаимодействие из-за адсорбции дисперсных частиц на шарике, что приведёт к созданию шероховатости шарика и изменению обтекающего шарик потока.

Третий принцип основан на протекании жидкости через капилляр под действием силы тяжести (капиллярный вискозиметр или чашечный вискозиметр) [82]. Для исследования непрозрачных вязких жидкостей оптимальны измерения по относительной шкале методом капиллярного течения (метод Стокса). Капиллярный метод основан на формуле Пуазейля и заключается в измерении времени протекания через капилляр жидкости

известной массы под действием силы тяжести при определенном перепаде давлений [86] (2.1):

$$V = \frac{\pi r^4 P}{8\eta l} t, \quad (2.1)$$

где  $V$  – объем жидкости, вытекающей из капилляра за время  $t$ ;  
 $P$  – давление, под действием которого жидкость течет;  $r$  – радиус капилляра;  
 $l$  – длина капилляра.

Одной из разновидностей метода является измерение с помощью проточного чашечного вискозиметра различных модификаций, при измерении которой не важна прозрачность жидкости. Чаще всего эти вискозиметры изготавливаются в трех модификациях – ВЗ–246, ВЗ–DIN, ВЗ–FORD, которые отличаются друг от друга метрологическими и техническими характеристиками, конструктивными исполнениями и комплектацией.

В большинстве стран вязкость суспензии определяют по времени истечения суспензии из воронки Форда модификации ВЗ–4 (рисунок 2.1) [87]. Главным преимуществом является то, что измерение при помощи проточного чашечного вискозиметра проводится достаточно быстро, что предупреждает оседание твёрдых частиц наполнителя в суспензии.

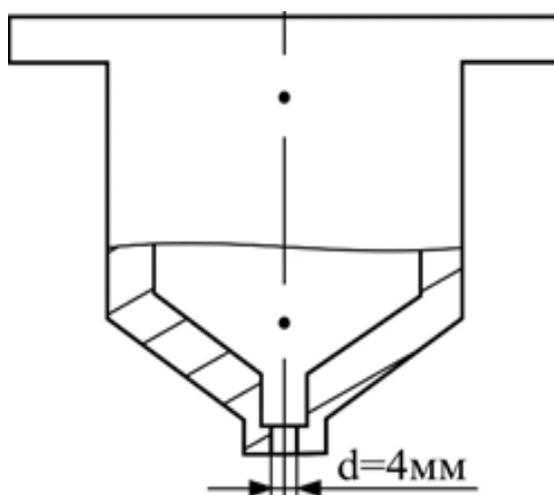


Рисунок 2.1 – Проточный чашечный вискозиметр

Воронка ВЗ–4 является оптимальной для применения в литейных цехах, т.к. имеет необходимую точность в отличие от воронок с большим диаметром сопла (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Оптимальное время истечения из вискозиметров типа ВЗ–1 и типа ВЗ–246 с различным диаметром сопла и вискозиметра ВЗ–4 [88]

Тип вискозиметра	Диаметр сопла вискозиметра, мм	Оптимальный диапазон времени истечения, с
ВЗ–1	2,5	12–150
	5,4	5–200
ВЗ–246	2	70–300
	4	12–200
	6	20–200
ВЗ–4	4	12–200

Для исследования были взяты разные связующие, а также плавленный кварц, в качестве, огнеупорного наполнителя, разных марок, представленных на российском рынке: ООО «Родонит» (г. Санкт-Петербург), ООО «Кефрон» (г. Екатеринбург), ОАО «ДИНУР» (г. Первоуральск).

На рисунке 2.2 представлены результаты измерений вязкости суспензии на основе ГС–20 и плавленного кварца разных фирм-производителей. Как видно из графика, для получения одно и того же показателя вязкости суспензии, необходимо использовать разное количество огнеупорного наполнителя. Например, что для получения вязкости суспензии в 40 с, нужно добавить  $m_1 = 590$  г плавленного кварца фирмы ООО «Родонит» и  $m_2 = 970$  г – ОАО «ДИНУР», т.е. разница практически в два раза, что в рамках производства довольно принципиально.

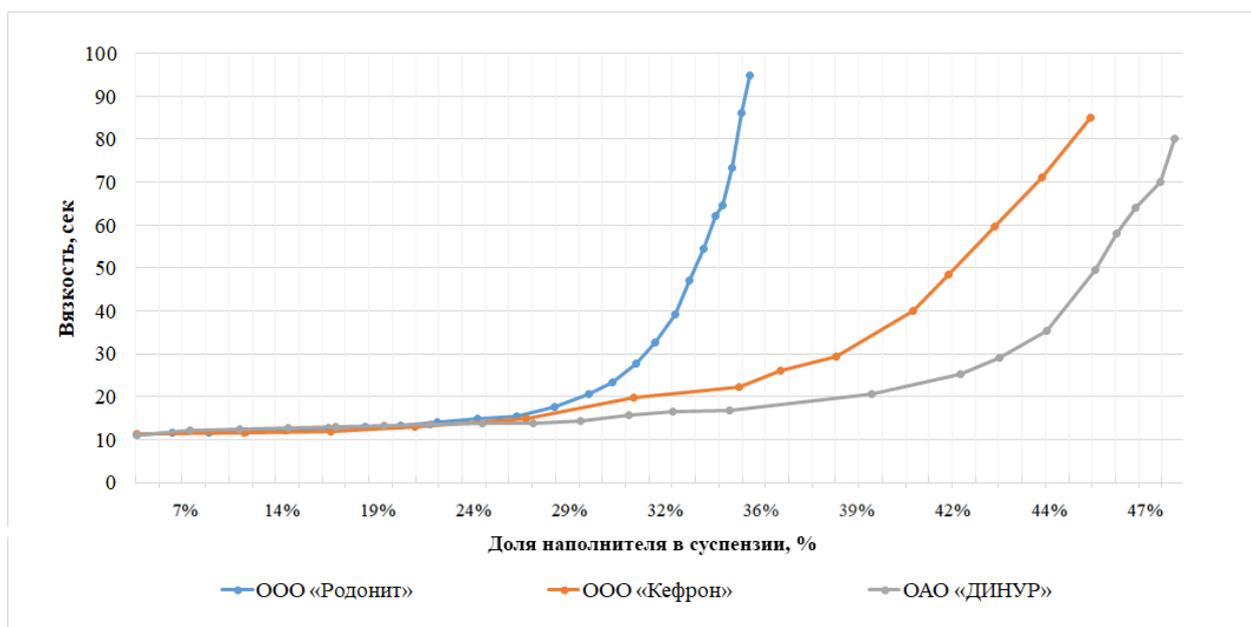


Рисунок 2.2 – Влияние массовой доли наполнителя на вязкость суспензии на ГС–20

Как видно из рисунка 2.2 график вязкости имеет сложный вид, который можно представить, как сумму линейной и экспоненциальной функции. Это значит, что при введении твёрдой фазы в связующее, вязкость будет резко расти после достижения определённой концентрации. При введении в ГС–20 частиц плавленного кварца различных производителей до 25 % вязкость суспензий практически не отличается и достаточно хорошо описывается уравнением Эйнштейна [83, 89]:

$$\mu = \mu_0(1 + k\varphi), \quad (2.2)$$

где  $\mu$  – вязкость системы;  $\mu_0$  – вязкость чистого растворителя;  $k$  – коэффициент, характеризующий форму частиц;  $\varphi$  – объёмная доля частиц дисперсной фазы.

Из уравнения (2.2) видно, что одной из определяющих характеристик для дисперсной системы, которая используется, как огнеупорный наполнитель для суспензии является форма частиц. Этот коэффициент был определен в диапазоне от 1 до 2,5.

При использовании уравнения (2.2), зная количество вводимых частиц, невозможно точно предсказать вязкость получаемой суспензии, если концентрация твёрдых частиц превышает 25 %.

Если обратиться к рисунку 2.2, прослеживается, что все линии графика независимо от того, какой используется наполнитель для суспензии, принимают экспоненциальный вид в диапазоне концентрации твёрдой фазы от 30 до 35 %. Это значит, что уравнение Эйнштейна может описать только линейный участок роста вязкости при достаточно произвольном подборе коэффициента  $k$ , который может значительно превышать, предложенный Эйнштейном диапазон изменения коэффициента  $k$  от 1 до 2,5. Возможно, это связано с тем, что частицы, находящиеся в связующем расположены достаточно свободно и не оказывают влияния друг на друга.

В работе Дж. Хаппеля [83] рассматривается вопрос влияния формы частицы, выступающей в роли наполнителя для суспензий, более детально. В связи с этим Джеффри вывел уравнение (2.3), которое во многом схоже с уравнением Эйнштейна (2.2), но все частицы интерпретируются в виде сфероидов.

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + v\varphi, \quad (2.3)$$

где  $v$  – множитель, зависящий от геометрии сфероида.

Диапазон значений данного коэффициента определяется исходя из эллиптичности частицы. Значение эллиптичности рассчитывается согласно уравнению (2.4):

$$\varepsilon = (a - b)/a, \quad (2.4)$$

где  $a$  – наибольший диаметр;  $b$  – наименьший диаметр.

Таблица 2.1 – Константа вязкости  $\nu$  для вытянутых сфероидов [83]

Эллиптичность $\varepsilon = (a - b)/a$	Значение константы вязкости $\nu$	
	Минимальное	Максимальное
0	2,5	2,5
0,1	2,431	2,540
0,2	2,361	2,586
0,3	2,295	2,645
0,4	2,232	2,719
0,5	2,174	2,819
0,6	2,120	2,958
0,7	2,073	3,170
0,8	2,035	3,548
0,9	2,010	4,485
1,0	2,000	$\infty$

Таблица 2.2 – Константа вязкости  $\nu$  для сплюснутых сфероидов [83]

Эллиптичность $\varepsilon = (a - b)/a$	Значение константы вязкости $\nu$	
	Минимальное	Максимальное
0	2,5	2,5
0,1	2,464	2,582
0,2	2,426	2,683
0,3	2,388	2,818
0,4	2,348	3,003
0,5	2,306	3,267
0,6	2,262	3,670
0,7	2,216	4,354
0,8	2,168	5,744
0,9	2,116	9,960
1,0	2,061	$\infty$

Как видно по диапазону значений, приведённых в таблицах 2.1 и 2.2 для константы вязкости  $\nu$ , чем больше частица напоминает лист или иглу, тем сильнее разброс значений, а это значит, что если реальные частицы отличны от формы сферы, то расчёты будут неточными и иметь лишь приблизительный характер. Поэтому Дж. Хаппелем был предложен другой

вариант уравнения, где кроме формы частиц играет роль и характер их взаимодействия [83] (2.4):

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + 5,5\varphi\psi, \quad (2.5)$$

где  $\psi$  – фактор взаимодействия.

Уравнение (2.5) схоже с предыдущими (2.2 – 2.3), но теперь определяющим фактором является характер взаимодействия частиц, который, в свою очередь, определяется объёмом вводимых твердых частиц в суспензию, что представлено в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Зависимость вязкости суспензии от концентрации – модель свободной поверхности [83]

Объёмная концентрация твёрдой фазы, $\varphi$	Фактор взаимодействия, $\psi$	Относительная вязкость, $\mu/\mu_0$
0	1,000	1,000
0,05	1,022	1,281
0,10	1,100	1,605
0,15	1,208	1,997
0,20	1,351	2,486
0,25	1,538	3,115
0,30	1,783	3,942
0,35	2,110	5,062
0,40	2,555	6,621
0,45	3,176	8,861
0,50	4,071	12,20

Исходя из трёх представленных подходов к составлению уравнений, используемых для описания вязкости суспензий, можно сделать вывод, что все они имеют один общий принцип – это сложение сопротивлений, которые могут возникнуть в потоке.

Из графика 2.2 видно, что первоначально суспензии с наполнителями разных фирм до 25 % описываются с помощью уравнения Эйнштейна (2.2) и практически сливаются друг с другом. Это свидетельствует о том, что данный подход не рассчитан на взаимодействие между частицами. Для описания вязкости системы больше всего подходит уравнение Дж. Хаппеля (2.5).

Также был проведён анализ формы частиц огнеупорных наполнителей, используемых при создании суспензий ЛВМ, с помощью электронного растрового микроскопа высокого разрешения «Scios 2 LoVac» фирмы «Termo Fisher» (рисунок 2.3 – 2.5).

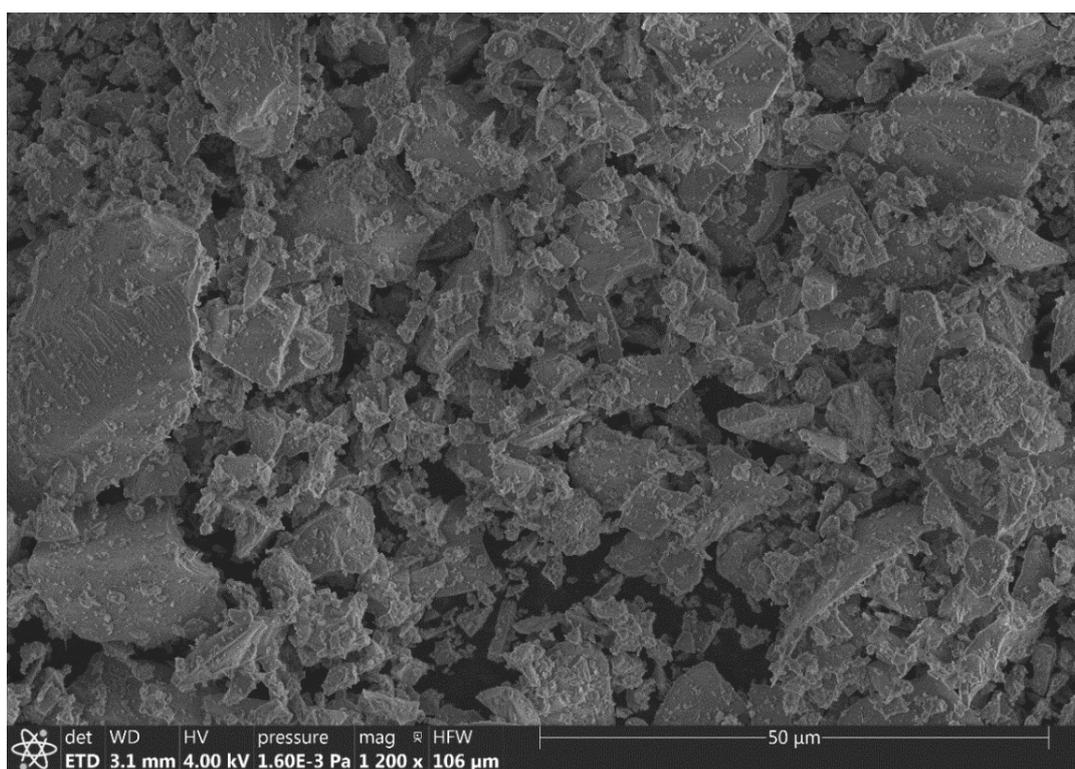


Рисунок 2.3 – Микрофотография плавленого кварца ООО «Родонит»

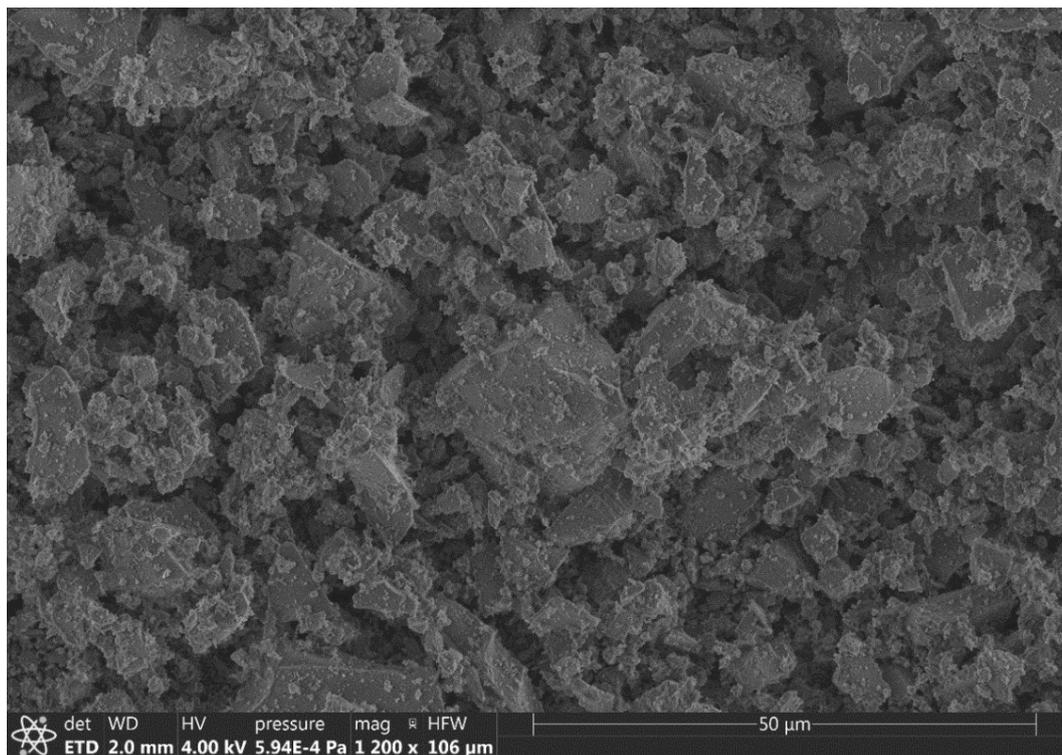


Рисунок 2.4 – Микрофотография плавленого кварца ООО «Кефрон»

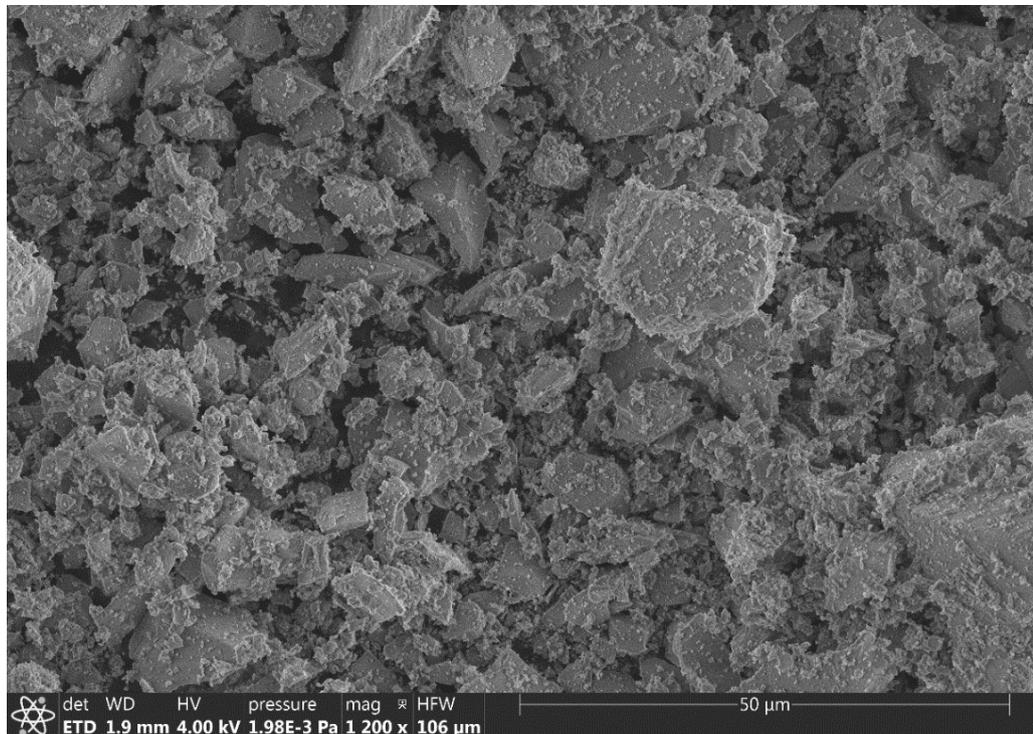


Рисунок 2.5 – Микрофотография плавленого кварца ОАО «ДИНУР»

Как видно на рисунках 2.3 – 2.5, частицы плавленного кварца довольно далеки от сферической формы, можно проследить, что частицы сильно отличаются по форме друг от друга и прослеживается их агломерация. Из этого можно сделать вывод, что уравнения Эйнштейна (2.2) и Джеффри (2.3) не подходят для реальных задач литейных производств.

Эксперименты для определения оптимального уровня вязкости суспензии для получения равномерного покрытия восковой модели проводились на образцах из модельного состава ПС 50–50 и связующего ГС–20. Порошки использовались из плавленного кварца различных производителей: ООО «Родонит», ООО «Кефрон» и ОАО «ДИНУР». Вязкость суспензии варьировалась от 20 до 80 с. После чего образец извлекался, проводилась сушка в аммиачном шкафу, и визуально оценивалось качество покрытия (рисунок 2.6).

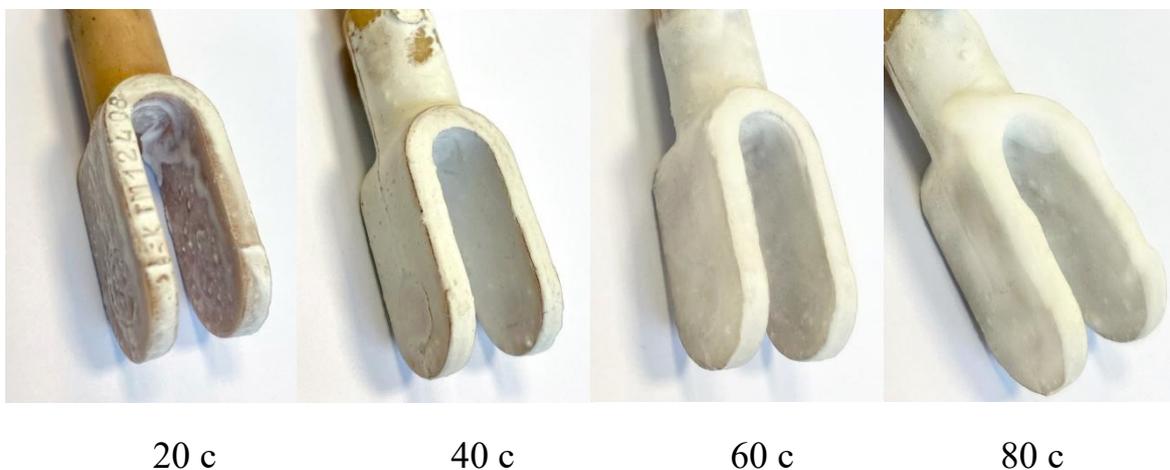


Рисунок 2.6 – Влияние вязкости суспензии на однородность лицевого слоя

Для всех производителей огнеупорных наполнителей результаты экспериментов близки друг к другу, поэтому данные обобщены и представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Влияние вязкости суспензии на качество первого слоя покрытия

Вязкость, с	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Качество покрытия модели суспензией	Видимое утоньшение покрытия и оголение ребер восковой модели	Утоньшение покрытия	Покрытие без заметных дефектов			Неравномерное покрытие		Неравномерное покрытие и появление волн и наплывов	

Проведенные опыты показали, что качество поверхности отливок получается качественным при использовании суспензий с вязкостью в диапазоне 40–60 с. Кроме того, формы имеют наибольшую прочность, именно, в этом диапазоне вязкости.

После проведения комплекса исследований можно утверждать, что на параметр вязкости суспензии влияет разнообразная система факторов, от суммарной площади поверхности частиц, их формы и размера, до характера взаимодействия частиц в связующем при различной концентрации. Исходя из представленных данных, можно сделать вывод, что для того чтобы добиться оптимальной вязкости суспензии для разных фирм-производителей огнеупорных наполнителей, необходимо использовать свой рецепт. В связи с этим будут меняться как механические, так и теплофизические свойства полученных керамических оболочек. Было выявлено, что оптимальной является вязкость, составляющая от 40 до 60 с.

### 2.1.2 Вязкость суспензий на основе огнеупоров ОАО «ДИНУР»

В связи с тем, что поставляемые в Россию огнеупорные наполнители фирм ООО «Родонит» и ООО «Кефрон», производятся за рубежом, их

поставки в последнее время становятся затруднительными. Поэтому огнеупоры, производимые на ОАО «ДИНУР» (г. Первоуральск) становятся более доступными, а в некоторых случаях и безальтернативными, поэтому требуют более пристального изучения.

Зачастую рецепты приготовления суспензии, которые были отработаны на привычных фирмах ООО «Кефрон» и ООО «Родонит» не работают на огнеупорных наполнителях фирмы ОАО «ДИНУР». Для того чтобы выяснить какой материал больше подходит для ЛВМ совместно с технологами компании ОАО «ДИНУР» была проведена работа по подбору гранулометрического состава и форм частиц плавленного кварца, используемого в качестве огнеупорного наполнителя суспензий ЛВМ.

Исходной точкой был выбран огнеупорный наполнитель, поставляемый компанией для приготовления суспензий ЛВМ. Первоначально был проведен анализ гранулометрического состава данного порошка с помощью лазерного анализатора размеров частиц «Shimadzu SALD 2201», представленного на рисунке 2.7, методом лазерной дифракции в режиме «мокрого» измерения [90]. Также была исследована и форма частиц на растровом микроскопе высокого разрешения.



Рисунок 2.7 – Лазерный дифракционный анализатор Shimadzu SALD 2201

В основе метода лежит измерение интенсивности рассеянного света при прохождении луча лазера через образцы. Рассеивание света зависит от размера частиц: от больших частиц он идет, в основном, во фронтальном направлении, а с уменьшением размера частиц все больше света рассеивается в боковом и обратном направлениях [90].

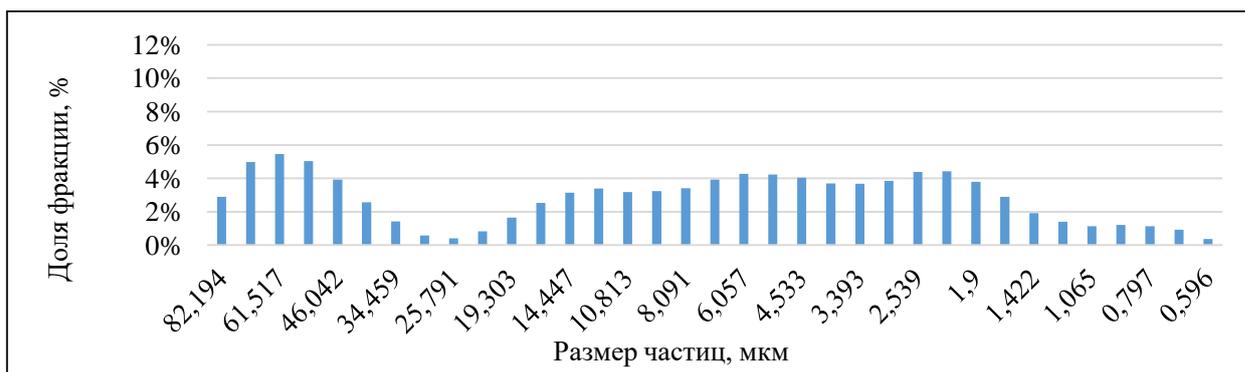
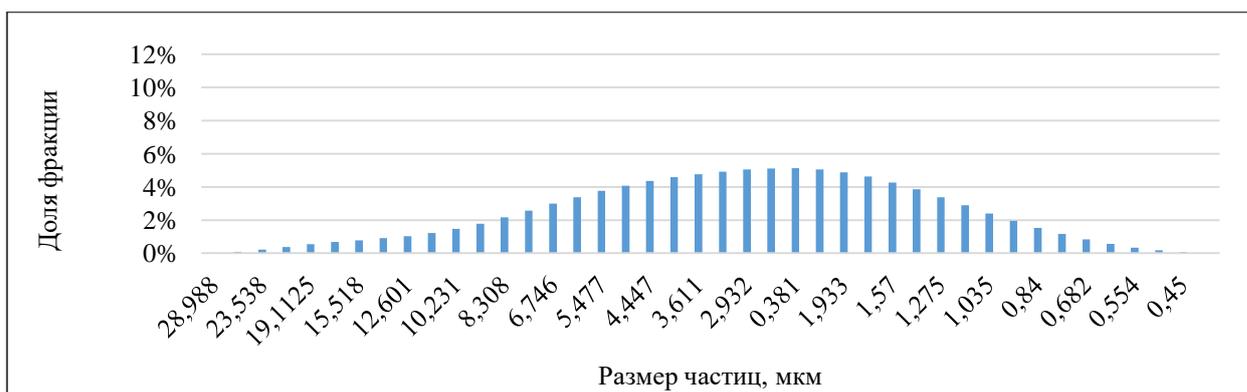
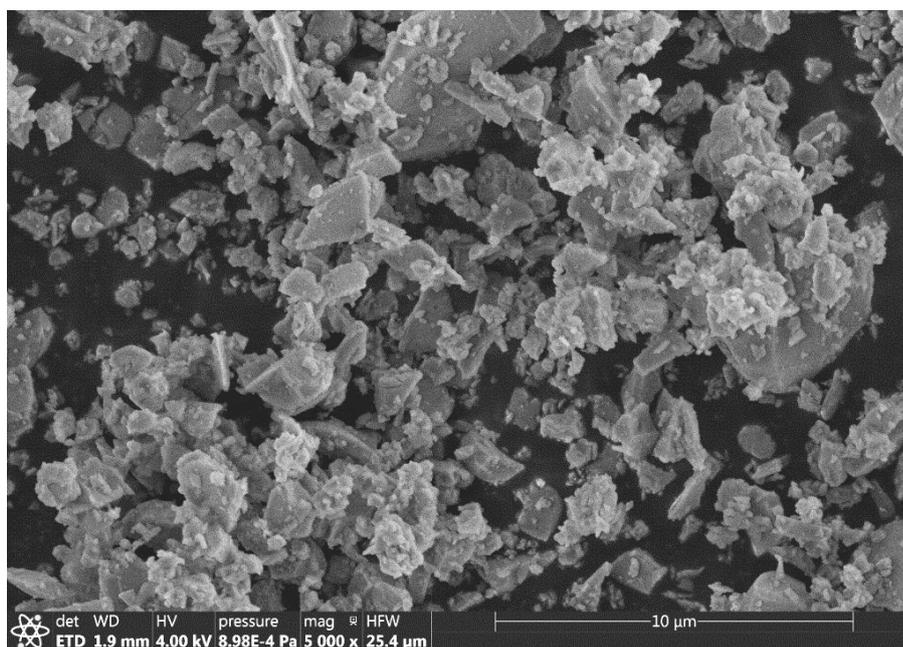


Рисунок 2.8 – Гранулометрический состав исходного порошка компании ОАО «ДИНУР»

При анализе гранулометрического состава наполнителя компании ОАО «ДИНУР» видна некоторая неоднородность помола (рисунок 2.8), поэтому нами самостоятельно с помощью шаровой мельницы с керамическими помольными телами в течение 5 ч был произведён перемол фракции с целью получить однородный состав с нормальным распределением частиц по фракции (рисунок 2.9).



а

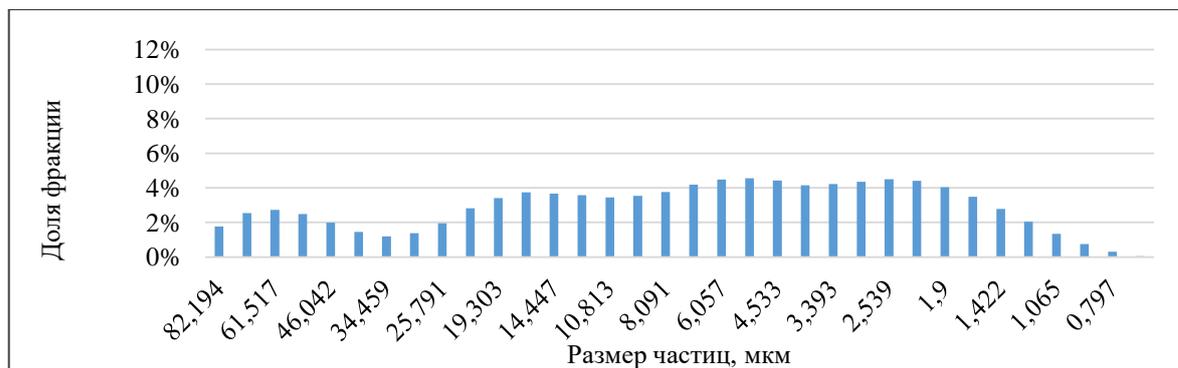


б

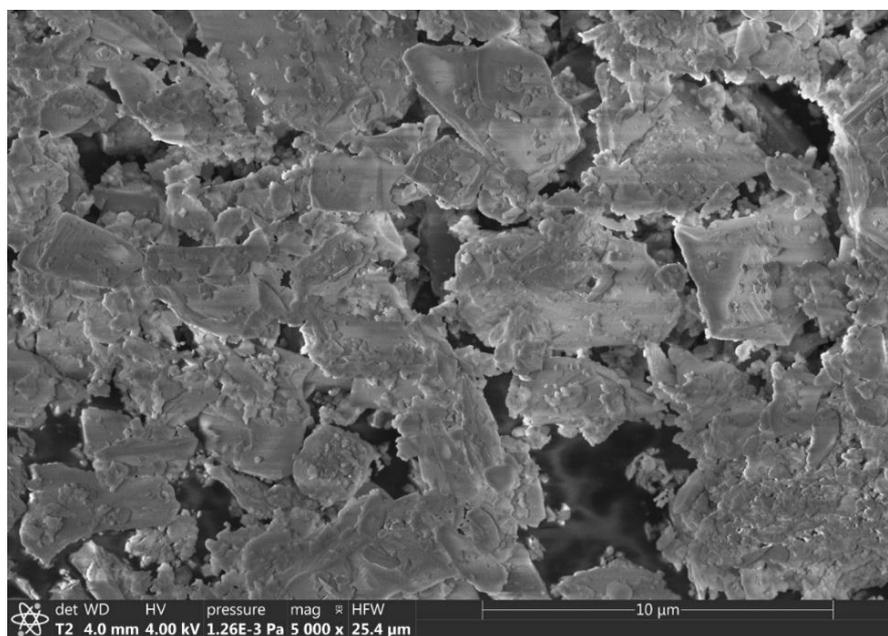
Рисунок 2.9 – Технологические характеристики порошка компании ОАО «ДИНУР», полученного в результате перемола исходного сырья:  
а – гранулометрический состав, б – микрофотография частиц

Также от предприятия были получены различные партии порошка, помолотые по двум технологиям, представленных на рисунках 2.10 – 2.11. Перемол для ОАО «ДИНУР» №1 проводился в течении 6 ч, для наполнителя №2 перемол проводился 6,5 ч с добавлением олеиновой кислоты. Для получения более полной картины была исследована форма

частиц на растровом микроскопе. Данные порошки были использованы в эксперименте по вязкости рисунок 2.41.

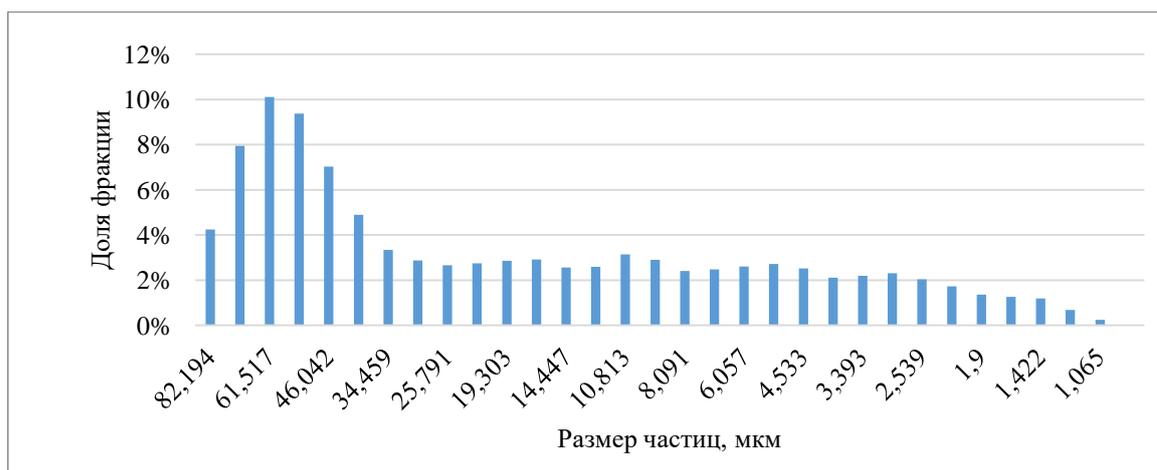


а

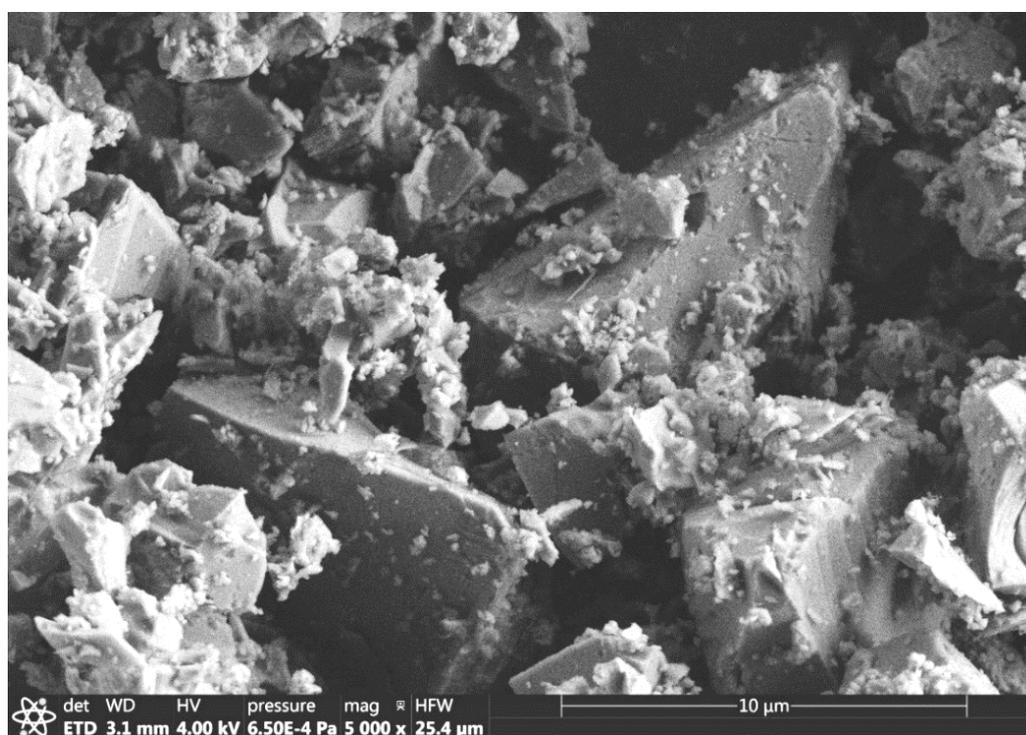


б

Рисунок 2.10 – Технологические характеристики порошка компании ОАО «ДИНУР» помолотого по технологии № 1: а – гранулометрический состав, б – микрофотография частиц



а



б

Рисунок 2.11 – Технологические характеристики порошка компании ОАО «ДИНУР» помолотого по технологии № 2: а – гранулометрический состав, б – микрофотография частиц

Для того чтобы получить данные по расходу наполнителей фирмы ОАО «ДИНУР», был проведен ряд экспериментов по получению

суспензии оптимальной вязкости в 40–60 с для получения равномерного слоя на восковой модели. Данные представлены на рисунке 2.12.

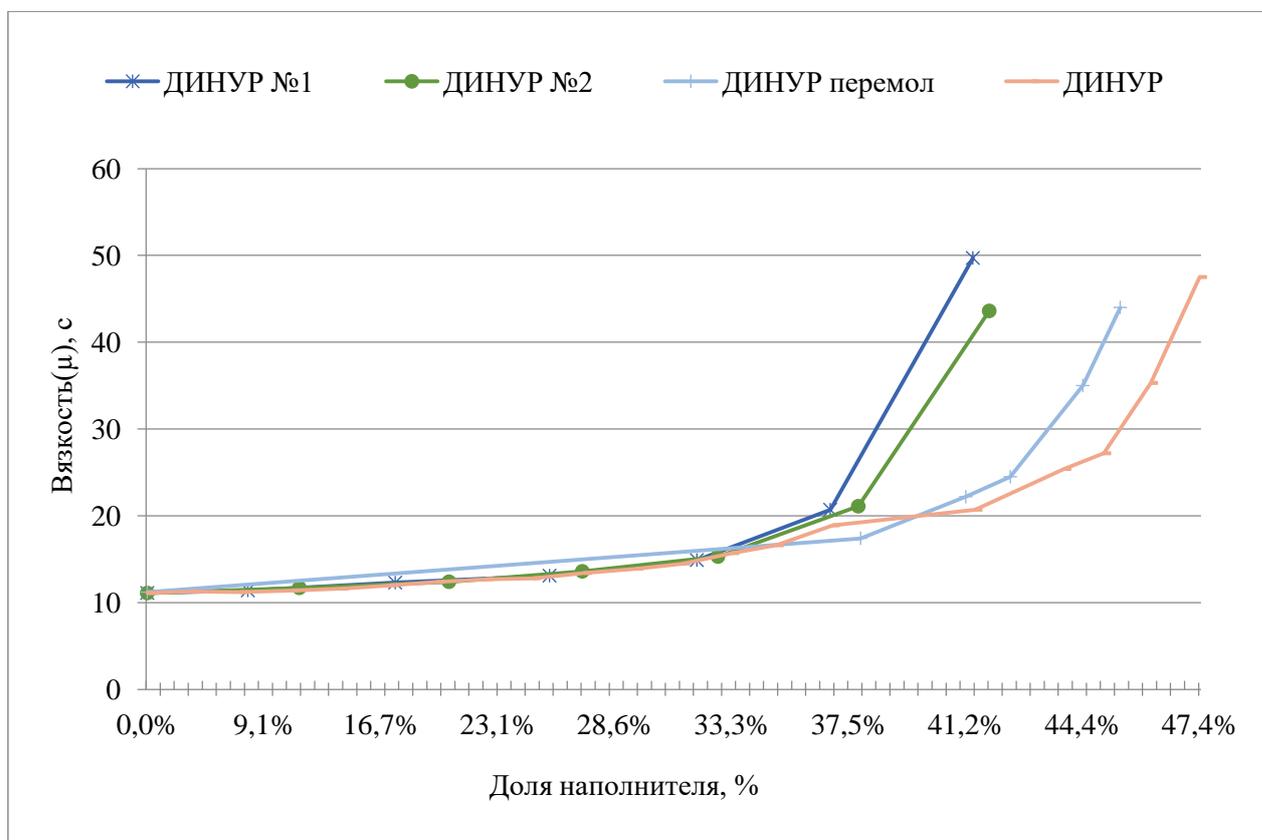


Рисунок 2.12 – Влияние доли огнеупорного наполнителя производства ОАО «ДИНУР» на вязкость суспензии

Как видно из графика на рисунке 2.12 для получения рабочей вязкости нужно разное количество огнеупорного наполнителя, что является довольно важным экономическим фактором. Например, исходный наполнитель гранулометрический состав которого представлен на рисунке 2.8, набирает вязкость медленнее всего и требует наибольшего количества частиц, вводимых в суспензию, это связано с тем, что есть перегиб нормали распределения. По гранулометрическому составу можно проследить, что при наличии относительно невысокого содержания крупной фракции, есть большое количество мелкой фракции, которая мешает набору вязкости.

Следующим для сравнения взят наполнитель, перемолотый в шаровой мельнице (рисунок 2.9), он набирает вязкость чуть быстрее, чем исходный порошок. Керамическая оболочковая форма, которая получается с использованием этого наполнителя, очень хрупкая. Как можно увидеть на рисунке 2.13 данная керамическая оболочка имеет большое количество мелких трещин, т.к. мелкая фракция является своеобразным концентратором напряжений.



Рисунок 2.13 – Керамическая оболочка на основе наполнителя  
ООО «ДИНУР» (перемол)

Два наполнителя, полученные от предприятия ОАО «ДИНУР» также были использованы в исследованиях по набору вязкости на рисунке 2.12. Оба этих варианта набирают вязкость быстрее, чем предыдущие. Наполнитель перемолотый по технологии № 1 показывает чуть более лучшие свойства из-за формы частиц, похожих на чешую, второй же вариант показал низкую прочность оболочки и склонность к образованию трещин из-за наличия большого количества крупной фракции и «пылевидного хвоста» из мелкой фракции.

Ранее в исследовании было описано, как с помощью уравнений можно предсказывать вязкость суспензий в зависимости от количества твёрдых частиц, но все методы были привязаны к форме частиц или же определялись характером взаимодействия. Был проведён ряд экспериментов, направленных на изучение скорости набора вязкости суспензий на основе ГС–20, но с различными наполнителями. Результаты приведены на рисунке 2.14.

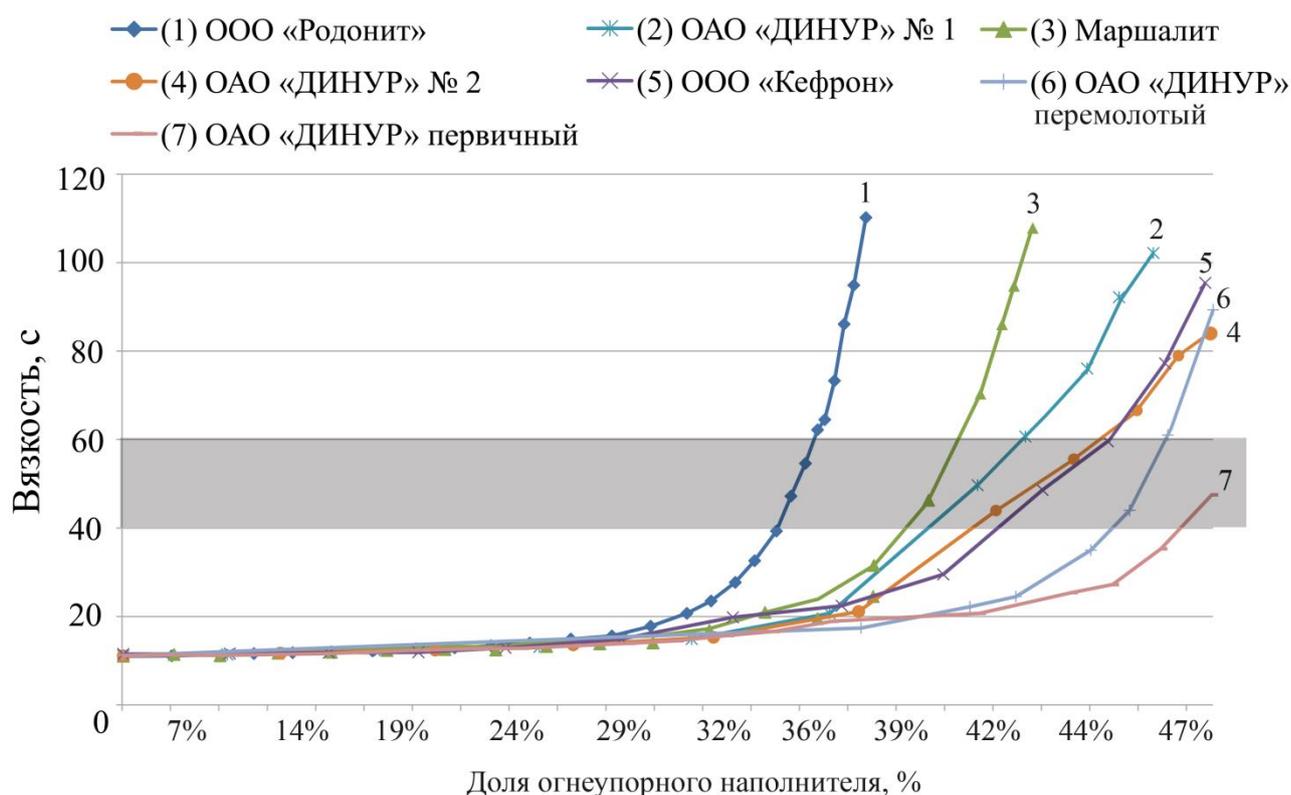


Рисунок 2.14 – Влияние доли огнеупорных наполнителей разных производителей на вязкость суспензии

Поскольку на вязкость суспензии оказывает влияние: количество частиц, форма частиц и характер взаимодействия между частицами. Для того чтобы определить, чем отличаются огнеупорные наполнители для суспензий разных поставщиков, были дополнительно проведены

исследования гранулометрического состава порошков фирм ООО «Родонит» (рисунок 2.15) и ООО «Кефрон» (рисунок 2.16).



Рисунок 2.15 – Гранулометрический состав наполнителя фирмы ООО «Родонит»

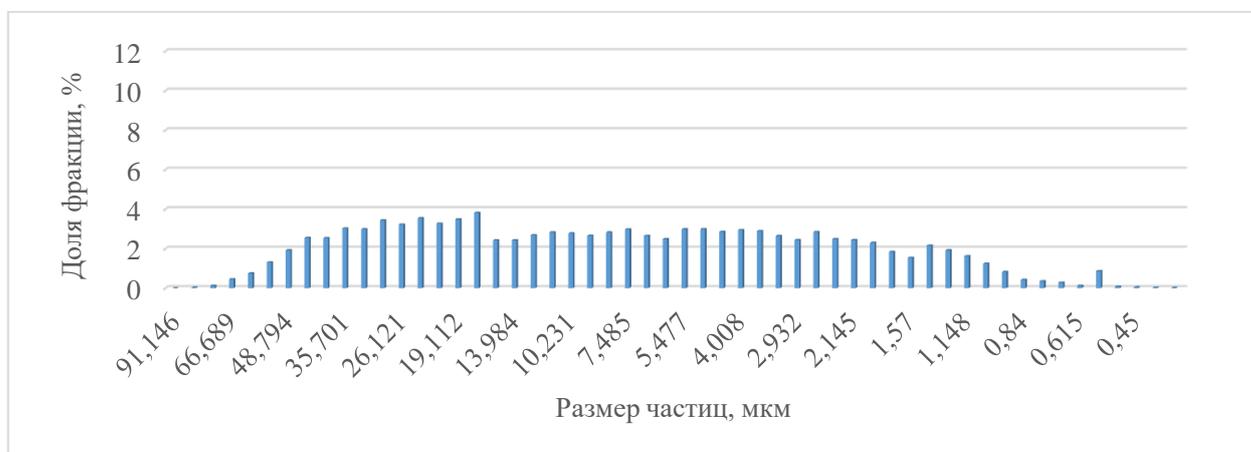


Рисунок 2.16 – Гранулометрический состав наполнителя фирмы ООО «Кефрон»

Для сравнения были взяты графики набора вязкости огнеупорных наполнителей фирмы ООО «Родонит» (рисунок 2.15) и фирмы ОАО «ДИНУР» по технологии №1 (рисунок 2.10), как видно из рисунка 2.14 суспензия на наполнителе фирмы ООО «Родонит» выходит на

рабочую вязкость в 40 с при добавлении  $264 \text{ см}^3$ , а – ОАО «ДИНУР» только при  $440 \text{ см}^3$  при постоянном объёме связующего. Такая разница при переводе на промышленный масштаб является существенной, особенно если принять во внимание различные помолы от партии к партии. Таким образом, практически невозможно рассчитать количество необходимых материалов, и требуется постоянная корректировка на месте.

Также нужно принимать во внимание и форму частиц плавленого кварца. Как видно из рисунков 2.5 и 2.7, не приходится говорить об округлой форме частиц, но наблюдается явное отличие у порошков фирмы ООО «Родонит» и ОАО «ДИНУР». В порошке от ОАО «ДИНУР», по-видимому, из-за отсутствия плавного перехода между основным фракционным составом и большим количеством пылевидной фракции (менее 5 мкм), наблюдается явление агломерации. Если принять во внимание, что связующее для суспензии представляет собой коллоидный раствор или кремнезольную кислоту с определённым размером частиц, то можно сделать предположение, что для набора вязкости, частицы в порошке должны иметь плавный переход по размеру и не иметь большого количества пылевидной фракции.

Но путём уменьшения размера частиц, увеличивается их количество, тем самым и обеспечивается вязкость суспензии. В данном порошке, представленном на рисунке 2.9, также наблюдается агломерация и осколочная форма частиц. На основании данных гранулометрического состава (рисунок 2.9) можно сделать предположение, что размер фракции не является определяющим при наборе вязкости в суспензии, а более важным является характер взаимодействия между частицами твёрдой фазы. Наличие большого количества контактов между частицами, т. е. агломерация, затрудняет набор вязкости суспензией и приводит к большему расходу порошка для создания необходимой вязкости. Частицы же более мелкой фракции, налипшие на крупные, не вносят большого

вклада в вязкость суспензии, т.к. воспринимаются, как одна частица с развитой поверхностью. Данные по гранулометрическому составу и доли наполнителя в суспензии были сведены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Свойства различных огнеупорных наполнителей

	Огнеупорные наполнители					
	ООО «Родонит»	ООО «Кефрон»	ОАО «ДИНУР»	Перемол ОАО «ДИНУР»	ОАО «ДИНУР» №1	ОАО «ДИНУР» №2
Средний размер частиц без пылевидной фракции (менее 5 мкм), мкм	15,58	23,58	32,78	8,54	51,87	53,45
Доля пылевидной фракции (менее 5 мкм), %	15	20	50	60	40	30
Форма частиц	Оскольчатая	Оскольчатая	Оскольчатая	Оскольчатая	Плоская	Оскольчатая
Доля наполнителя суспензии для достижения вязкости 40 сек	34	42	47,4	45	40	38,5

Исходя из таблицы 2.5 можно сделать вывод, что при наличии большого количества пылевидной фракции расход огнеупорного наполнителя будет только возрастать.

Для суспензии ЛВМ в качестве наполнителя, с целью получить желаемую вязкость при наименьшем расходе, нужно использовать наполнитель с гранулометрическим составом, равномерно

распределённым и не имеющим большого количества пылевидной фракции размером менее 5 мкм. Получение суспензии при наименьшем расходе порошка для придания суспензии нужной вязкости, это не только попытка экономии, но и уменьшение доли брака по вине оболочковой формы.

## **2.2 Смачивание и растекание суспензий ЛВМ по восковым моделям**

В большинстве работ, посвященных методу ЛВМ [59, 76, 91, 92], отмечается, что качество поверхности отливок, в первую очередь, зависит от смачивания восковых моделей суспензиями.

Если процессы смачивания твердых тел различными жидкостями, включая жидкие металлы, изучались на протяжении многих лет достаточно подробно [93–98], то процессы смачивания суспензиями изучены очень слабо. Также это связано и с тем, что за последнее время на рынке появилось большое количество разных фирм-производителей, как восковых модельных составов, так и связующих. Известны немногочисленные работы, посвящённые смачиванию восковых моделей [76, 99].

Зачастую значение краевых углов смачивания во многом зависит от способов их измерения. Существует несколько методов определения равновесного краевого угла смачивания. Они делятся на несколько подгрупп:

1. статические методы: непосредственное измерение краевого угла по фотографии, расчет краевого угла по форме капли;
2. динамические методы: измерение краевого угла в процессе растекания жидкости по твердой поверхности [100].

Чаще всего краевой угол измеряют статическими методами, а именно, методом лежащей капли [101–102], когда каплю жидкости помещают на горизонтальную твердую поверхность, фотографируют и по профилю капли определяют краевой угол. Именно этим методом чаще всего измеряют краевой угол смачивания для суспензий ЛВМ.

Следует отметить, что метод лежащей капли можно использовать, когда не происходит химического взаимодействия между твёрдым телом и жидкостью, а также деформации подложки под действием сил поверхностного натяжения, приводящая к заметному отличию видимого на фотографии краевого угла смачивания от реального угла. Для того чтобы избежать этого эффекта краевые углы смачивания изучаются в процессе растекания жидкости после окончания течения в кинетическом режиме и начале течения в вязком или инерционном режиме [103].

Некоторые исследователи для определения смачивания и растекания используют метод падающей капли [104]. Необходимо отметить, что, применяя метод падающей капли, исследователи не учитывали расплющивание последней при падении на подложку, приводящее к искажению начальных значений скорости растекания и краевого угла. При падении капли с высоты  $h$  частицы жидкости приобретают составляющую скорости вдоль поверхности твердого тела (2.6):

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} = \sqrt{2gh} = \frac{2rdr}{2ad\tau}, \quad (2.6)$$

где  $a$  и  $r$  – радиусы капли и пятна смачивания.

Например, при  $h = 1$  см скорость течения жидкости за счет этого эффекта составит  $v = 52$  см/с. Следовательно, при изучении кинетики смачивания и растекания необходимо обеспечить плавное соприкосновение капли с подложкой.

Как было сказано ранее, несмотря на важность явлений смачивания и растекания для суспензий ЛВМ, этот вопрос изучен слабо, особенно, что касается новых компонентов. Также производители связующих не конкретизируют сведения о том, смачивание каких модельных составов указываются значения в их паспортах, что очень актуально в связи с большим количеством разных модельных составов, представляющие собой кристаллические или аморфные составы органического происхождения с различными добавками. Некоторые из них поставляются в виде гранул, хлопьев или же большим развесом (рисунок 2.17). В настоящее время известно более 400 составов модельных масс и некоторые из них приведены в таблице 2.6.

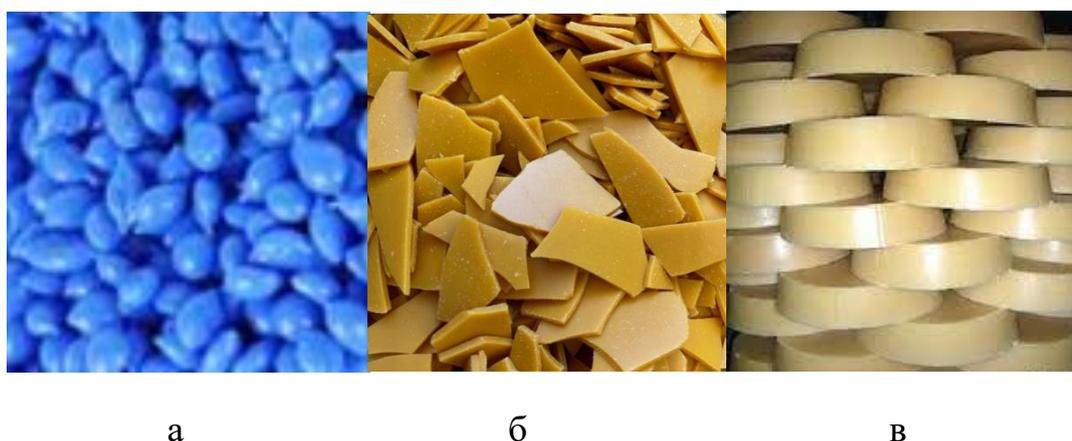


Рисунок 2.17 – Модельные составы различных фирм:

а – R-Wax 866 NEXT, б – Castaldo Super Cera Gold, в – MBC-3A

Таблица 2.6 – Технические характеристики и цена модельных составов [105–110]

№	Марка модельного состава	Показатели				Стоимость, руб/кг	Фирма-производитель
		$s_{II}$ , МПа	$a$ , %	Зольность, %	$t_k$ , °С		
1	ПС 50-50	1,6-2,0	0,3-0,4	0,003-0,10	47,5	124	изготавливается на каждом предприятии самостоятельно
2	Р-3Н	3,2	1,7-1,8	0,03	75-84	140	ОАО «Пластполимер» (СПб)

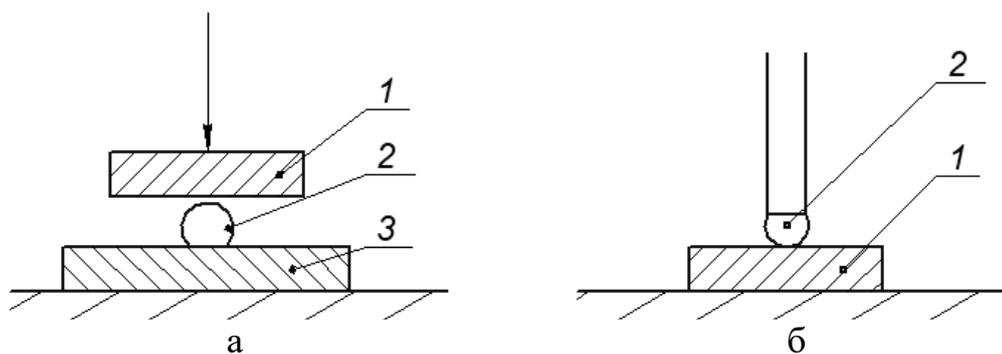
3	MBC-3H	4,0	1,0-1,5	0,03	75-85	147	ОАО «Пластполимер» (СПб)
4	MBC-3T/01	5,0	1,1-1,6	0,03	80-90	150	ООО «ВИТех-Сервис» (Тольятти)
5	MBC-3T/02	5,5	1,5-1,8	0,03	80-90	157	ООО «ВИТех-Сервис» (Тольятти)
6	KC-102	5,0	1,0	0,09	77-95	450	ООО «Карион-С» (Украина)
7	KC-102M	5,5	1,0	0,09	72-88	500	ООО «Карион-С» (Украина)
8	KC-5A	5,0	0,6-0,9	0,07	77-85	256	ООО «Карион-С» (Украина)
9	KC-7	4,2	0,6-0,9	0,03	75-85	279	ООО «Карион-С» (Украина)
10	Remet GTS	7,5	1,0	0,03	72	810	Remet (Великобритания)
11	Remet GTW	7,8	1,0	0,03	63	850	Remet (Великобритания)
12	Remet GTB	6,9	0,8	0,03	63-65	700	Remet (Великобритания)
13	Remet GTRR	7,6	0,5	0,03	71	830	Remet (Великобритания)
14	Remet B700	8,2	0,4	0,005	65-67	900	Remet (Великобритания)
15	Paramelt HMP	6,8	0,8	0,005	89	1220	Paramelt (Нидерланды)
16	Paramelt LMP	7,9	0,2	0,005	68	1350	Paramelt (Нидерланды)
17	Castaldo Super Cera Gold	6,5-7,0	1,0	0,001	76	1433	Castaldo (Великобритания)
18	Castaldo Super Cera Green	5,0-5,5	1,0	0,001	65	749	Castaldo (Великобритания)
19	Freeman Flexible Blue	4,9	0,5	0,001	68	1652	Freeman (США)
20	Freeman Ruby Red	4,5	0,3	0,001	71	1321	Freeman (США)
21	Freeman Aqua Green	2,8	0,2	0,001	76	1321	Freeman (США)
22	Ultracast WAX-S	4,0-5,0	0,60-0,75	0,05	75	835	ООО «Технопарк» (Москва)
23	Ultracast WAX-J	5,5-6,2	0,8-1,4	0,05	66	987	ООО «Технопарк» (Москва)
24	Ultracast WAX-K	2,5-2,7	1,0-1,5	0,05	85-90	795	ООО «Технопарк» (Москва)
25	R-Wax 866 NEXT	5,0	1,0	0,001	72-74	1669	ООО «Рута» (Екатеринбург)

В данной диссертационной работе было изучено смачивание и растекание суспензиями образцов из модельных масс, представленных в таблице 2.6. В качестве связующих для приготовления суспензии использовались ЭТС–40 и ГС–20, а также водные связующие такие как «Армосил» и «Сиалит–20». В качестве огнеупорного наполнителя суспензии использовался плавленный кварц.

В паспортах производителей чаще всего указывается, что краевой угол смачивания составляет  $45^\circ$ , особенно, что касается водных связующих. Также в этих данных не указывается в течение какого времени, были проведены эксперименты. Это очень существенный параметр, т.к. в суспензиях ЛВМ возможно протекание процесса седиментации, который надо учитывать, не только с точки зрения временных характеристик экспериментов, но и самой методики проведения экспериментов.

Процессы смачивания и растекания фиксировались съёмкой на высокоскоростную камеру «Evercam 1000–16–М» в момент соприкосновения капли суспензии с подложкой из модельных составов. Современные скоростные камеры заметно упрощают процесс съёмки быстропротекающих процессов, т.к. аналоговые камеры, позволяющие снимать до 8000 кадр/с на киноплёнку, имели ограниченный запас фотоплёнки и требовали синхронизации процесса включения камеры и соприкосновения подложки с каплей. Съёмку производили со скоростью  $\nu = 700$  кадров/сек.

Для того чтобы определить влияние седиментации наполнителя на процесс растекания осуществлялось исследование двумя методиками: соприкосновение подложки с лежащей каплей и опускание сформированной капли на подложку (рисунки 2.18 и 2.19).



1 – подложка из модельного состава; 2 – капля; 3 – несмачиваемая подложка  
 Рисунок 2.18 – Схемы методики изучения процесса растекания:  
 а – соприкосновение подложки с лежащей каплей; б – опускание капли на подложку

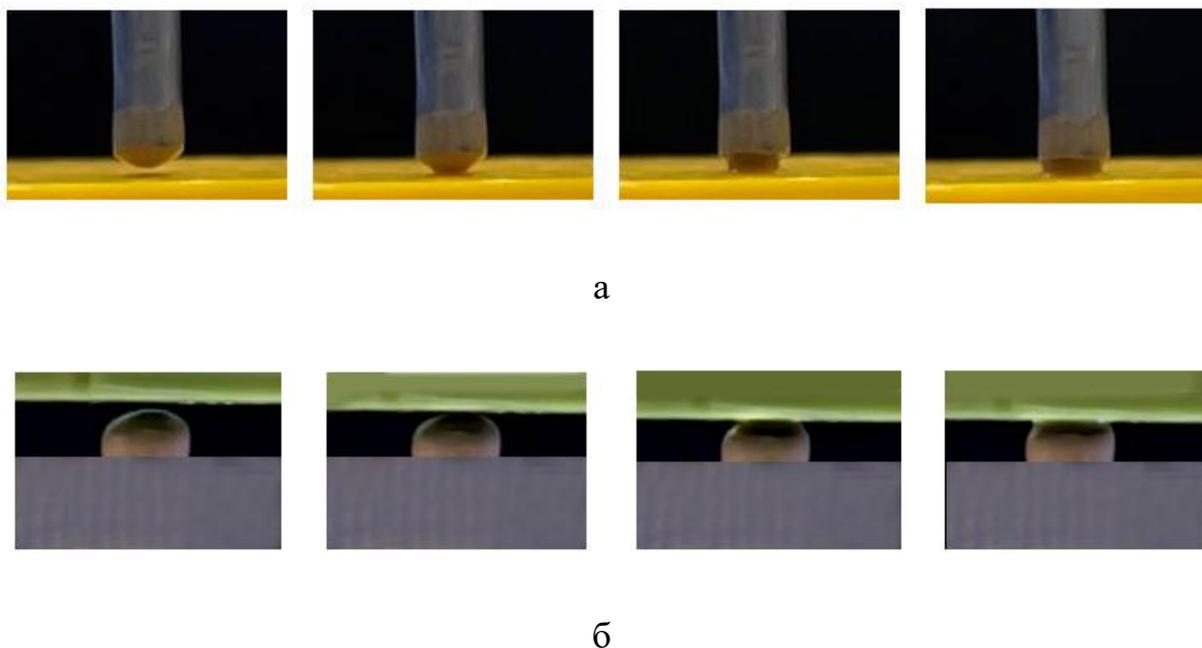


Рисунок 2.19 – Результаты съёмки на высокоскоростную камеру момента соприкосновения капли суспензии с подложкой из модельного состава:  
 а – при подводе капли сверху; б – при подводе капли снизу

При заметной седиментации, вызванной разностью плотностей частиц наполнителя и связующего, эти два способа могут давать различные результаты. Поэтому временной фактор проведения

эксперимента может оказать определенное искажение результатов. В связи с этим были проведены эксперименты по влиянию времени формирования капли суспензии до соприкосновения последней с подложкой. Результаты экспериментов по влиянию временного фактора представлены на рисунке 2.20.

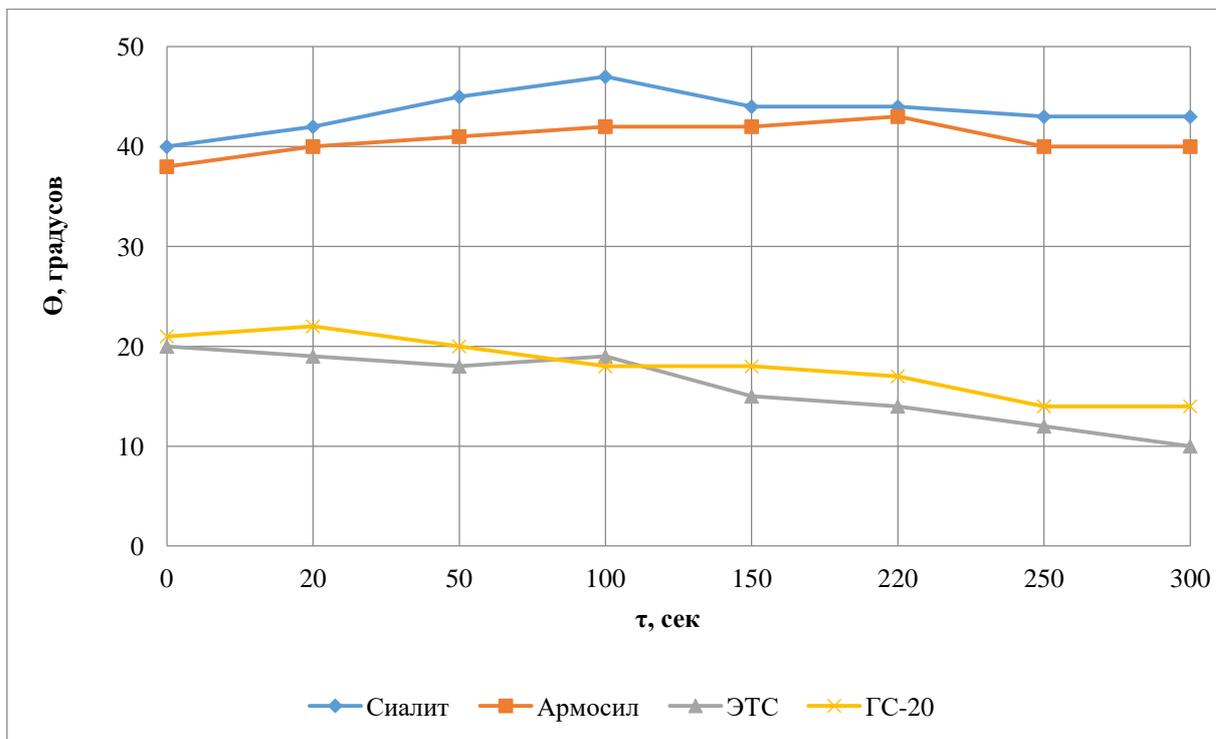


Рисунок 2.20 – Влияние времени выдержки на краевой угол смачивания

Как видно из рисунка 2.20, время выдержки капли практически не влияет на краевой угол смачивания, что свидетельствует, скорее всего, о том, что заметная седиментация в течение этого времени не произошла. С точки зрения технологии нанесения обмазки на восковые модельные блоки, которая происходит намного быстрее, чем продолжался эксперимент, седиментация не окажет определяющего влияния на качество керамической корочки.

Также эксперимент был проведен на восковых модельных составах (рисунки 2.21 – 2.24) разных производителей: жёлтый воск Castaldo Super

Cera Gold, зеленый воск Castaldo Super Cera Green, синий воск R-Wax 866 NEXT и красный воск Freeman Ruby Red.

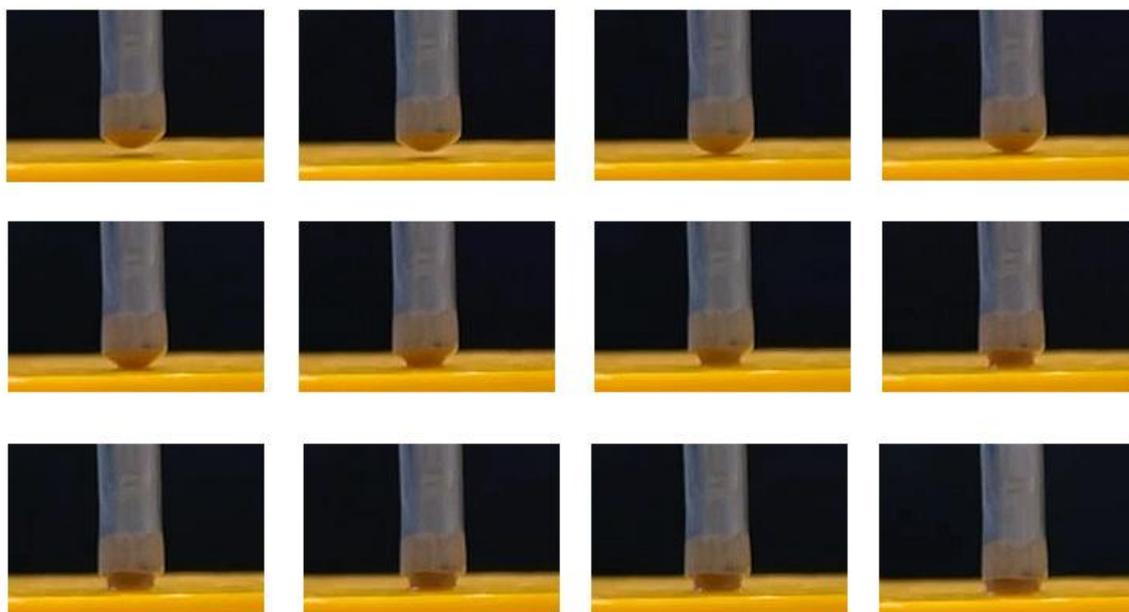


Рисунок 2.21 – Процесс растекания на модельном составе Castaldo Super Cera Gold

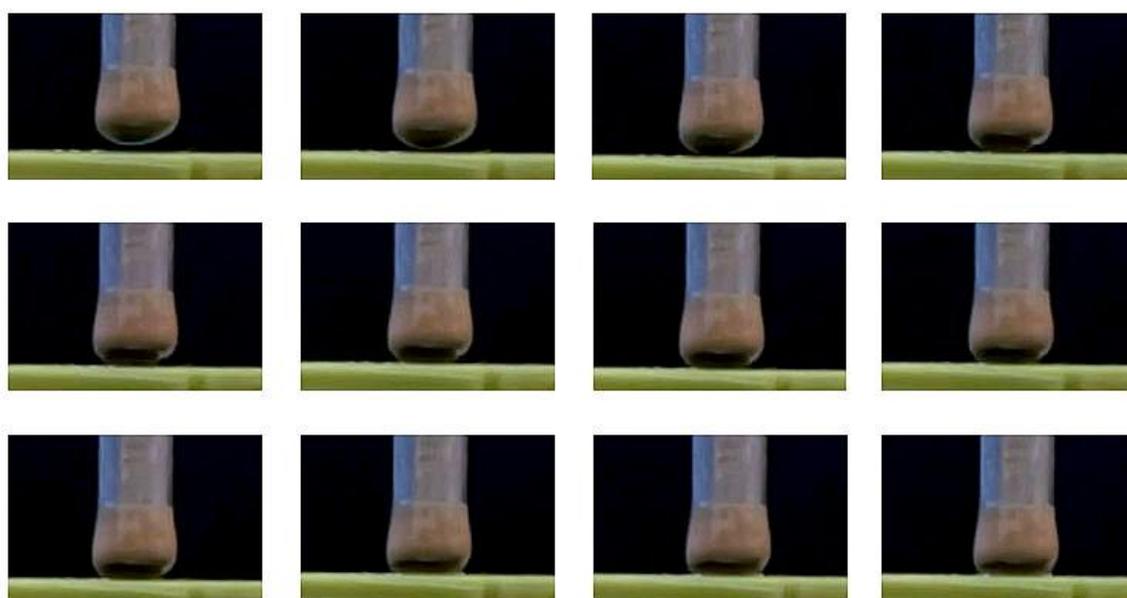


Рисунок 2.22 – Процесс растекания на модельном составе Castaldo Super Cera Green

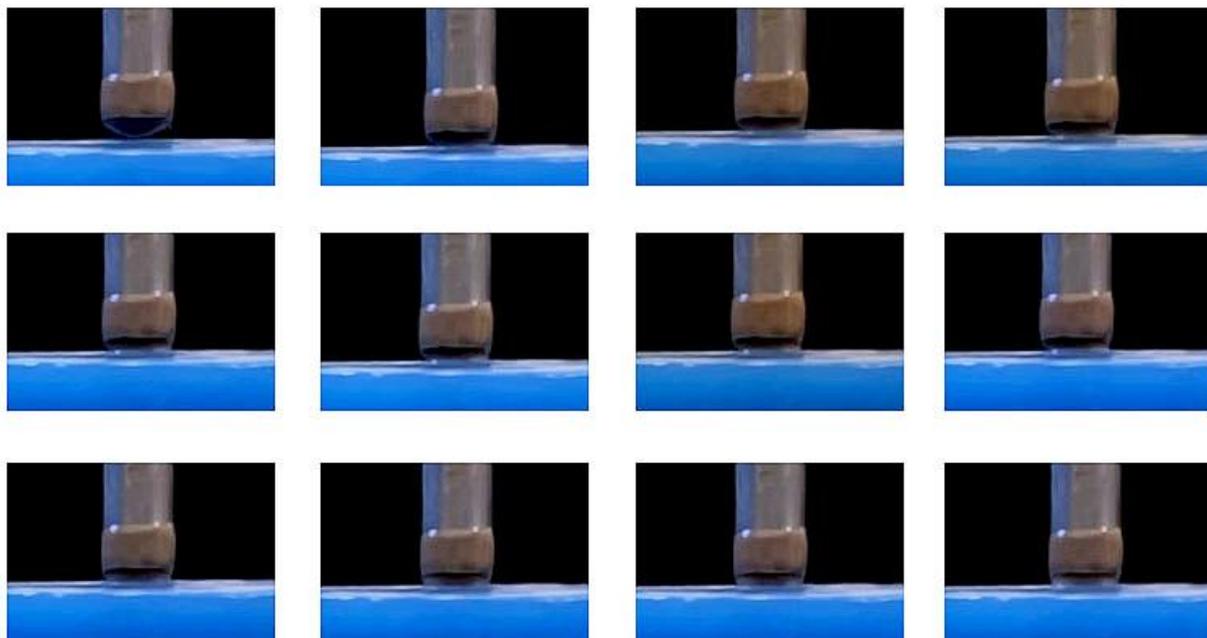


Рисунок 2.23 – Процесс растекания на модельном составе R-Wax 866

NEXT

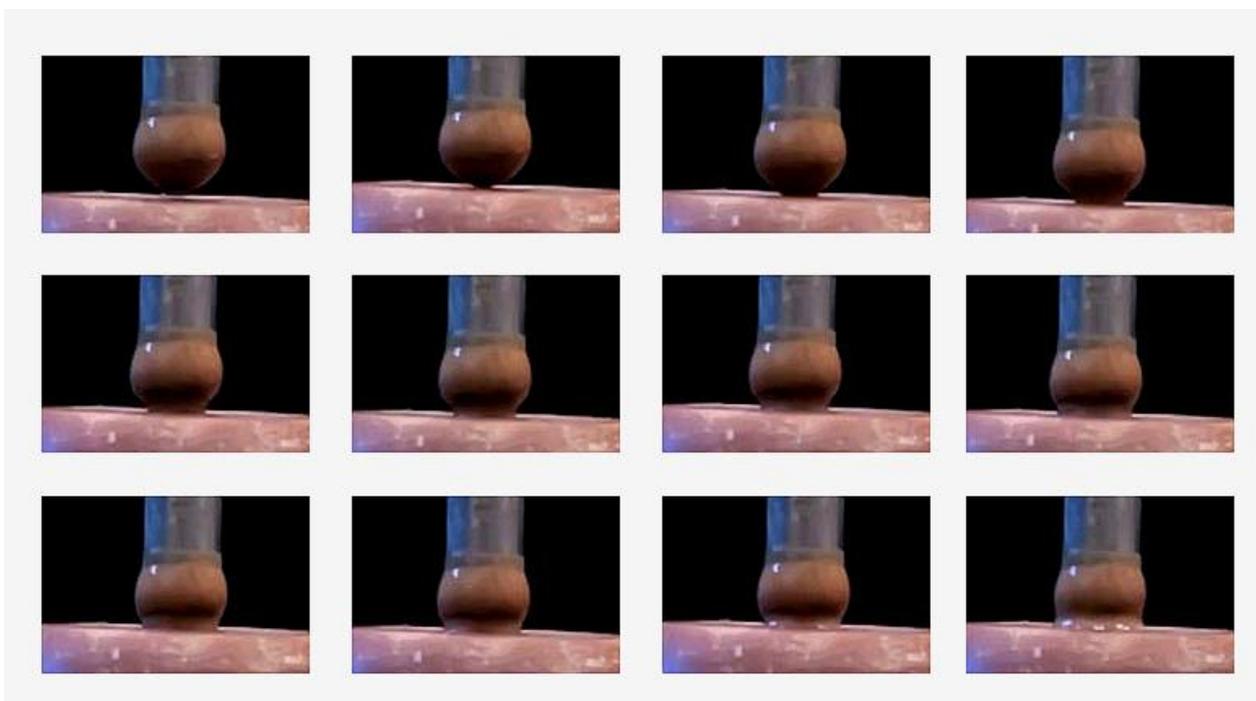


Рисунок 2.24 – Процесс растекания на модельном составе Freeman Ruby

Red

Результаты экспериментов представлены на рисунке 2.25 и 2.26. Как видно, процесс растекания и формирование краевого угла смачивания протекает очень быстро, за доли секунды. Остановка процесса растекания возникает при достаточно высоких краевых углах смачивания 30–40°. В то время, как краевые углы смачивания тех же самых модельных составов связующими находятся в интервале от 2–3° до 7–8°. Такое различие краевых углов смачивания свидетельствует о том, что при растекании суспензии на периметре смачивания резко повышается концентрация наполнителя, что приводит к преждевременной остановке движения жидкости.

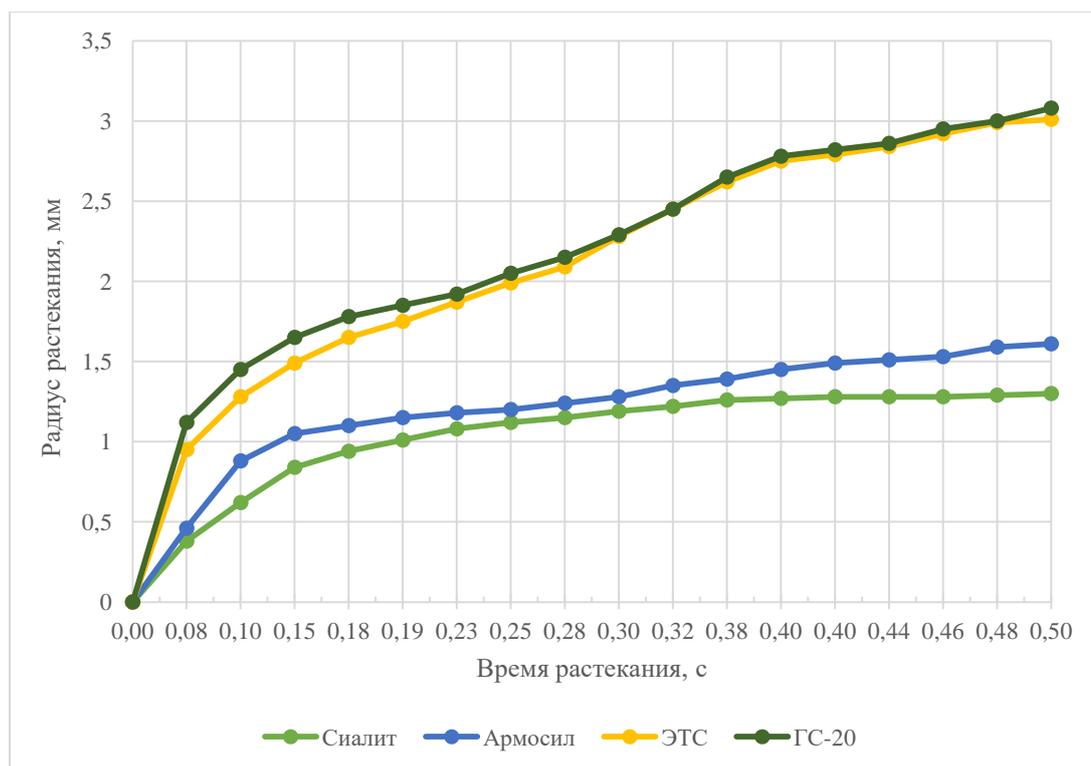


Рисунок 2.25 – Изменение радиуса пятна контакта суспензии на основе разных связующих от времени

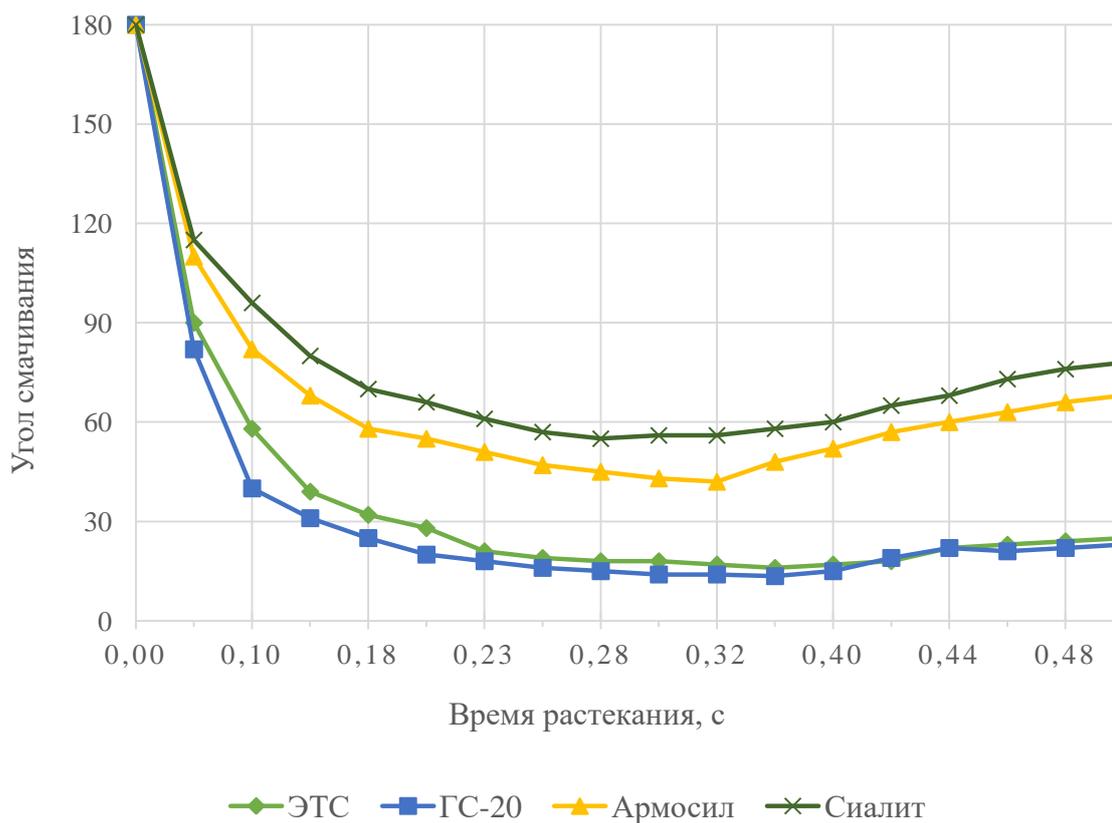


Рисунок 2.26 – Изменение краевого угла смачивания суспензии на основе разных связующих модельного состава по времени

Как видно из рисунка 2.26, при растекании суспензии в вязком режиме краевые углы практически не меняются, однако, в дальнейшем возникает резкий рост краевых углов и достигает значений от  $50^\circ$  до  $80^\circ$ . В обычных жидкостях такого явления не наблюдается. Такой резкий рост, по-видимому, объясняется резким торможением движения жидкости в результате возникновения торможения на периметре смачивания. Это явление напоминает возникновения эффекта «кофейных колец», возникающих при растекании кофе, являющегося классической суспензией [111]. Впервые этот эффект был обнаружен в работах [112–113] и связан он с тем, что капиллярный поток частиц, находящихся в капле скапливается к периферии (рисунок 2.27). В результате скопления твердых частиц на периметре смачивания происходит механическое торможение

течения, а в результате инерционности жидкости возникают достаточно большие углы натекания.

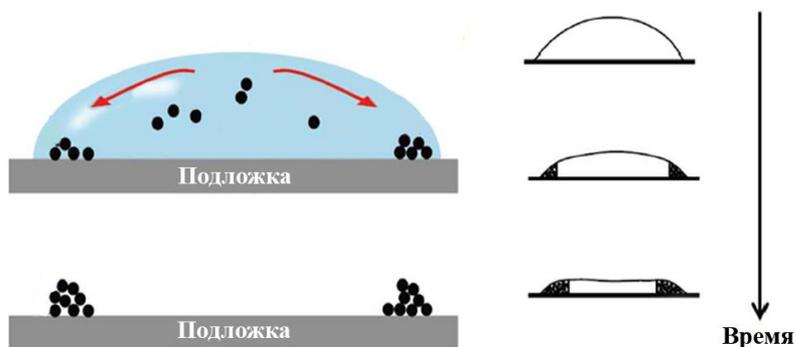


Рисунок 2.27 – Схема формирования «кофейных колец» [111]

Для подтверждения этой теории был проведен ещё один эксперимент с суспензией (ГС-20 и плавленный кварц) и подложкой, которая не смачивается (рисунок 2.28).

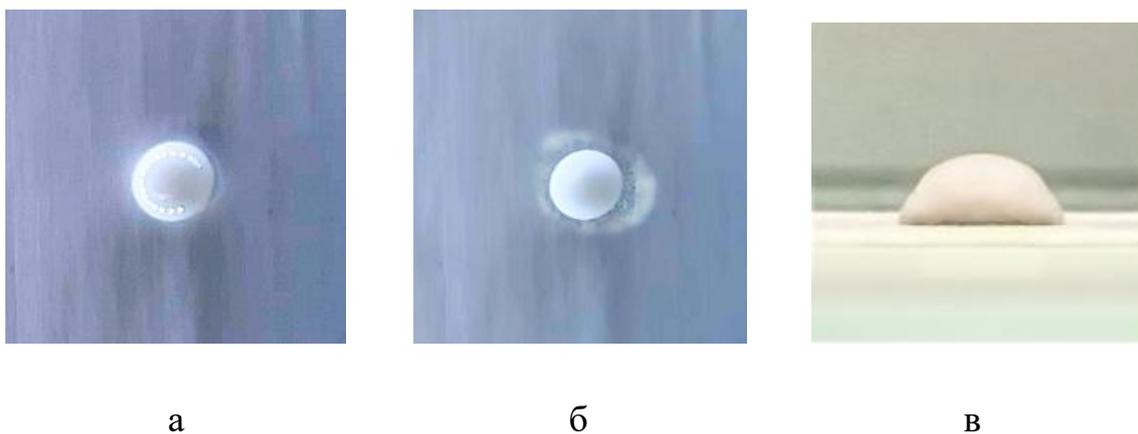


Рисунок 2.28 – Смачивание суспензией: а – вид сверху на каплю в начальный момент времени; б – вид сверху на каплю после формирования краевого угла; в – вид сбоку

Действительно, при съёмке сверху на поверхности, которая плохо смачивается суспензией, видно, что при формировании краевого угла смачивания после торможения движения суспензии дальнейшее растекание происходит в результате движения связующего сквозь пористое препятствие, образовавшееся на периметре смачивания. Это приводит к образованию в отливках неметаллических включений, состоящих из частиц застывшего связующего (рисунок 2.27) [114, 115].

В таблице 2.7 представлены значения краевых углов смачивания, полученные экспериментально, наиболее распространенных модельных составов различными суспензиями с вязкостью 50 с. Как видно из таблицы краевые углы смачивания на ЭТС значительно меньше, чем на водных, из этого можно сделать вывод, что там, где нужно получить хорошую проработку поверхности, например, на отливках художественного литья, лучше использовать связующие на основе ЭТС.

Таблица 2.7 – Краевые углы смачивания суспензиями с вязкостью 50 с модельных составов

№	Марка модельного состава	Краевой угол смачивания					
		ЭТС-40	ГС-20	Армосил К	Сиалит-20	Силарм	Matrixcote
1	ПС 50-50	15	15	45	45-50	50	45
2	МВС-3А	21	20	40	46	52	54
3	Remet GTS	18	21	41	47	51	47
4	Remet GTB	19	23	42	45	52	49
5	Castaldo Super Cera Gold	12	10	28	31	34	42
6	Castaldo Super Cera Green	14	13	19	32	37	51
7	Ultracast WAX-S	17	18	44	48	54	52
8	Ultracast WAX-J	21	23	46	51	57	58
9	Ultracast WAX-K	19	25	43	50	59	61
10	R-Wax 866 NEXT	15	19	39	42	44	49

При изготовлении восковых моделей на металлические пресс-формы наносится разделительный состав, чаще всего используется машинное масло, скипидар, этот состав должен иметь краевой угол смачивания больше, чем у связующего на основе которого будет изготовлена суспензия. Например, ЭТС и ГС–20 имеют очень низкие краевые углы, и они хорошо вытесняют масло с поверхности, а водные связующие плохо. Поэтому при использовании водных связующих восковые МС необходимо промывать, например, в мыльном растворе, что естественно удлиняет технологический процесс.

Как показали эксперименты количество твердой фазы, введённой в суспензию, практически не сказывается на краевых углах смачивания. Для понятия этого эффекта было изучено такое структурно-чувствительное свойство жидкости как поверхностное натяжение (ПН).

### **2.3 Методики измерения поверхностного натяжения**

Поверхностное натяжение является энергией, которую необходимо затратить на образование единицы поверхности. В некоторых случаях поверхностное натяжение определяется силой, которая приложена к единице периметра смачивания и направлена по касательной к свободной поверхности жидкости, перпендикулярно к участку, на который эта сила действует [116].

Поверхностное натяжение многих жидкостей, в том числе и расплавов, достаточно хорошо изучено [117–119]. Однако поверхностные свойства суспензий изучены крайне слабо. И это несмотря на то, что большинство окружающих нас объектов представляют собой не что иное, как суспензии. Суспензии, которые являются объектом данного исследования, является одной из распространенных дисперсных систем с твёрдой дисперсной фазой и жидкой дисперсионной средой [120].

В большом количестве суспензии используются в строительных технологиях (бетон, цемент и лакокрасочные материалы), в сельском хозяйстве (удобрения и пестициды) и, в целом, в окружающем нас мире (кофе, кровь, лекарственные препараты в виде суспензии и многое другое). Одной из особенностей суспензий, затрудняющей изучение её свойств, является седиментация, т.е. осаждение или всплытие частиц дисперсной фазы под воздействием сил гравитации. Поэтому в большинстве случаев измерение поверхностного натяжения суспензий вызывает трудности, а также имеет много противоречий и разных мнений.

Например, авторами [121–124] изучены проблемы, обусловленные физико-химическими процессами, протекающими на межфазных границах, и особенностями строения суспензий и проведен большой анализ методов измерения поверхностного натяжения для суспензий. При измерении поверхностного натяжения авторы пришли к выводу, что при увеличении концентрации твердой фазы величина поверхностного натяжения практически не меняется ( $\sigma = 70\text{--}71$  мН/м). Но эти методы справедливы именно для бентонитовых суспензий, где количество твердой фазы намного меньше (2–6 %), чем в суспензиях для метода ЛВМ.

В работе В. М. Витюгина была другая ситуация: наблюдался рост сил поверхностного натяжения в интервале концентраций твердой фазы от 10 %, а интенсивный рост наблюдается в коротком интервале от 12 до 15 % [125]. Однако, к сожалению, в работах не представлено объяснение протекающих процессов и их результаты противоречат друг к другу.

На наш взгляд, все эти данные были получены на водных суспензиях и эти различия могут быть вызваны чистотой экспериментов, т.к. непонятно, что могло быть ещё внесено в жидкость при добавлении бентонитов. Не ясно какие поверхностно-активные или поверхностно-инактивные вещества попали вместе с бентонитом в суспензию.

К такому же мнению пришли авторы работы [126], считающие, что различные параметры суспензий, такие как концентрация частиц, их размер и угол контакта, изменяют поверхностное натяжение суспензий. Для изучения были проведены многочисленные исследования. Было выявлено, что существование капиллярных сил между частицами вызывают увеличение поверхностного натяжения. Также авторами было замечено, что существуют противоречия между различными экспериментальными результатами. Это происходит из-за того, что на экспериментально полученные значения поверхностного натяжения сильно влияют методы измерения или другие явления (например, неоднородность концентрации, температуры и поверхностного заряда частиц).

Существует большое количество методов определения поверхностного натяжения [116, 126–130]. Условно их можно разделить на три группы: статические, полустатические и динамические. Их принципиальное различие состоит в том, что статическими методами определяется поверхностное натяжение у сформировавшейся поверхности, которая находится в равновесии, а динамические методы связаны с разрушением поверхностного слоя.

#### 1. Статические методы:

- метод капиллярного поднятия;
- методы лежащей капли (пузыря) и висящей капли;
- измерение кривизны жидкой поверхности раздела;
- метод измерения массы или глубины погружения предмета в жидкость (Вильгельми);

#### 2. Полустатические методы:

- метод наибольшего давления образования пузырьков и капель (метод Ребиндера);

- метод измерения максимального усилия отрыва кольца или рамки (методы Пэдди и Дю Нуи);
- метод взвешивания и счета капель – сталагмометрический метод.

### 3. Динамические методы:

- метод бегущих волн;
- метод колеблющихся (осциллирующих) струй и капель [116].

Динамические методы основаны на том, поверхностное натяжение измеряется при ритмичных колебаниях поверхности: струи, волны и т.п. Под влиянием внешних сил свободная поверхность деформируется либо увеличивается, а поверхностное натяжение будет возвращать свободную поверхность в исходное положение, вследствие чего будут возникать колебания, по которым можно определить поверхностное натяжение. В качестве примера динамического метода можно привести метод колеблющейся (осциллирующей) струи [128–130], он позволяет связать длину волны на поверхности струи, определяемую экспериментально (рисунок 2.29), с поверхностного натяжения жидкости. Данный метод основан на образовании волн на струе жидкости, вытекающей из малого эллиптического отверстия под действием постоянного перепада давления.

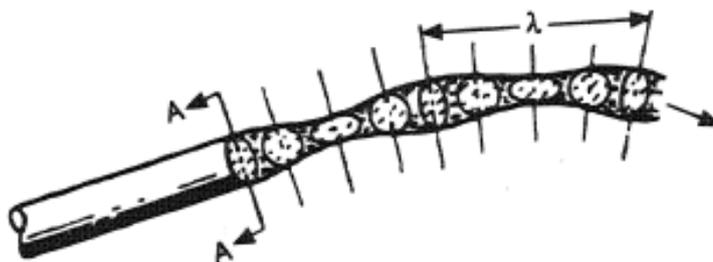


Рисунок 2.29 – Методика измерения колебаний струи [129]

Метод осциллирующей струи является наиболее простым из динамических, другие методы (капиллярных волн, бегущих волн) еще более сложны в экспериментальном исполнении. При формировании волн как метода определения поверхностного натяжения, необходимо исключить влияние других факторов (кроме поверхностного натяжения) на систему. Также для визуализации волны вязкость жидкости должна быть невелика. Поэтому динамические методы применяют исключительно для чистых жидкостей с низкой вязкостью. Очевидно, что суспензии ЛВМ к таковым не относятся.

Статический метод капиллярного поднятия является одним из самых распространённых и простых в исполнении, рассматривался такой метод ещё в середине XIX в. такими учеными как Матье и Пуассон. Этот метод имеет две методики измерения: в одной трубке (рисунок 2.30) и дифференциальная методика, в которой измеряется разница положений менисков в двух капиллярах разных радиусов [131].

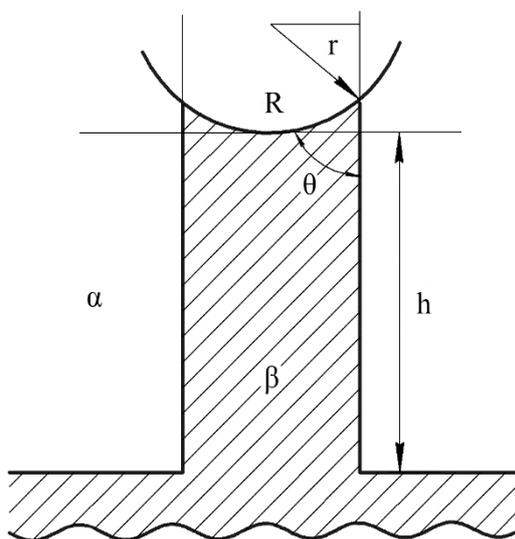


Рисунок 2.30 – Основная схема метода поднятия капли в капилляре

В простейшем случае, если капилляр радиусом  $r$  опустить в жидкость, то за счет смачивания или несмачивания его стенок образуется мениск с углом  $\theta$ , т.е. искривление поверхности жидкости и возникает

капиллярное давление. Под его влиянием граница жидкости перемещается до тех пор, пока не установится равновесие между гидростатическим давлением и капиллярным. При этом смачивающая жидкость поднимается, а несмачивающая опускается. Высота капиллярного поднятия  $h$  зависит от поверхностного натяжения жидкости, измерив  $h$  можно рассчитать  $\sigma$ . Связь капиллярного давления  $P_k$  с радиусом кривизны и поверхностным натяжением дает уравнение Лапласа:

$$P_k = \frac{2\sigma}{R}, \quad (2.7)$$

Метод измерения капиллярного поднятия основан на определении разности уровней жидкости в капилляре радиуса  $r$  и в широком сосуде. Расчет поверхностного натяжения от высоты подъема жидкости проводится по формуле Жюрена:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_0(\rho - \rho_0)g}, \quad (2.8)$$

где  $\rho$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $h$  – высота поднятия столба жидкости;  $\theta$  – угол смачивания жидкостью стенки капилляра;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\rho_0$  – плотность газовой фазы над жидкостью;  $r_0$  – радиус капилляра.

Этот метод считают наиболее точным, потому что для него разработана довольно точная теория, а экспериментальные данные легко контролируются.

Использование капиллярного метода для измерения поверхностного натяжения суспензий ЛВМ невозможно вследствие происходящего в процессе подъема жидкости процесса сильной седиментации, как в вертикальном, так и в осевом направлении и инерционной фильтрации на входе в капилляр (рисунок 2.31). В результате вышеуказанных процессов при использовании капиллярного метода суспензия в капилляре, особенно на уровне мениска сильно обеднена дисперсным наполнителем.

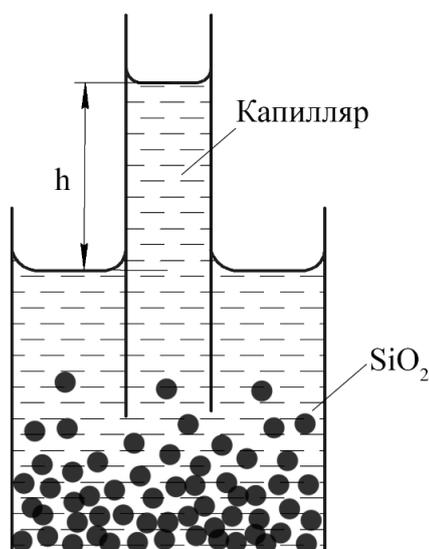


Рисунок 2.31 – Капиллярный метод для суспензии ЛВМ

Явление седиментации является ключевым препятствием для измерения поверхностного натяжения суспензий. Суспензии ЛВМ можно рассматривать, как грубодисперсную систему, состоящую – из двух фаз: дисперсная фаза из частиц  $\text{SiO}_2$ , которая распределена в дисперсионной среде связующего.

Суспензия – свободнодисперсная система, то есть в таких системах частицы дисперсной фазы могут свободно перемещаться по всему объему. В состоянии покоя на частицы дисперсной фазы одновременно действуют сила тяжести, выталкивающая сила Архимеда, силы ударов молекул дисперсионной среды и электрические силы отталкивания. Сила тяжести вызывает оседание частиц – седиментацию [132]. Суспензии ЛВМ являются седиментационно-неустойчивыми системами [133].

Существует несколько факторов, влияющих на седиментационную устойчивость суспензий. В суспензиях ЛВМ – это степень дисперсности (измельчения) частиц твердой фазы, форма частиц, концентрация твердой фазы, разность удельных весов частиц и связующего.

В общем виде скорость седиментации находит отражение в формуле Стокса. Скорость оседания прямо пропорционально зависит от радиуса частиц дисперсной фазы, разности плотностей дисперсной фазы и дисперсионной среды и обратно пропорциональна вязкости дисперсионной среды. Эта формула (2.9) применима для шарообразных частиц диаметром от 0,5 до 100 мкм [131]:

$$V = \frac{2r^2 \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot g}{9\eta} \quad (2.9)$$

где  $V$  – скорость движения (оседания);  $r$  – радиус частиц дисперсной фазы;  $\rho_1$  – плотность частиц дисперсной фазы;  $\rho_2$  – плотность дисперсионной среды;  $\eta$  – абсолютная вязкость дисперсионной среды;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Следует отметить, что формула Стокса (2.9) справедлива для суспензий с низкой концентрацией дисперсного наполнителя, поскольку не учитывает взаимовлияние дисперсных частиц. Тем не менее, ее применяют для оценки седиментационной устойчивости систем.

Другим фактором, оказывающим влияние на седиментацию, является форма частиц. Закон Стокса предполагает сферическую гладкую форму. Фактически форма частиц, которые составляют дисперсную фазу в суспензиях ЛВМ, далека от округлой и гладкой. Это можно увидеть на снимках, сделанных на электронном растровом микроскопе высокого разрешения «Scios 2 LoVac» фирмы «ThermoFisher» (рисунок 2.32). Зерна плавленого кварца обладают более развитой поверхностью. Из-за формы отличной от сферической процесс седиментации в суспензиях ЛВМ протекает медленнее. С другой стороны, из-за развитой поверхности может быть эффект агломерации, увеличивающий размер частиц и ускоряющий их оседание, соответственно.

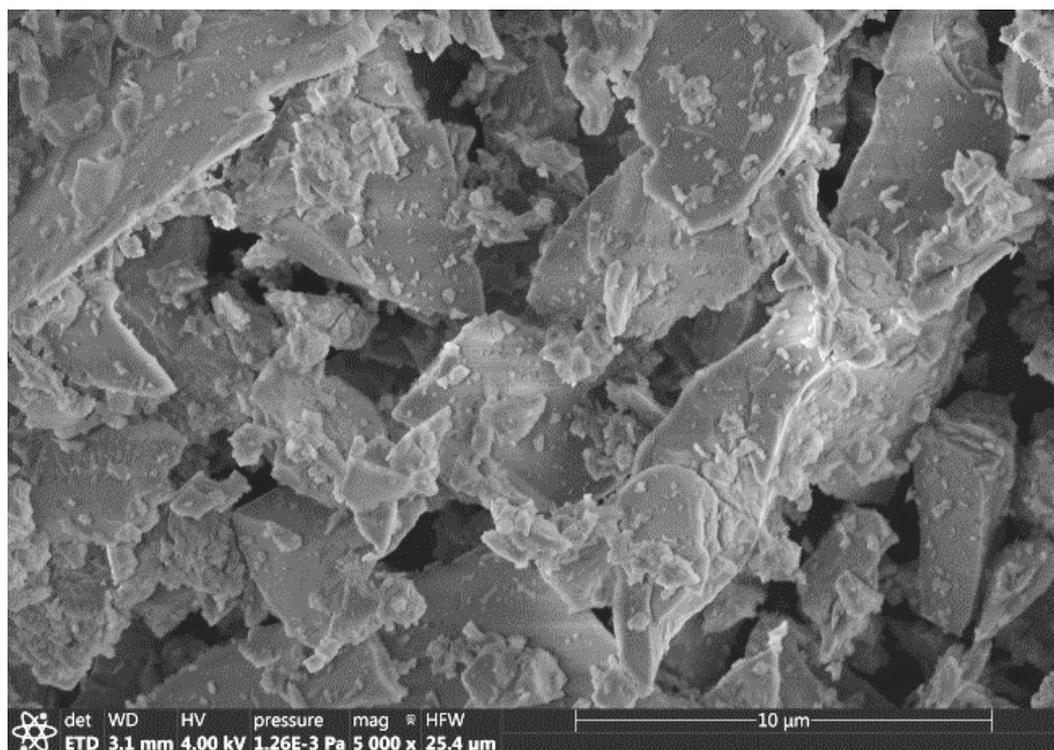


Рисунок 2.32 – Микрофотография плавленного кварца фракции 40 мкм

Постоянно протекающий процесс седиментации частиц ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  и др.) может значительно затруднять измерение поверхностного натяжения суспензии, а также искажать полученные данные. Зачастую в работах изменение поверхностного натяжения никак не связывают с наличием твердой фазы в суспензии, наибольшее влияние имеет состав жидкой фазы, наличие избыточных зарядов на поверхности и влияние электролитов [134, 135]. Но экспериментальные данные по изучению поверхностного натяжения, например, бентонитов, подтверждают, что частицы твердой фазы могут оказывать большое влияние на величину поверхностного натяжения [123, 125, 136–139], даже в незначительной концентрации.

Наиболее распространенным способом измерения поверхностного натяжения являются методы, основанные на исследовании геометрии поверхности раздела жидкой и газовой фазы. Это методы пузырька или лежащей (висящей) капли. ПН стремится придать капле или пузырьку

шарообразную форму, в то время как гравитационные силы их сплющивают. Установившаяся форма соответствует равновесию между этими двумя силами. Из этого следует, что, чем меньше поверхностное натяжение вещества, тем больше деформация [140]. По форме этих капель (или пузырьков газа) с применением уравнения Лапласа (2.7) можно рассчитать ПН жидкости.

Для метода лежащей капли – капля жидкости помещается на плоскую подложку. Диаметр капли должен быть  $d = 2-5$  мм, это обусловлено тем, что в этом случае краевой угол не будет зависеть от диаметра. Для определения значения поверхностного натяжения каплю фотографируют и на снимке определяют значения диаметра  $d_{\max}$  и высоты  $H$  капли (рисунок 2.33).

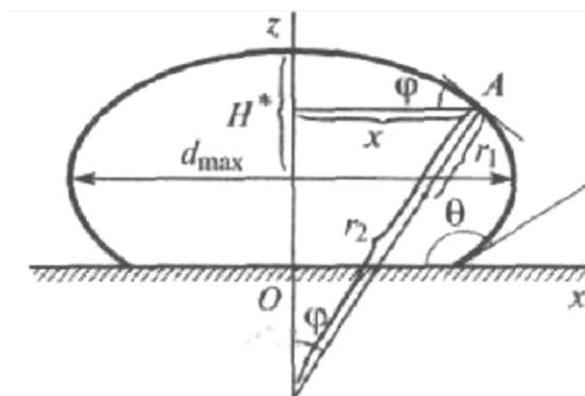


Рисунок 2.33 – Метод лежащей капли [131]

И из соотношения ниже определяется величина поверхностного натяжения:

$$\frac{\sigma}{\Delta\rho \cdot g} = a^2 = f\left(\frac{H}{r}\right) \cdot d_{\max}, \quad (2.10)$$

где  $a^2$  – капиллярная постоянная,  $\Delta\rho$  – разность плотностей контактирующих жидкой и газообразной фаз;  $d_{\max}$  – максимальный диаметр капли;  $H$  – высота капли над экватором.

Как видно из уравнения (2.10) необходимо знать плотность суспензии, однако из-за седиментации, плотность может оказаться различной по объёму капли, что может значительно исказить результаты измерений.

Те же проблемы возникают при изучении поверхностного натяжения методом вращающейся капли [141], в котором силы поверхностного натяжения уравновешивает центробежная сила. Действительно процесс седиментации при таком интенсивном силовом воздействии исключает возможность использования этого метода для измерения поверхностного натяжения суспензий.

Метод висящей капли (рисунок 2.34) разработан в работах Эндреса, Хаусера и Такера [141–142]. Висящая капля со временем вытягивается из-за изменения гидростатического давления внутри нее, тем самым изменяя начальную форму.

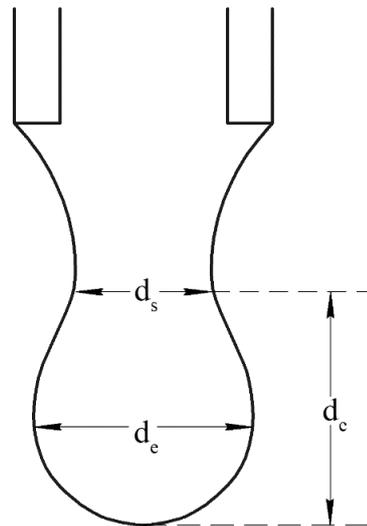


Рисунок 2.34 – Метод висящей капли:  $d_e$  – диаметр экватора капли;  $d_s$  – диаметр, измеренный на расстоянии  $d_c$  от нижней точки капли [131]

При вычислении поверхностного натяжения по методу висящей капли определяются те параметры, которые характеризуют отклонение

формы капли от сферической. Расчет поверхностного натяжения проводят по формуле:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho g d_e^2}{H}, \quad (2.10)$$

где  $\Delta\rho$  – разность величины плотности;  $g$  – гравитационная постоянная;  $H$  – комплексный параметр, который определяется по таблицам Бешфорта и Адамса [131, 143].

Также этот метод может быть реализован с помощью тензиометра, что значительно упрощает его и делает более точным. Камера позволяет снять изображение капли и передать ее на компьютер, далее программа производит анализ и расчет параметров [144]. Проблема метода висящей капли при измерении поверхностного натяжения суспензий аналогична проблемам метода лежащей капли.

Однако, поскольку седиментация в методах лежащей и висящей капли идет в противоположных направлениях, авторами [139] была предложена методика для измерения поверхностного натяжения суспензий на основе бентонитов. По этой методике результат исследования получается в итоге усреднения экспериментальных данных полученных методом лежащей и висящей капли. При использовании этого метода процесс седиментации дисперсной фазы является разнонаправленным, что нивелирует погрешность [137].

Также широко используемым является метод Вильгельми (рисунок 2.35). В этом методе закрепленную на коромысле весов тонкую пластинку шириной  $b$  и длиной  $l$ , хорошо смачиваемую исследуемой жидкостью, погружают в жидкость. На поверхности пластинки с обеих ее сторон образуются мениски. Форма их поверхности и максимальная высота поднятия жидкости определяются уравнением Лапласа. Суммарный вес поднятой жидкости, приходящийся на единицу длины периметра

пластинки, не зависит от формы мениска и при нулевом краевом угле смачивания равен поверхностного натяжения  $\sigma$  [145].

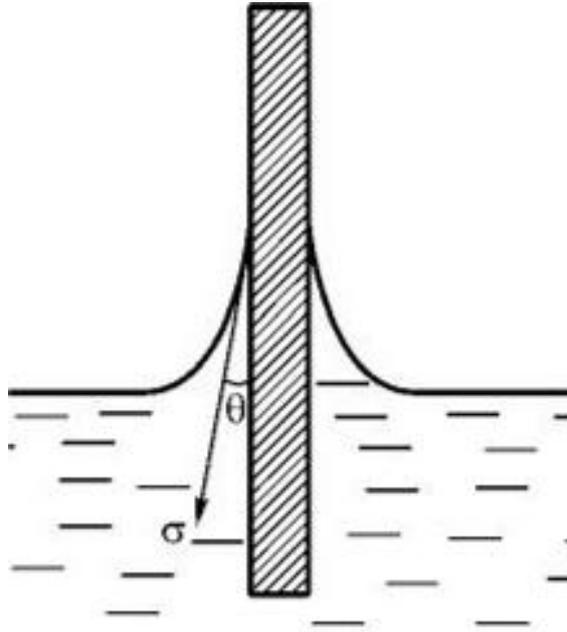


Рисунок 2.35 – Метод уравнивания пластинки [145]

Поэтому сила  $F$ , которую необходимо приложить для уравнивания пластинки, равна произведению поверхностного натяжения жидкости на удвоенную ширину пластинки. Соответственно ПН рассчитывается из следующего уравнения:

$$\sigma = \frac{F}{2(l + b)}, \quad (2.10)$$

где  $l$  и  $b$  – это ширина и толщина пластинки.

Для более точного измерения поверхностного натяжения данным методом используется катетометр для измерения глубины погружения пластинки и тогда расчет поверхностного натяжения проводится по следующему уравнению:

$$\sigma = \frac{\Delta P - SH\rho g}{2(l + b)}, \quad (2.11)$$

где  $\Delta P$  – изменение массы пластинки вследствие втягивания ее в жидкость;  $H$  – глубина погружения пластинки;  $\rho$  – плотности исследуемой жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения.

Как и остальные методы основанные на измерении геометрии поверхности раздела фаз, метод Вильгельми при использовании для измерения поверхностного натяжения суспензий имеет проблему седиментации, но она минимальна относительно рассмотренных выше методов.

Полустатические методы определения поверхностного натяжения, как и статические, основаны на достижении системой некоторого равновесного состояния, но для полустатических методов это равновесие неустойчиво. Определение поверхностного натяжения основано здесь на изучении условий, при которых система теряет свое равновесие [127].

Методы, основанные на измерении максимального усилия отрыва, впервые были предложены Пэдди и предполагали, отрыв цилиндра либо конуса от поверхности жидкости. В целом, принципиальная схема схожа с методом Вильгельми [131].

Сила  $F$ , которая превышает вес цилиндра либо конуса, равна весу жидкости, которая поднимается вместе с цилиндром выше общего уровня жидкости как показано на рисунке 2.36.

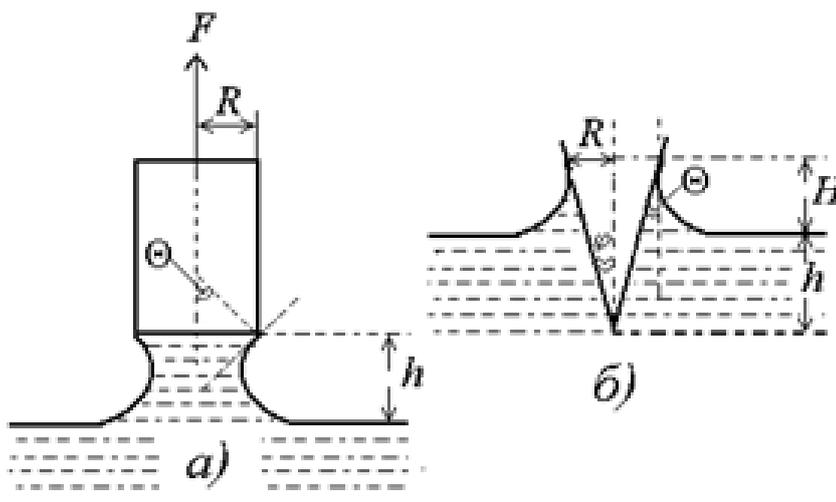


Рисунок 2.36 – Геометрические соотношения мениска при отрыве цилиндра (а) и конуса (б) [131]

Эта сила для цилиндра может быть рассчитана по уравнению:

$$F = \pi R^2 h \rho g + 2\pi R \sigma \sin \varphi, \quad (2.12)$$

где  $R$  – радиус цилиндра;  $h$  – расстояние от основания цилиндра до плоской поверхности жидкости.

При отрыве конуса требуется определять, как высоту мениска  $H$ , так и глубину погружения конуса  $h$  относительно поверхности жидкости. Для расчета используют уравнение, где учтены силы, превышающие вес конуса:

$$F = \pi R^2 H \rho g + 2\pi R \sigma \cos(\theta - \varphi) - \frac{\pi R^2 \rho g (H+h)}{3}, \quad (2.13)$$

Невозможность использования этого метода для суспензий состоит в необходимости медленного проведения эксперимента, что обуславливает изменение концентрации твердой фазы в суспензии на границе раздела фаз. Аналогичный широко применяемый для измерения поверхностного натяжения метод отрыва кольца вообще фактически не позволяет измерять поверхностное натяжение суспензий, тем более высоконасыщенных, как суспензии ЛВМ, поскольку при отрыве кольца будет развиваться процесс

фильтрации жидкости к кольцу, и измерение поверхностного натяжения покажет не поверхностное натяжение суспензии, а поверхностное натяжение жидкой фазы суспензии.

Метод взвешивания или измерения объема капель (также этот метод называется сталагмометрическим) основывается на определении веса капли, отрывающейся под действием силы тяжести от плоской поверхности торцевого среза капилляра. Как и другие методы, предусматривающие течение в капилляре, он не применим для суспензий по вышеуказанным причинам.

Тем не менее, в работе [51] проведено исследование поверхностного натяжения кремнезольных водных суспензий для ЛВМ методом счета капель, а результаты были уточнены с использованием поправочных коэффициентов, представленных в монографии [140]. В выборе метода автор руководствовался предотвращением испарения жидкости из суспензии, что обеспечивает капилляр. Но сам автор считает, что этот метод имеет довольно большую погрешность (около 10 %). Это является следствием того, что автор рассматривает течение в капилляре как стержневое. Однако известно, что механизм течения в капилляре – ковровый.

Метод максимального давления в пузырьке заключается в измерении давления, необходимого для выдувания пузырька газа через кончик трубки, которая погружена в исследуемую жидкость (рисунок 2.37). Определив это давление и зная радиус отверстия, через которое выдувают пузырек исследуемого газа, можно рассчитать поверхностное натяжение [143, 146].

Впервые прибор для определения поверхностного натяжения по методу измерения максимального давления газовых пузырьков предложил академик П. А. Ребиндер. Идея П. А. Ребиндера о глубокой связи между физико-химическими явлениями на поверхности твердых тел и их

механическими свойствами была выдвинута в 1928 г. Концепция П. А. Ребиндера об определяющем влиянии поверхностных явлений для систем с довольно крупными частицами твердой фазы и с предельно развитой поверхностью, имеет особо важное значение [147–148].

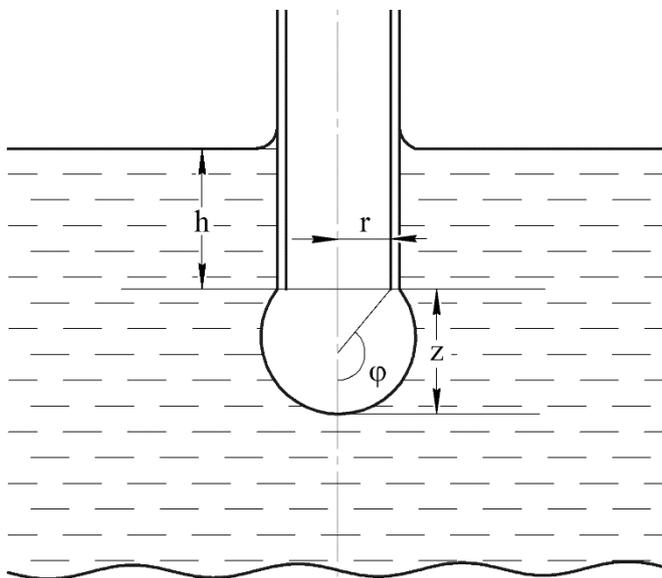


Рисунок 2.37 – Метод максимального давления в пузырьке [131]

Согласно уравнению Лапласа (2.7) давление внутри газового пузырька увеличивается при уменьшении его диаметра. При формировании газового пузырька на кончике капилляра, опущенного в жидкость, форма пузырька меняется в зависимости от приложенного давления. Давление достигает максимума ( $P_{\max}$ ), когда пузырек принимает форму сферы. Рассчитать величину поверхностного натяжения, пренебрегая глубиной погружения капилляра, можно по формуле [136]:

$$\sigma = \frac{P_{\max} - P_0}{2} r, \quad (2.14)$$

где  $P_0$  – гидростатическое давление в капилляре за счет погружения,  $r$  – радиус капилляра.

При погружении капилляра на 1–2 мм величиной  $P_0$  можно пренебречь. В основе расчета лежит предположение, что пузырек воздуха

в момент отрыва строго сферичен. Такое предположение справедливо только в том случае, если радиус капилляра достаточно мал. Но в условиях реального эксперимента необходимы поправочные коэффициенты. Наиболее распространены два способа корректировки результатов: формула Шредингера и таблицы Бешфорта и Адамса (Сагден исправил эти таблицы применимо именно к этому методу) [131, 140]. Различия между этими способами состоят в том, что таблица позволяет делать поправки в более широком диапазоне отклонений формы пузырька от сферической формы. А применение формулы Шредингера ограничено радиусом капилляра в 0,4 мм [143].

Исходя из данного обзора можно сделать вывод, что далеко не все методы подходят для суспензий, особенно это касается тех методов, в которых для расчета поверхностного натяжения требуется знание величины плотности, которая может меняться во времени из-за седиментации твердых частиц суспензии. Поэтому предпочтительно использовать метод наибольшего давления в пузырьке и метод уравнивания пластинки в поверхностном слое (метод Вильгельми). Однако точность измерения поверхностного натяжения методом Вильгельми зависит от краевых углов смачивания пластинки суспензией и при заметно отличающихся краевых углах смачивания от нуля метод становится крайне неточным.

## **2.2 Измерения поверхностного натяжения суспензий ЛВМ**

### **2.2.1 Материалы и методы измерения поверхностного натяжения**

В данном диссертационном исследовании, в качестве основного метода измерения поверхностного натяжения, был выбран метод

максимального давления в пузырьке. Схема установки для определения поверхностного натяжения методом максимального давления в газовом пузырьке изображена на рисунке 2.38.

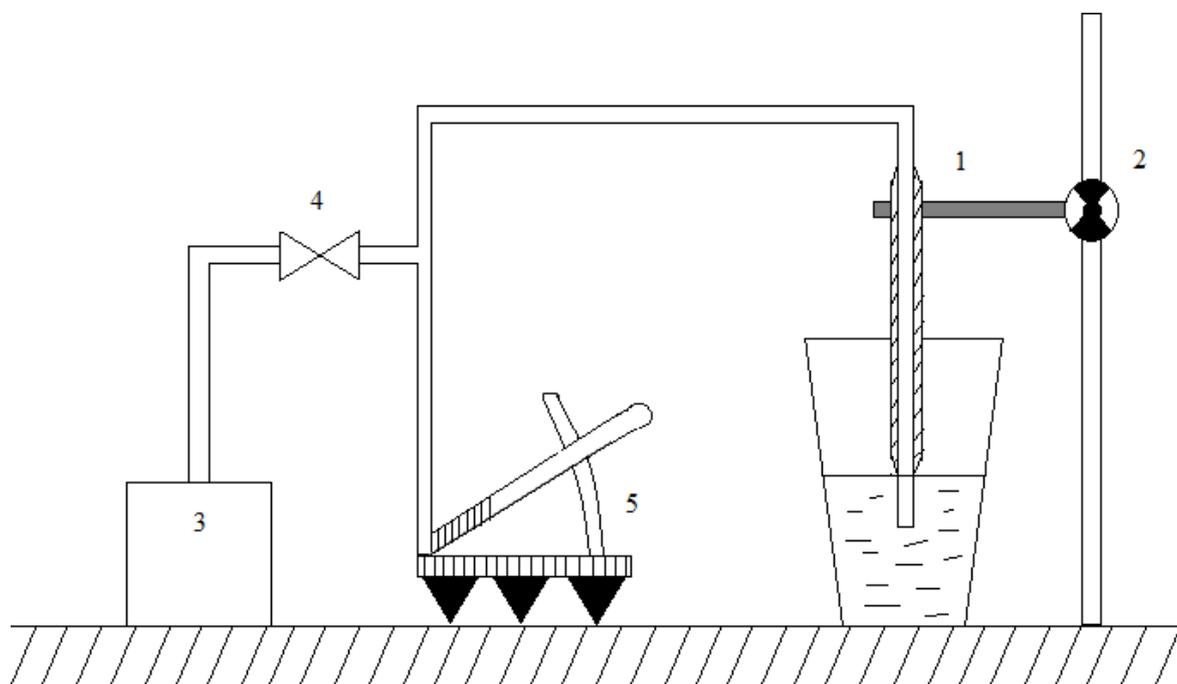


Рисунок 2.38 – Схема установки для определения ПН методом максимального давления в газовом пузырьке: 1 – капилляр; 2 – микровинт; 3 – компрессор; 4 – кран; 5 – микроманометр

Для измерения величины поверхностного натяжения, капилляр (1) с помощью микровинта (2) опускают до касания исследуемой суспензии. Подключенный к капилляру (1) компрессор (3) служит для создания избыточного давления. Чтобы формирование пузырька проходило в равновесных условиях, устанавливают краном (4) небольшую скорость подачи газа. Затем фиксируют величину максимального давления по величине подъема жидкости в трубке микроманометра (5). Для определения давления использован микроманометр ММН–2400 с изопропиловым спиртом в качестве рабочей жидкости.

Как уже было сказано в обзоре методик измерения поверхностного натяжения, используемый стеклянный капилляр должен иметь строго круглую форму, а они при уменьшении диаметра часто имеют эллипсовидную форму. Поэтому проводился отбор трубок с помощью оптического компаратора ИЗА–2 [149]. Для ещё большей точности измерения величины поверхностного натяжения капилляр кроме круглой формы также должен быть заточен под нож (рисунок 2.39).

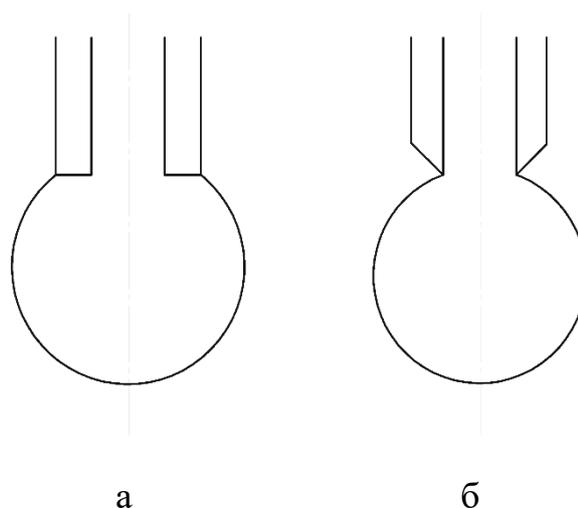


Рисунок 2.39 – Схема капилляра для измерения ПН: а – капилляр не заточен; б – капилляр заточен под 45°

Для сравнения результатов поверхностного натяжения суспензий ЛВМ был взят плавленный кварц одного вида (ПКП) фракцией менее 40 мкм фирмы «Родонит» (г. Санкт-Петербург) химического состава, представленного в таблице 2.8 [150].

Таблица 2.8 – Химический состав ПКП фирмы «Родонит» [150]

Химический элемент	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO
Содержание, %	99,8	0,02	0,015	0,005	0,005	0,005

Для приготовления суспензии были взяты разные связующие, для того чтобы сравнить результаты измерений поверхностного натяжения. Вместо классического этилсиликата для исследования был взято готовое связующее ГС–20 (с массовой долей  $\text{SiO}_2$  17–21 %) для того, чтобы избежать трудоемкой операции гидролиза [151].

Среди водных связующих отечественного производства был выбран Армосил АМ который является универсальным связующим, его характеристики приведены в таблице 2.9 [52]. Также было взято ещё одно кремнезольное связующее Сиалит–20, которое выпускается ЗАО «Силикат» в г. Елабуга.

Таблица 2.9 – Физико-химические показатели Армосил АМ [52]

№	Показатель	Значение
1	рН, ед. рН	9,5...10,5
2	Кинематическая вязкость, сСт, не более	10
3	Краевой угол смачивания, не более, град.	45

Следующим связующим был выбран Ludox SK (содержание  $\text{SiO}_2$  около 25 %), которое поставляется на территорию России английской фирмой Remet. На сайте производителя описано, что его основное преимущество в том, что это связующее сохраняет стабильный показатель рН от 4 до 7 единиц [152, 153]. Ещё водное связующее от компании Remet – это Remasol с содержанием  $\text{SiO}_2$  24 % и показателем рН 9 [154].

После проведения всех измерений на установке (рисунок 2.38) по уравнению (2.15), где мы пренебрегли величиной  $P_0$  из-за небольшой высоты погружения капилляра, были найдены значения ПН суспензии при разных концентрациях  $\text{SiO}_2$ :

$$\sigma = \frac{P_{\max} * r_{\text{кап}}}{2}, \quad (2.15)$$

где  $P_{\max}$  – максимальное давление;  $r_{\text{кап}}$  – радиус капилляра.

Также для сравнения с методом максимального давления в газовом пузырьке было проведено исследование поверхностного натяжения методом отрыва пластины Вильгельми.

По методике измерения Вильгельми металлическая пластинка шириной 10 мм погружается в суспензию. Пластинка покрывается слоем модельного состава, а угол смачивания фиксируется на чувствительную оптику.

### 2.2.2 Результаты измерений и выводы

Результаты измерения поверхностного натяжения суспензий, на основе наиболее часто используемых в литейном производстве связующих и различного содержания твердой фазы (плавленый кварц фирмы «Родонит»), измеренные методом максимального давления в пузырьке представлены на рисунке 2.40.

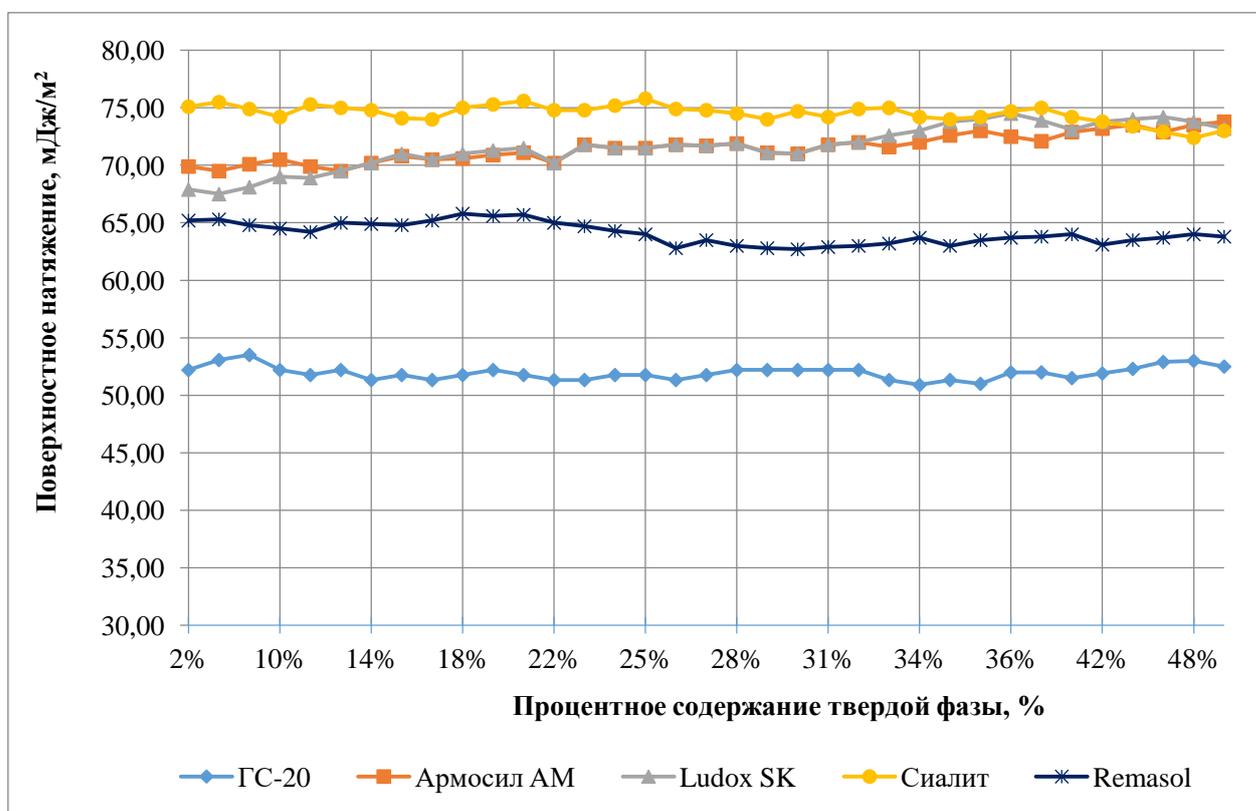


Рисунок 2.40 – Результаты измерения поверхностного натяжения методом наибольшего давления в пузырьке на разных связующих

Из графика на рисунке 2.40 видно, что поверхностное натяжение исследуемых суспензий, как водных, так и на основе этилсиликата, существенно не изменяется с увеличением количества твёрдой фазы и зависит только от природы связующего раствора. Хорошо прослеживается, что связующие на водной основе имеют более высокие показатели ПН по сравнению с классическим связующим на основе этилсиликата.

Одновременно следует отметить, что поверхностное натяжение суспензий на всех связующих не зависит от количества твердой фазы в широком диапазоне. Вероятно, это происходит из-за того, что твердые частицы не взаимодействуют со связующими и не являются поверхностно-активными веществами, выходящими в поверхностный слой. Очевидно, что поверхностный слой суспензий представляет собой монофазу связующего, именно с этим связано совпадение поверхностного натяжения суспензий с поверхностным натяжением связующего. Иными словами, поверхностное натяжение суспензии равно поверхностному натяжению жидкости, т.к. в поверхностном слое практически нет частичек, которые бы влияли на величину поверхностного натяжения и, в целом, меняется слабо.

В литературе также отмечается, что в случае гидрофильных частиц  $\text{SiO}_2$  величина поверхностного натяжения почти постоянна и не зависит от концентрации частиц [126]. Авторы утверждают, что зависимость поверхностного натяжения от концентрации частиц возможна в случае гидрофобных частиц, тогда как для гидрофильных частиц ее изменение незначительно. Это связано с тем, что большая часть гидрофобных частиц остается внутри пузырька и их межфазная концентрация очень велика, тогда как большая часть гидрофильных частиц осталась в растворителе, а

их поверхностная концентрация незначительна и поэтому существенных изменений на поверхности пузырьков не происходит. Также авторы отмечают, что следует учитывать то, что на величину поверхностного натяжения существенно влияет метод измерения [155, 156].

Дальнейшие измерения проводились методом отрыва пластинки Вильгельми, чтобы впоследствии сопоставить эти величины. Результаты измерений методом пластины Вильгельми представлены на рисунке 2.41 в виде графика.

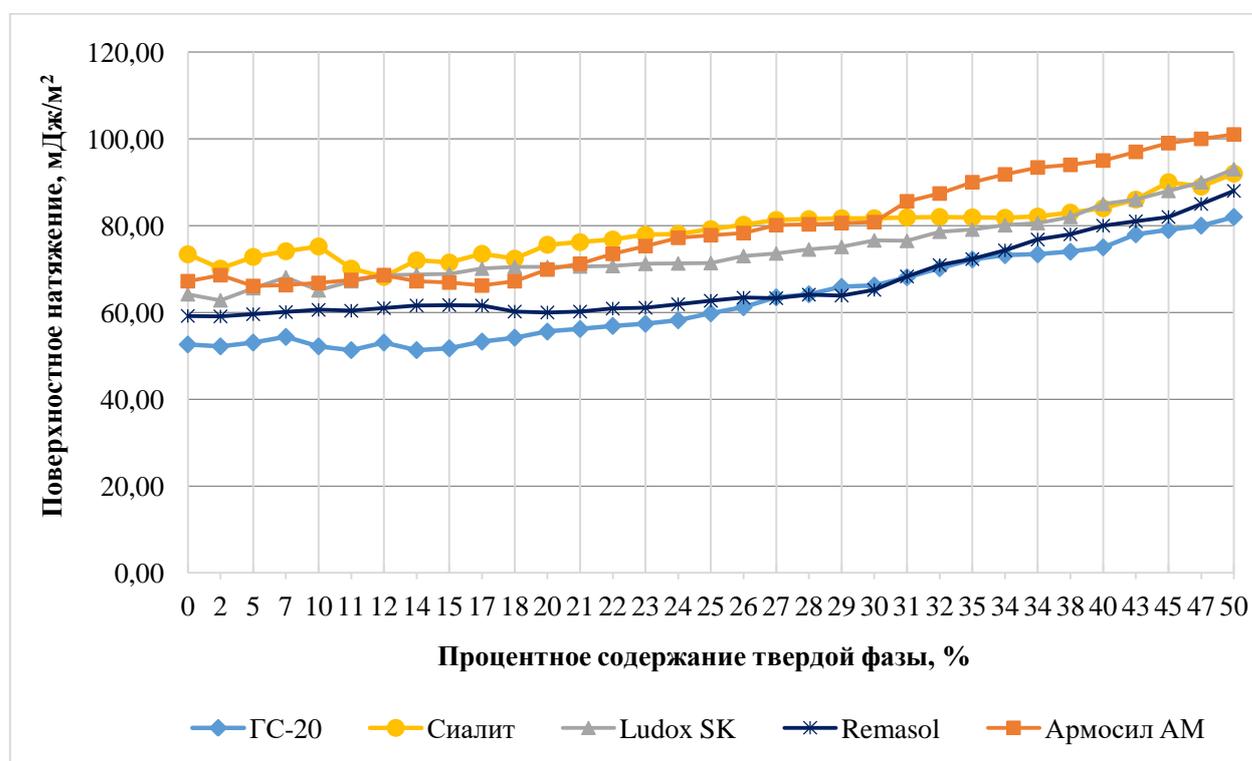


Рисунок 2.41 – Результаты измерения поверхностного натяжения методом отрыва пластины Вильгельми на разных связующих

При использовании метода отрыва пластины Вильгельми в момент времени, когда краевой угол становится большим, появляется расхождение с результатами измерения методом максимального давления газа в пузырьке (рисунки 2.40 – 2.41). Появление такой неточности было описано в монографии Н. К. Адама [143].

Метод Вильгельми, по мнению [140] даёт очень большую неточность при измерении сил поверхностного натяжения связующих на водной основе, вследствие большого угла смачивания модельных составов.

В целом исходя из исследования величины поверхностного натяжения двумя методами можно отметить, что седиментация не оказывает большое влияние на результат, что, по-видимому, связано с короткой длительностью эксперимента, не позволяющей развиться заметной седиментации.

Это отражает реальные условия использования суспензии в литейных цехах, т.к., не смотря на длительное нахождение её в баках, в них всё-таки происходит интенсивное перемешивание, и заметная седиментация также не наблюдается.

### **Выводы к 2 главе**

1. Значение величины вязкости суспензий ЛВМ долгое время остаётся вопросом, которому привлечено внимание многих ученых и технологов в литейных цехах ЛВМ. Оптимальное значение вязкости суспензии для получения качественной отливки находится в диапазоне 40–60 сек.

2. На вязкость суспензии влияет удельная поверхность частиц, их форма и размеры, а также характер взаимодействия частиц в связующем при различной концентрации. В связи с различием этих характеристик в огнеупорных наполнителях различных производителей необходимо использовать свой рецепт.

3. Из-за появления на отечественном рынке большого количества новых модельных составов и связующих, процессы смачивания и растекания изучены довольно слабо. После проведения ряда опытов было

обнаружено, что при растекании в вязком режиме краевые углы смачивания остаются небольшими, но в дальнейшем возникает резкий рост значений из-за торможения жидкости вследствие появления на периметре смачивания «кофейных колец» из огнеупорного наполнителя, которые искажают краевой угол смачивания.

4. Установлено, что после торможения движения суспензии дальнейшее растекание происходит в результате движения связующего сквозь пористое препятствие, образовавшееся на периметре смачивания. В результате возникает неоднородность распределения наполнителя по поверхности модели; при малом содержании наполнителя механические свойства керамической оболочки снижаются, что приводит к дефектам.

5. На основании литературных данных изучение поверхностного натяжения суспензии проводилось двумя методами: наибольшего давления в пузырьке и методом отрыва пластины Вильгельми, для того чтобы избежать заметного влияния седиментации частиц наполнителя.

6. Измерение поверхностного натяжения методом наибольшего давления в пузырьке показало, что поверхностное натяжение суспензии не зависит от массовой доли огнеупорного наполнителя и соответствуют значениям поверхностного натяжения связующего.

7. Измерение поверхностного натяжения методом отрыва пластины Вильгельми показало, что значения, полученные при измерении методом наибольшего давления в пузырьке при введении частиц до 15 % практически совпадают. Однако при дальнейшем увеличении количества частиц твердой фазы поверхностное натяжение, измеренное методом Вильгельми начинает расти примерно на 15–20 %, вследствие возникновения большого краевого угла смачивания, вызванного эффектом «кофейных колец».

### 3 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОРМ ДЛЯ ЛВМ

#### 3.1 Измерение ТКЛР материалов керамической оболочки ЛВМ

При производстве отливок методом ЛВМ одним из самых распространенных дефектов является растрескивание формы, которое происходит как при вытопке модельной массы, так и при прокатке форм. Образование трещин часто приводит к снижению прочностных свойств керамической оболочки, а в некоторых случаях и к её полному разрушению.

Возникновение напряжений связано, в основном, с различием коэффициента термического расширения между керамической оболочкой и модельной массой, и возникновением полиморфных превращений компонентов керамической формы, что характерно при использовании, в качестве, основного материала природного кварца. Кроме того, при использовании природного кварца для обсыпки слоев суспензии при прокатке наблюдается растрескивание керамической оболочки из-за разности термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) природного и аморфного  $\text{SiO}_2$ , образовавшегося при затвердевании связующего. При использовании в качестве обсыпочногo материала плавленогo кварца, образование такого дефекта при прокаливании маловероятно, об этом, в частности, свидетельствует очень низкая газопроницаемость форм из плавленогo кварца. Однако, разрушение керамической оболочки не исключается при вытопке модельной массы и заливке металла в форму. Поэтому изучение величин термического расширения как формы, так и её компонентов, становится чрезвычайно актуальным.

Следует отметить, что знание ТКЛР необходимо для того, чтобы правильно спроектировать литейную оснастку, т.к. для получения более точных размеров отливки необходимо учитывать показатели ТКЛР материалов, которые используются при изготовлении керамической литейной формы.

Механизм теплового расширения твердых тел рассмотрен академиком Я. И. Френкелем. Он рассматривал двухатомную модель твердого тела, где один атом закрепленный, а второй – подвижный. Подвижный атом будет совершать тепловые колебания вокруг некоторого положения равновесия. В реальных твердых телах при комнатной температуре отклонение атомов от положения равновесия, обусловленное тепловым движением составляет 5–10 % постоянной решетки, т. е. измеряется сотыми долями. Совершенно очевидно, что если бы межатомные силы, удерживающие атом в положении равновесия, были пропорциональны смещению от положения равновесия, то никакого теплового расширения не было бы [157].

Иными словами, тепловое расширение любого твердого тела определяется характером взаимодействия между частицами, из которых это тело состоит. Степень изменения объема либо линейных размеров характеризуется коэффициентом теплового объемного (или линейного) расширения при нагревании тела на 1 градус [158].

Как уже было сказано ранее в диссертационном исследовании, одним из основных требований к огнеупорным материалам для оболочковых форм является низкий коэффициент теплового линейного расширения и отсутствие полиморфных превращений при нагревании и охлаждении. На рисунке 3.1 представлены ТКЛР огнеупорных материалов, применяемых в ЛВМ.

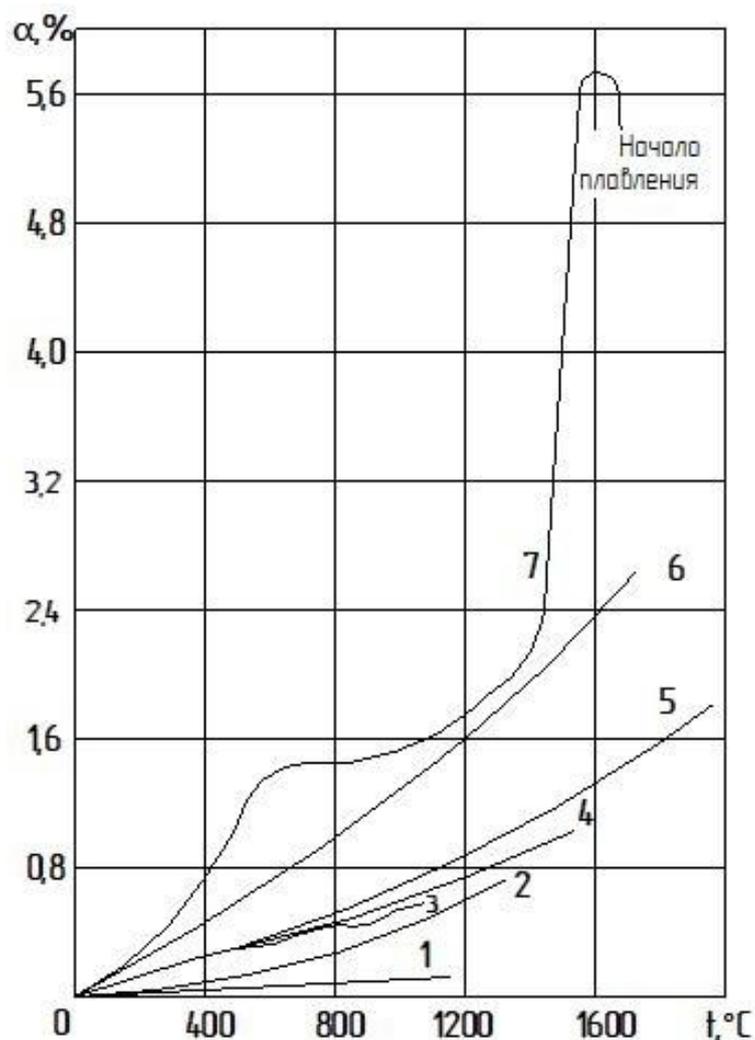


Рисунок 3.1 – ТКЛР некоторых огнеупорных материалов [22]: 1 – плавленый кварц, 2 – циркон, 3 – шамот, 4 – силлиманит, 5 – электрокорунд, 6 – магнезит, 7 – кристаллический кварц

Из рисунка 3.1. видно, что кристаллический кварц при нагревании претерпевает ряд полиморфных превращений, из которых наиболее существенное происходит при температуре 573 °С и сопровождается изменением объема на 2,4 % [159, 160]. Как было показано выше, это является причиной образования в оболочках трещин и, как следствие, повышенного брака отливок [24]. Изменение объема компонентов керамической оболочки обуславливает снижение геометрической точности

отливок. Таким образом многие производства, занимающиеся процессом ЛВМ переходят на огнеупорный наполнитель в виде плавленного кварца.

В литературных источниках имеется достаточно данных о КТЛР различных огнеупорных материалов (электрокорунд, плавленный кварц, кварцевый песок и т.д.) [21, 22, 25, 161–163] (рисунок 3.1).

Сведения же о ТКЛР огнеупорных керамических форм встречаются крайне редко. Хотя ТКЛР литейной формы для ЛВМ оказывает существенное влияние на процессы выплавки модельного состава, на режимы прокали и температуру заливки. Кроме того, по значениям ТКЛР формы можно судить о ее способности с высокой точностью воспроизводить геометрические размеры будущих отливок [159]. Тепловое расширение огнеупорных материалов вызывает температурные напряжения, приводящие к растрескиванию оболочек [162].

Величина коэффициента ТКЛР зависит от строения вещества и прочности химических связей. У материалов с очень прочными связями, такими как у аморфного кварца, этот коэффициент имеет низкие значения. Из вышесказанного ясно, что ТКЛР зависит от строения материала, но только в том случае, если твердая фаза является непрерывной. Если же материал состоит из слабосвязанных зерен, которые обладают в структуре определенной свободой, или если в материале имеются ориентированные трещины, то его ТКЛР может зависеть от размера и формы частиц, степени их сцепления, изотропности или анизотропности [22].

Для определения ТКЛР силикатных материалов используются прямые (абсолютные) и косвенные (относительные) методы с помощью соответствующих приборов. При использовании абсолютных методов измеряется непосредственно значения ТКЛР исследуемых материалов. Относительные же методы основаны на том, что ТКЛР измеряется относительно ТКЛР материала из которого изготовлено

дилатометрическая ячейка [158]. Приборы для измерения ТКЛР называются дилатометрами.

К косвенным методам измерения ТКЛР относятся рентгеновский метод, метод двойной нити и поляризационно-оптический метод. К прямым или абсолютным методам измерения ТКЛР относятся такие методы, в которых изменение длины образца в заданном интервале температур фиксируется непосредственно в опыте [164].

В данном исследовании измерение зависимости удлинения образцов из монолита плавленного кварца, используемого в качестве исходного сырья для получения огнеупорных порошков, и образцов, вырезанных из керамической оболочки от температуры, проводилось на дилатометре «Linseis L75VD1600C» (рисунок 3.2), оснащённом индуктивными датчиками перемещения, на образцах длиной ~ 10 мм в атмосфере аргона со скоростью нагрева 3 °/мин [165]. Внешний вид образца из плавленного кварца на рисунке 3.3.



Рисунок 3.2 – Внешний вид дилатометра «Linseis L75VD1600C»



Рисунок 3.3 – Образец для исследования ТКЛР из монолита плавленного кварца

Схема измерительной ячейки dilatометра представлена на рисунке 3.4. Использовались держатели из плавленного кварца и проставки из оксида алюминия для предотвращения возможности взаимодействия образцов с держателями.

Параллельно на дифференциальном dilatометре проводилось измерение удлинения кварцевого эталона, что позволило рассчитать удлинение образцов из плавленного кварца и керамической оболочки. Для этого из величины измеренного удлинения исследуемого образца вычиталось измеренное удлинение кварцевого эталона и прибавлялось табличное значение расширения кварцевого эталона по формуле (3.1) [165]:

$$dL = dL_{\text{обр. изм}} - dL_{\text{эт. изм}} + dL_{\text{эт}}, \quad (3.1)$$

где  $dL$  – реальное термическое расширение исследуемого образца, мкм;  $dL_{\text{обр. изм}}$  – измеренное термическое расширение образца, мкм;  $dL_{\text{эт. изм}}$  – измеренное термическое расширение эталонного образца (в нашем

случае кварца), мкм;  $dL_{\text{эт}}$  – реальное термическое расширение эталонного образца в соответствии его сертификатом термического расширения, мкм.

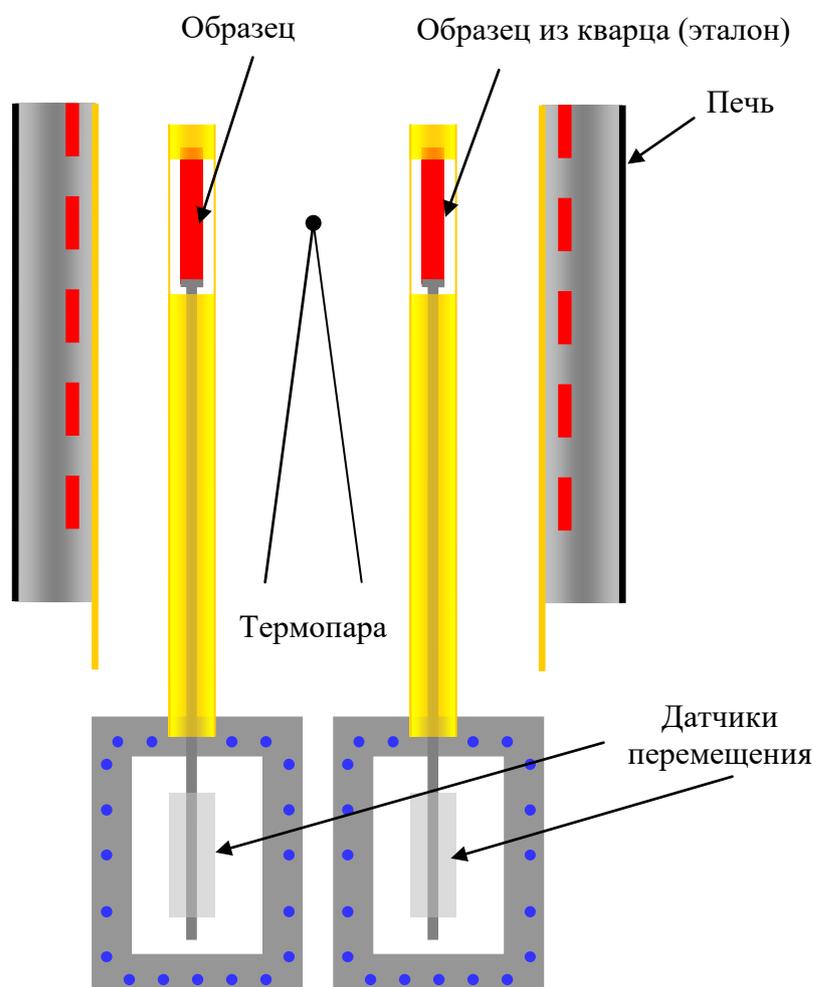


Рисунок 3.4 – Схема измерительной ячейки дилатометра «Linseis L78VD 1600C» [152]

Для первого исследования по определению ТКЛР были взяты образцы из монолита плавленного кварца, который выступает в качестве сырья для дальнейшего размола до разных фракций, фирм-производителей: ООО «Родонит», ООО «Кефрон» и ОАО «ДИНУР» [166].

После определения реального термического расширения исследуемого образца его удлинение было поделено на начальную длину для получения данных о зависимости относительного удлинения ( $dL/L_0$ ) от

температуры (здесь  $L_0$  – длина образца при комнатной температуре, мкм) и получен график зависимости на рисунке 3.5.

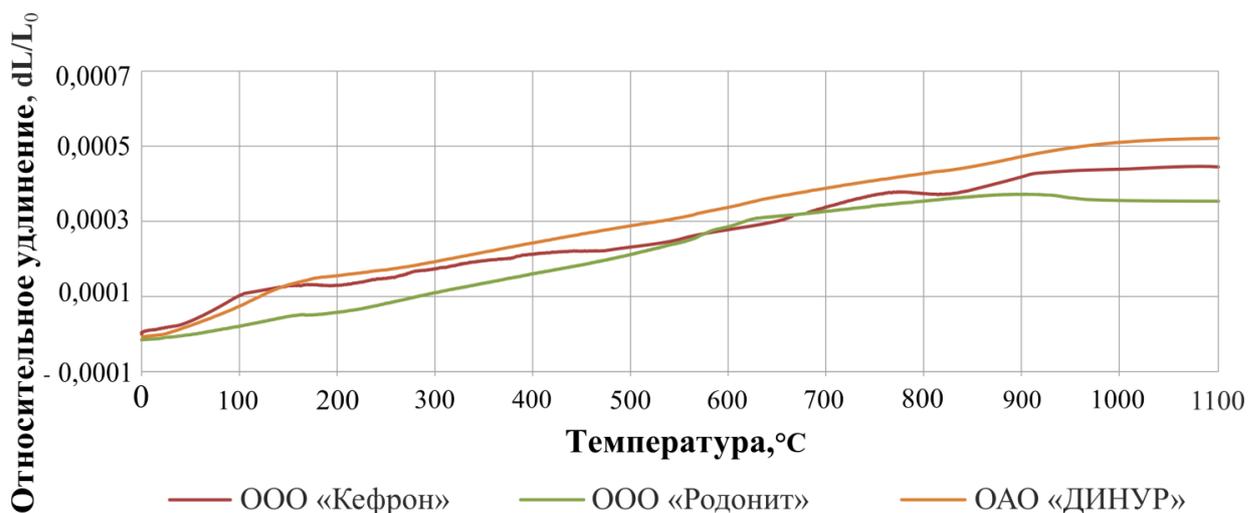


Рисунок 3.5 – Зависимость относительного удлинения ( $dL/L_0$ ) образцов из монолита плавленного кварца разных фирм-производителей от температуры

Исходя из графика 3.5, можно сделать выводы о незначительном расширении образцов, изготовленных из чистого плавленного кварца, которое пренебрежимо мало и находится в диапазоне погрешности оборудования.

Далее было проведено исследование с образцами, изготовленными из керамической оболочки, созданной на основе огнеупорного наполнителя из плавленного кварца разных фирм ООО «Родонит», ООО «Кефрон» и ОАО «ДИНУР». Эти керамические оболочки были созданы из суспензии вязкостью в 50 сек, далее они были прокалены при температуре около 900 °C (рисунок 3.6).

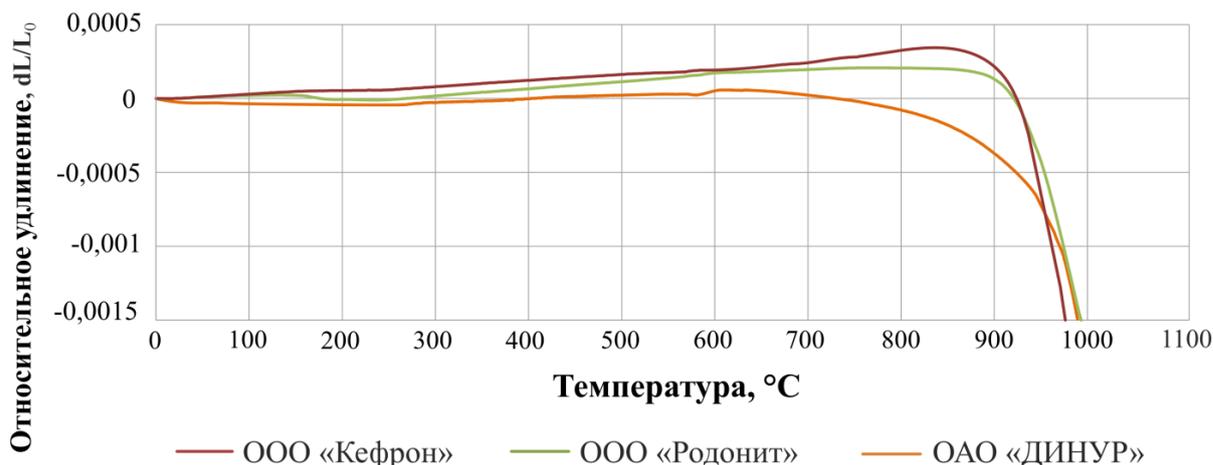


Рисунок 3.6 – Зависимость относительного удлинения ( $dL/L_0$ ) образцов из керамической оболочки разных фирм-производителей от температуры

Из графика 3.6 видно, что образцы, изготовленные из керамической формы ЛВМ, претерпевают сжатие после определенной температуры, которая совпадает с конечной температурой прокали формы. Для того чтобы подтвердить обнаруженную закономерность, были проведены исследования с образцами, изготовленными из керамической оболочки трех разных фирм, но с температурой прокали этих форм около 1100 °C (рисунок 3.7).

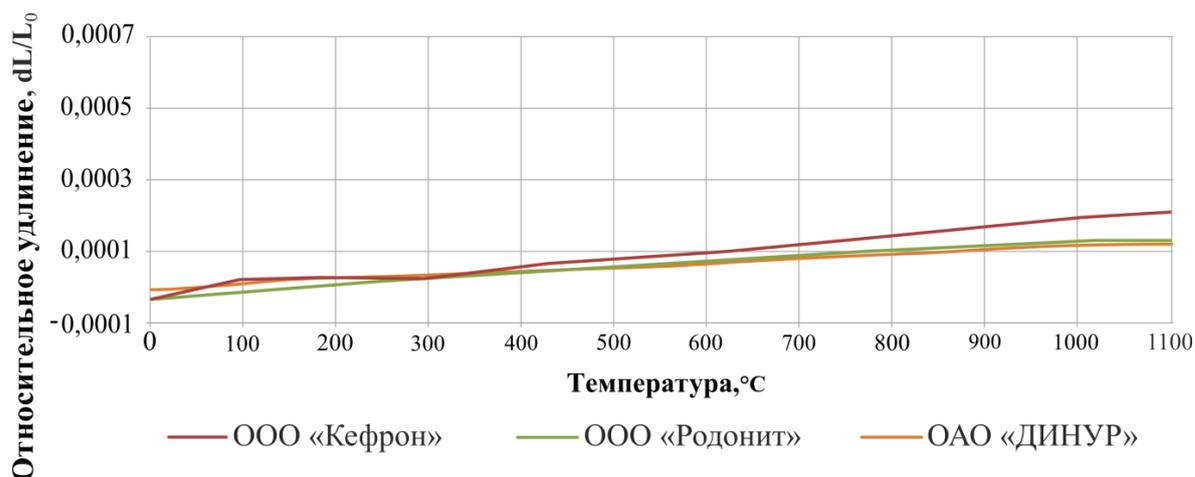


Рисунок 3.7 – Зависимость относительного удлинения ( $dL/L_0$ ) образцов из керамической оболочки разных фирм-производителей от температуры прокаленных при 1100 °C

По графикам видно, что те образцы, которые подвергались прокалке при меньших температурах, всё-таки склонны к небольшой усадке (рисунок 3.6). После прокалки при 1100 °С усадки практически нет, следовательно, керамическая оболочка является более стабильной. Поэтому для отливок, требующих более точных размеров, рекомендуется проводить прокалку при 1100 °С.

### **3.2 Измерение теплопроводности и теплоёмкости материалов керамической оболочки ЛВМ**

Теплопередача является сложным процессом и для изучения этого процесса его разделяют на простые явления: теплопроводность, конвекция и излучение. Теплопроводностью называется перенос теплоты (или внутренней энергии) при непосредственном соприкосновении тел (или частей тела) с разной температурой. Другими словами, если в твердом теле, жидкости либо газе температура в различных точках неодинакова, то тепло переносится от участков с более высокой температурой тела к участкам с более низкой [167].

Теплофизические свойства литейной формы оказывают существенное влияние на процесс формирования отливки. Зная значения теплопроводности и теплоёмкости керамической оболочкой формы, можно влиять на дальнейшее качество готовой продукции. Подобный подход позволяет с достаточной точностью прогнозировать усадочные процессы, в том числе формирование различных литейных дефектов, а также особенности макро- и микроструктуры получаемых отливок и, как следствие, уровень их механических свойств [168–169]. В настоящее время в сфере проектирования литейной технологии активно развивается направление по компьютерному моделированию процессов литья.

Имеющиеся данные по теплофизическим свойствам, в особенности, керамической оболочки для метода ЛВМ достаточно скудны. Чаще всего эти данные носят справочный характер и являются характеристиками материала в чистом виде [170–173]. Также большая часть исследований касается теплофизических свойств сплавов [174–176].

Интерес к измерению теплофизических свойств плавленного кварца, в частности, теплопроводности и теплоемкости, определяется широким применением этого материала, не только как огнеупорного наполнителя для керамических оболочек ЛВМ, но и, например, в качестве стандартного образца для измерений [177]. Также интерес к изучению плавленного кварца основывается на стабильности его свойств в широком диапазоне температур (от низких до  $\approx 1500$  °C).

Также авторы отмечают, что измерение теплофизических параметров плавленного кварца является сложным, и экспериментальные данные могут различаться, в зависимости от метода измерения, геометрических параметров образцов и химического состава. Поэтому данные о теплопроводности и теплоёмкости являются объектом для дискуссий у исследователей [178]. Различия между данными о теплопроводности у разных исследователей составляют порядка 10 % и эти различия могут увеличиваться с ростом температуры [179, 180]. Зачастую сравнивать результаты разных авторов, не зная особенности изготовления образцов и особенности их установок бывает очень затруднительно. Особенно это касается прозрачных веществ, таких как плавленный кварц.

Сложность в измерениях аморфных веществ заключается в том, что в них существует два механизма переноса тепловой энергии – теплопроводность и излучение (другими словами лучистая составляющая переноса) [177–178, 168]. Лучистый перенос также возрастает при высоких температурах и расхождения в экспериментальных данных также

увеличиваются [181], но при исключении значений лучистой составляющей можно получить другие данные (рисунок 3.8).

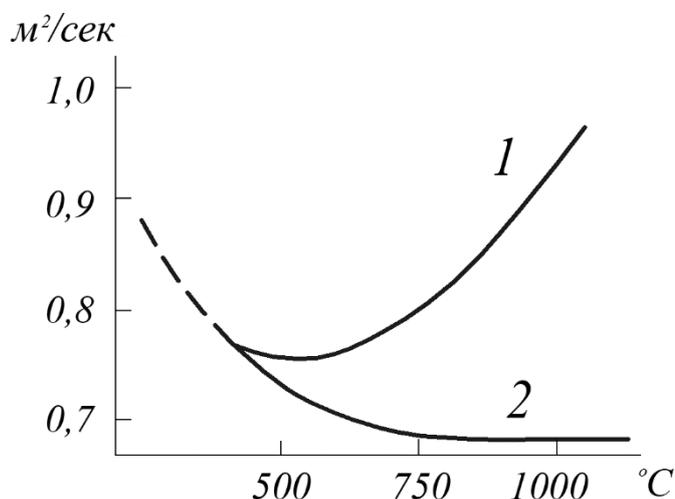


Рисунок 3.8 – Температуропроводность плавленого кварца при исключении излучения: 1 – эффективные значения, 2 – истинные значения после исключения лучистой составляющей [182]

Результаты измерения эффективной теплопроводности представлены автором показывают, что теплопроводность с ростом температуры увеличивается, в пределах от 1,5 до 3,0 Вт/(м·К). Измерения были проведены с помощью абсолютного стационарного методом плоского слоя. Перепад температур на образцах измерялся хромель-алюмелевыми термопарами, которые помещались в медные блоки нагревателя и холодильника вблизи поверхности и принятые меры позволили избавиться от влияния излучения на термопары [182].

Другими авторами также установлено [179–180, 183], что общей закономерностью огнеупорных кварцевых материалов является незначительный рост теплопроводности с ростом температуры. Это согласуется с теоретическими данными по температурной зависимости теплопроводности аморфных материалов. Установлено, что

теплопроводность в интервале температур 0–1000 °С составляет, в среднем, 1,0 Вт/(м·К), что соответствует литературным данным по теплопроводности кварцевой керамики с пористостью  $\leq 15\%$  [184].

Авторы, изучающие эффективную теплопроводность пористых стекол пришли к выводу, что чем более однородная структура у материала, тем большую теплопроводность он проявляет, а также явления конвекции и излучения имеет очень малые значения (при исследованных параметрах), и не учитываются в этих условиях [185].

Кроме того, по мнению автора наиболее важными характеристиками структуры, существенно влияющими на теплопроводность, являются пористость и кажущаяся плотность. Существует несколько специфических особенностей огнеупорных материалов, как объекта исследования теплофизических свойств, которые во многом определяют выбор методик измерения [186]:

1. Высокая температура эксплуатации (1200–1700 °С);
2. Существенная грубодисперсность и неоднородность структуры;
3. Сложность изготовления и подготовки образцов;
4. Эксплуатация в различных газовых средах, в том числе в вакууме;
5. Широкий интервал изменения состава и пористости материалов;
6. Неоднозначная характеристика образцов, вероятная зависимость теплофизических свойств от термической предыстории образца и методики измерений.

Для экспериментального определения теплопроводности твердого тела, в том числе и огнеупорных материалов, существуют различные методы измерения в зависимости от требуемого диапазона температур и типа материала. Все методы измерения теплопроводности можно разделить на две группы – стационарные (метод пластины, цилиндра, шара, эллипсоид) и нестационарные (методы монотонного нагрева,

температурных волн, начальных стадий теплового процесса лазерной вспышки и др.) [186–187].

В мировой практике наибольшее распространение получили приборы, основанные на стационарном абсолютном методе пластины с измерением потока тепла, проходящего через образец, при помощи калориметра [187–189]. Особенностью этого метода являются большие размеры и простота формы испытуемых образцов, что позволяет проводить испытания непосредственно на изделиях (кирпич, половина кирпича, несколько кирпичей нормального размера), но такие методы очень сложно применимы для адаптации их к керамическим оболочкам ЛВМ, ввиду их небольшой толщины.

Вторая группа приборов для стационарных методов основана на измерении теплового потока по мощности, которую выделяет электронагреватель. Реализация данного метода требует либо создания высокотемпературных адиабатических устройств, либо размещение нагревателя между двумя идентичными плоскими образцами. Недостатком установки является сложность создания одномерного симметричного температурного поля в верхнем и нижнем образце при испытаниях в газовых средах, именно по этой причине данный тип установок не получил пока распространения.

Наиболее широко при высокотемпературных исследованиях теплопроводности применяются методы полого цилиндра и шара (эллипсоида). Эти методы позволяют снизить погрешность, связанную с боковым теплообменом образцов. Стационарные методы характеризуются независимостью распределения температуры от времени, и теплопроводность определяется из результатов измерения теплового потока через образец и температурного градиента после достижения теплового равновесия [190].

Особенностью нестационарных методов является большое разнообразие краевых условий, а, следовательно, и различных вариантов методик измерения. В последние годы получил распространение нестационарный метод «нагретой нити» для исследования теплопроводности огнеупоров.

Сейчас более распространены методы монотонного нагрева, т.к. в этом методе можно определять не только теплопроводность материалов, а также комплекс теплофизических свойств (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость). Однако проанализировав погрешности был сделан вывод, что при высокотемпературных испытаниях более точно отдельно измерять температуропроводность, а теплопроводность уже рассчитывать на основе данных по теплоемкости, полученных другим методом.

При нестационарном методе распределение температуры в образце меняется со временем, и измерение скорости изменения температуры, определяющей температуропроводность [190]. Бесконтактный характер оптических измерений обладает большим преимуществом, т.к. исследование материалов, в том числе слоистых, проводится локально.

Как правило, оптические методы не требуют длительного времени для установления теплового равновесия. Лазерный источник света создает тепловой импульс, затем исследуется динамика распределения температуры в образце и таким образом определяется температуропроводность. Температуропроводность материала является важным тепловым параметром, определяющим скорость переходных процессов нагревания и охлаждения [191].

Теплопроводность затем вычисляют из температуропроводности, используя имеющиеся данные о плотности и удельной теплоемкости испытуемого материала [190, 192].

В данном исследовании был выбран метод лазерной вспышки, который относят к нестационарным методам. Этот метод в настоящее время получил широкое распространение, в связи со следующими достоинствами: высокая точность, минимизация затраченного времени на эксперимент, а также малые размеры исследуемых образцов, что очень важно для керамических оболочковых форм ЛВМ [193].

Сущность метода заключается в том, что на тыльную сторону образца подается импульс лучистой энергии, а с обратной стороны с помощью детектора регистрируется возмущение, вызванное изменением температуры. Однако, полученная информация является лишь значением температуропроводности. Следовательно, для того чтобы интерпретировать полученные данные, нужно воспользоваться методом Паркера (1961), рассчитав значения теплопроводности по формуле (3.2) [194]:

$$\lambda = a \cdot c_p \cdot \rho, \quad (3.2)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Измерения температуропроводности подготовленных образцов из плавленного кварца и керамической оболочки ЛВМ были выполнены на приборе лазерной вспышки «LFA 457 MicroFlash» фирмы Netzsch (Германия). Измерения проводились как на воздухе, что приближает к реальным условиям литейного цеха, так и в вакууме, что соответствует заливке ряда жаропрочных изделий для авиастроения в вакуумных печах.

Образцы были изготовлены размером 10x10 мм и толщиной от 1 до 5 мм, для точности исследований важна плоскопараллельность образцов. Поверхность образцов была покрыта слоем графита, что как показано в работе [195, 196] практически не сказывается на величине

теплопроводности (рисунок 3.9). Проводилось по три измерения на каждый образец.

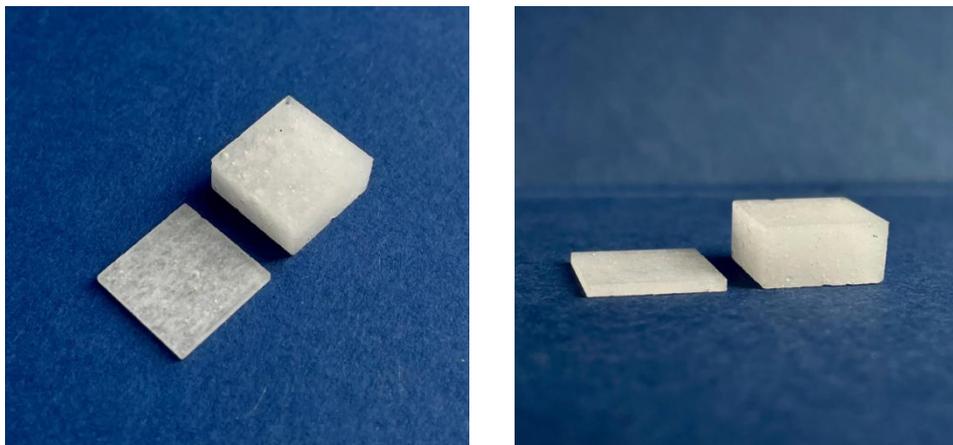


Рисунок 3.9 – Внешний вид образцов из чистого плавленного кварца для определения температуропроводности

Для расчета теплопроводности по формуле (3.2) также требуются значения теплоемкости. Удельная теплоемкость материала – это количество тепла, необходимое для повышения температуры единицы массы материала на 1 градус при постоянной температуре. Для определения теплоемкости материала методом дифференциальной сканирующей калориметрии необходимо провести три измерения: прогон с двумя пустыми тиглями, измерение удельной теплоемкости с использованием, например, сапфирового диска и, непосредственно, измерение образца [197].

Дифференциальная сканирующая калориметрия – это метод измерения теплового потока, связанного с физическими и химическими изменениями, происходящими в образце [198]. Преимущества этого метода заключается в небольших размерах образцов, а также широкий диапазон материалов, которые можно исследовать [198–199].

На результаты анализа дифференциальной сканирующей калориметрии имеют влияние некоторые факторы:

1. Тигель должен быть чистым и без каких-либо загрязнений.
2. Не рекомендуется использовать алюминиевый тигель при температурах выше 600 °С, поскольку чрезмерное измельчение образца до мелкого порошка может привести к ложным тепловым эффектам.
3. Использование высокой скорости нагрева или охлаждения обеспечивает более быстрые эксперименты, но это может привести к несоответствиям [200].

Теплоемкость образцов из плавленного кварца определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе синхронного термического анализа «Netzsch STA 449C Jupiter» (рисунок 3.10). Основными характеристиками прибора являются: скорость нагрева и охлаждения от 0,1 К/мин до 50 К/мин, используемая атмосфера, в которой происходят процессы, может быть инертной, окислительной, восстановительной, а также иметь статические либо динамические условия. Максимальная температура печи может достигать до 1500 °С. При измерениях использовался специализированный держатель образцов (рисунок 3.11) и платиновые тигли, куда помещаются эталон и образец.

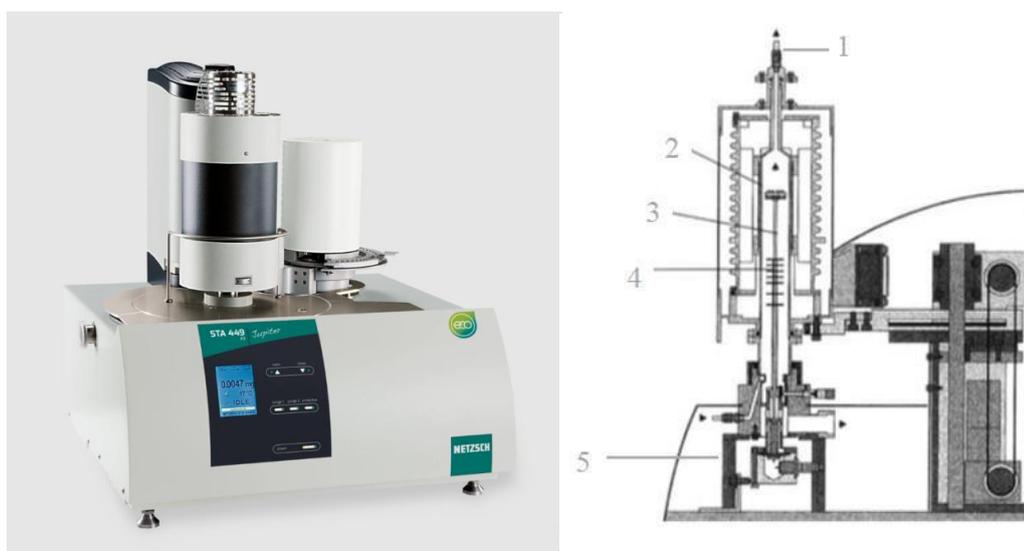


Рисунок 3.10 – Прибор синхронного термического анализа «Netzsch STA 449C Jupiter» [201]: а – внешний вид; б – схема: 1 – выходное отверстие

для газа, 2 – нагревательный элемент, 3 – держатель образца, 4 – радиационный экран, 5 – корпус

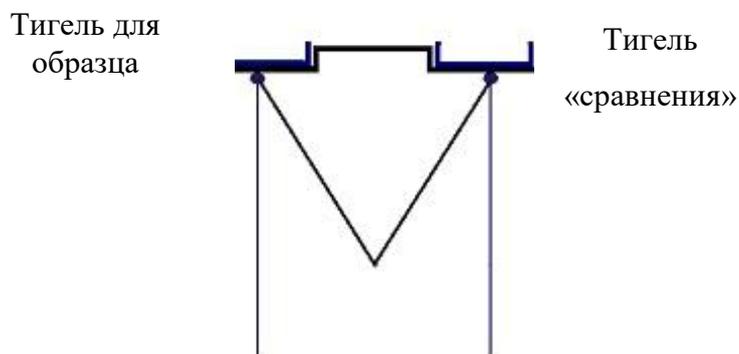


Рисунок 3.11 – Схема используемого держателя образцов прибора

Для построения графической зависимости теплоемкости исследуемых образцов из плавленного кварца от температуры последовательно реализовывались идентичные термические циклы с записью сигнала ДСК сапфира (эталона) и образцов из плавленного кварца (рисунок 3.12).

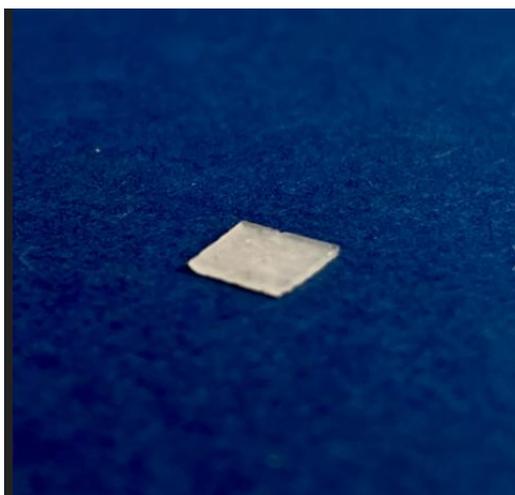


Рисунок 3.12 – Внешний вид образца для определения теплоемкости

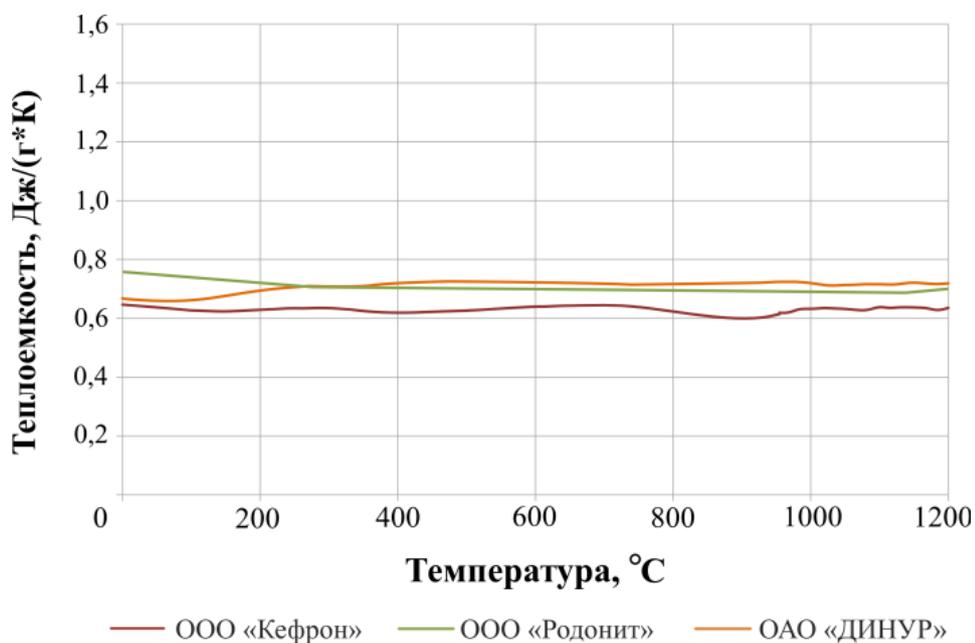
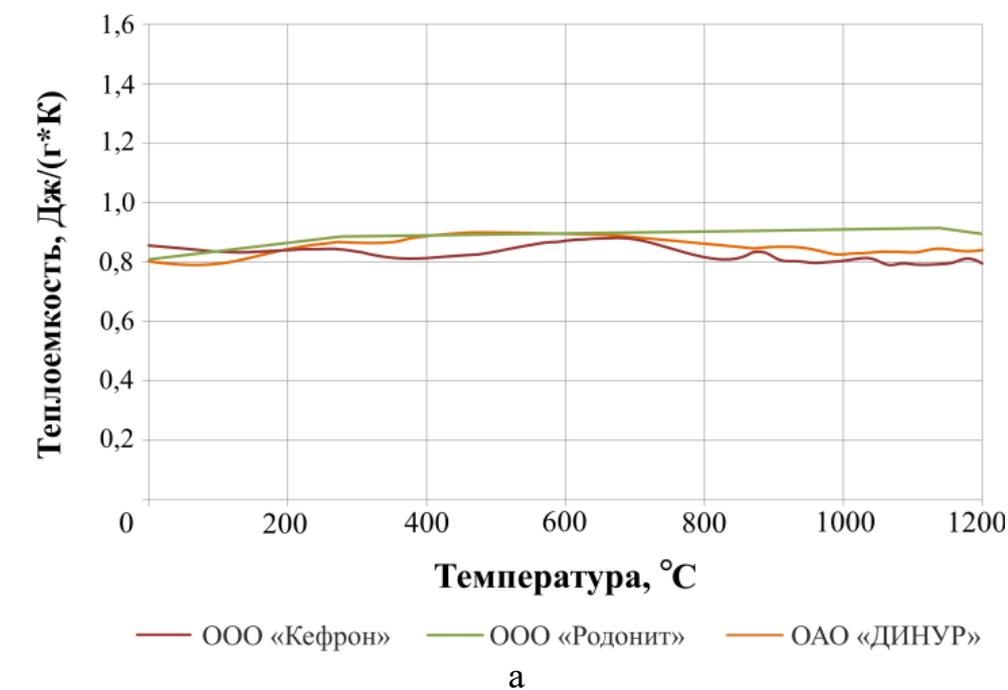


Рисунок 3.13 – Зависимость теплоемкости от температуры: а – образцов из монолитного плавленого кварца, б – образцов из керамической оболочки

Теплоёмкость является аддитивной величиной, т.е. при добавлении разного количества огнеупорного наполнителя в суспензию эти величины будут складываться. Но из-за того, что связующее на основе этилсиликата

при прокатке переходит в аморфное вещество, величина теплоёмкости сильно не меняется, что можно увидеть на рисунке 3.13.

В виду практически неизменной теплоёмкости формы ЛВМ и плавленного кварца, основной вклад в различие теплопроводности вносит плотность, которая используется в уравнении для расчёта теплопроводности.

Плотность найдена экспериментальным путём при помощи опыта с вытеснением жидкости по ГОСТ 473.4–81 [202]. Плотность плавленного кварца ( $\rho = 2,17\text{--}2,20 \text{ г/см}^3$ ); плотность формы ЛВМ ( $\rho = 1,50\text{--}1,52 \text{ г/см}^3$ ), также эти данные близки к значениям, приведенным в литературе [173].

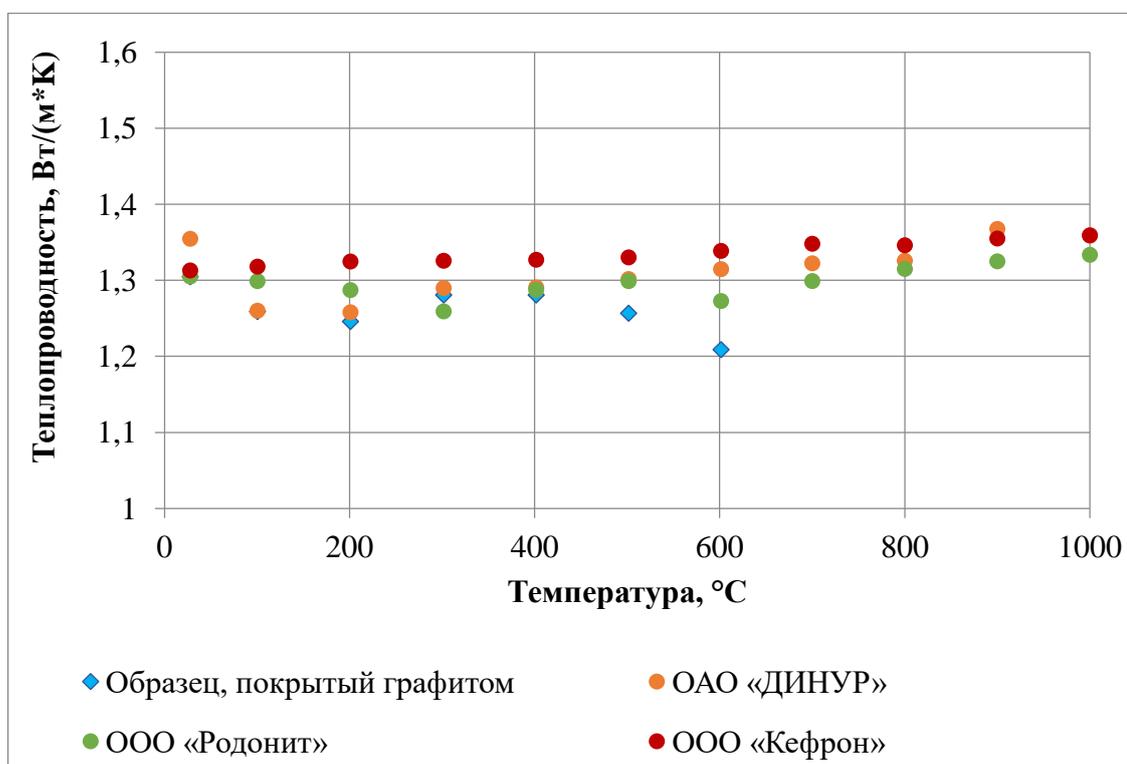


Рисунок 3.14 – Зависимость теплопроводности от температуры образцов из монолита плавленного кварца

На рисунке 3.14 приведены графики зависимости теплопроводности монолитных образцов из плавленного кварца трех производителей от температуры. Как уже было сказано ранее, для того чтобы исключить

вклад излучения при измерении температуропроводности плавленного кварца методом лазерной вспышки он был покрыт слоем графита. Но при температуре свыше 600 °С слой графита сгорает, что делает дальнейшие измерения величины температуропроводности чистого плавленного кварца практически невозможными из-за излучения. Аналогичный результат при измерении теплопроводности плавленного кварца были получены в работе [196].

Было решено покрыть образцы из чистого плавленного кварца тонким слоем титанистого корунда производства ОАО «ДИНУР» с химическим составом, приведённым в таблице 3.1. Он обладает более высокой термостойкостью и в отличие от обычного корунда имеет черный цвет, позволяющий также, как и углерод, поглощать излучение. Дальнейшие измерения образцов из монолита плавленного кварца были проведены с покрытием титанистым корундом (рисунок 3.14).

Таблица 3.1 – Химический состав титанистого корунда [203]

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	CaO, %	TiO <sub>2</sub> , %
~ 97,6	> 0,3	> 0,3	< 1,8

Были изучены образцы, вырезанные из керамических форм вышеуказанных производителей. Результаты представлены на рисунке 3.15. Видно, что теплопроводность керамической оболочки заметно меньше, теплопроводности монолитного плавленного кварца, что объясняется более рыхлой структурой керамической оболочки, образовавшейся в процессе полимеризации связующего. Об этом свидетельствует разница плотностей образцов из монолитного плавленного кварца и из керамической оболочки (примерно, на 30 %).

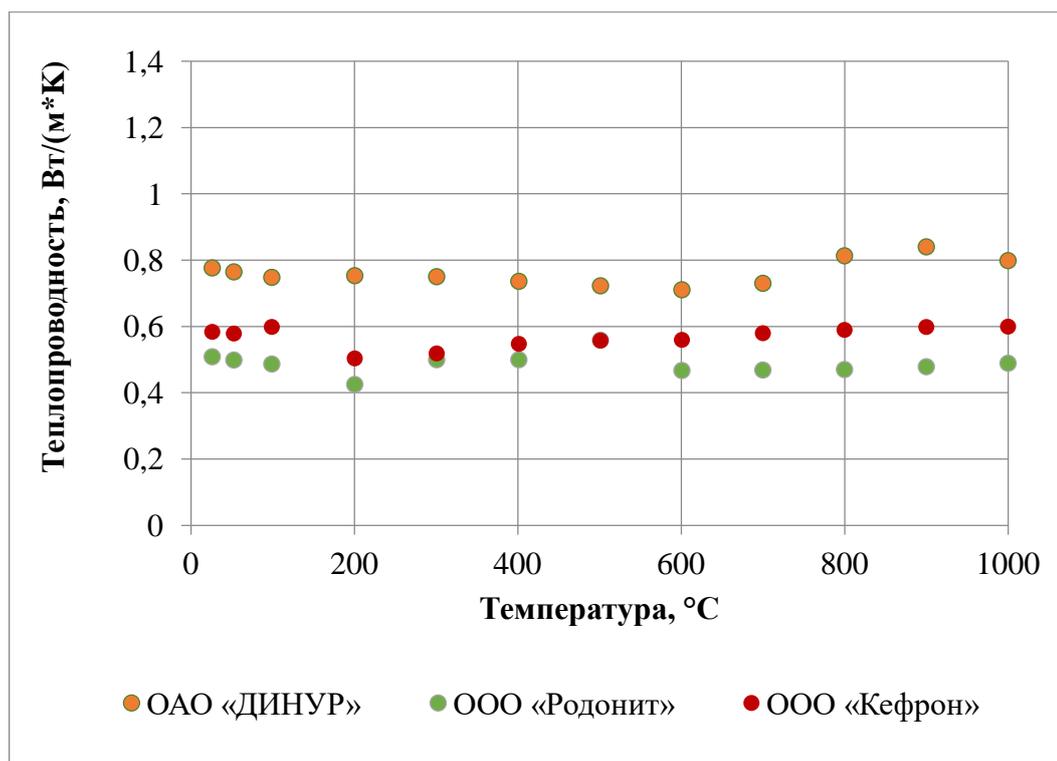


Рисунок 3.15 – Зависимость теплопроводности от температуры образцов из керамической оболочки ЛВМ

На основании полученных данных температуропроводности и расчетной полученной теплопроводности (рисунок 3.14 и 3.15) можно сделать уточняющие правки в справочные данные программ, используемых для моделирования процессов кристаллизации металла.

Полученные данные помогают уточнить расчёты моделирования тепловой задачи затвердевания металла в керамической оболочке ЛВМ. Из-за того, что данные в различных системах для моделирования таких задач (LVMFlow, ProCast) не учитывают особенности формы, а используют лишь справочные данные по материалам, из которых они изготовлены, такое уточнение внесёт существенное изменение в картину, полученную при моделировании. Действительно, на рисунке 3.16 представлены результаты затвердевания в системе ProCast стали марки 35Л в керамическую оболочку из плавленного кварца с теплофизическими

свойствами, представленными в библиотеке программы и полученные нами экспериментальными значениями.

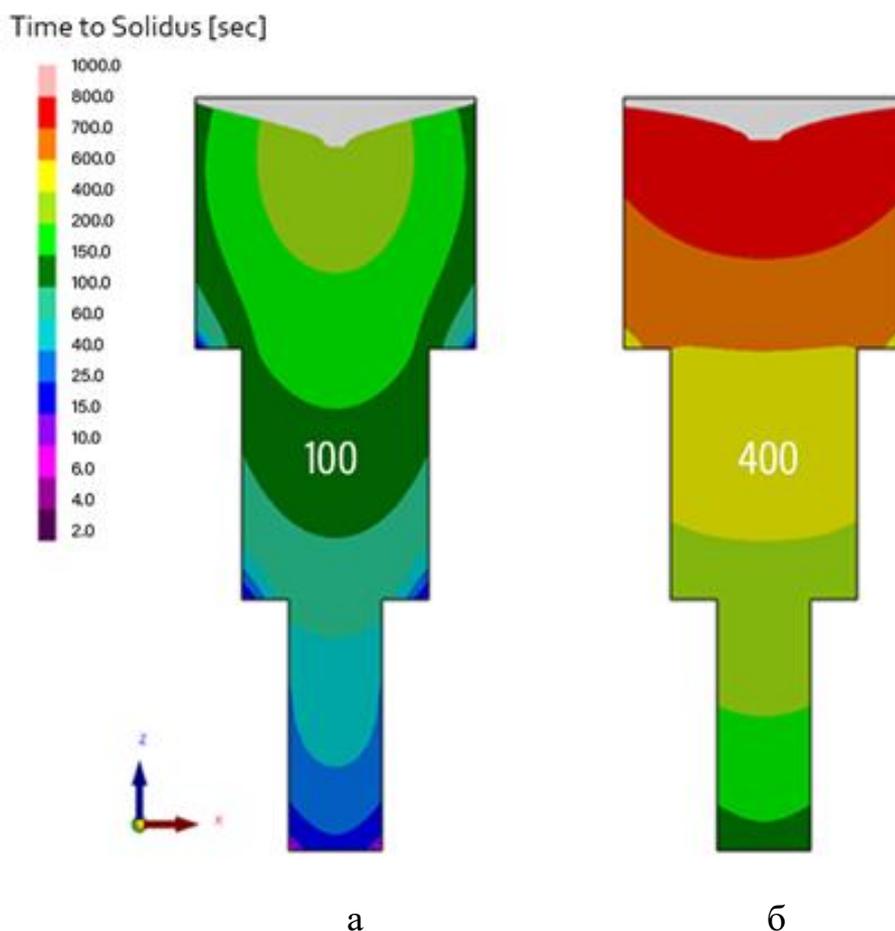


Рисунок 3.16 – Результаты моделирования времени затвердевания: а – данные, представленные в библиотеке программы, б – данные, полученные экспериментально

Из представленных данных (рисунок 3.16) хорошо видно, что полученные результаты по времени затвердевания отливки с данных по умолчанию (а) и данные, полученные после корректировки по экспериментальным данным (б), имеют достаточно сильные отличия. Области, закристаллизовавшиеся по изначальным данным 15–20 с в сравнении с экспериментальными, начинают кристаллизоваться только на 100 с. Такое отличие в получаемых результатах моделирования, заставляет

переосмыслить подход к использованию программ для моделирования литейных процессов и вводить более корректные исходные данные.

### Выводы к главе 3

1. Изучено влияние температуры на относительное удлинение в диапазоне от 0 до 1100 °С образцов из монолита плавленного кварца и образцов изготовленных из керамической формы из плавленного кварца, прокаленных при разных температурах. Установлено, что в указанном диапазоне температур удлинение образца из монолита плавленного кварца меняется пренебрежимо мало (0,01 %). Показано, что удлинение образцов из керамической формы зависит от температуры её предварительной прокали. При нагреве образца выше температуры предварительной прокали происходит заметная усадка и сжатие керамической оболочки, что может привести к снижению точности размеров отливки. При предварительной прокалке керамических форм выше 1100 °С эффект снижения размеров не наблюдается, что позволяет рекомендовать увеличение температуры прокали форм на основе плавленного кварца от 900 до 1100 °С для отливок сложной конфигурации.

2. В диапазоне температур от 0 до 1200 °С теплоёмкость всех изученных материалов частиц различных фирм, присутствующих на рынке России, изменяется в узком диапазоне значений от 0,8 до 0,9 Дж/(г\*К).

3. Теплопроводность составляет 1,25–1,35 Вт/(м\*К) для монолитных образцов и 0,4–0,8 Вт/(м\*К) для образцов, изготовленных из керамической оболочки.

4. Полученные данные теплофизических свойств заметно отличаются от данных заложенных в библиотеке программ Pro Cast, LVM Flow для моделирования процессов затвердевания отливок в керамической оболочке ЛВМ. Использование уточненных теплофизических свойств в

расчетах позволяет более точно спрогнозировать свойства и дефекты в отливках точного литья.

## 4 КОРРЕКЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

### 4.1 Общая характеристика используемой технологии

Влияние структурно-чувствительных свойств суспензии на образование брака на отливках по вине керамической оболочки изучалось в промышленных условиях в литейном цехе № 13 на предприятии ООО «ЛП УБМ» (пгт. Верхние Серги), где изготавливаются отливки из стали марок 25Л, 35Л, 35Л, 50Л, 40Х, 12Х18Н10Т и чугунов марок СЧ20, СЧ40, а также высокохромистых чугунов ЧХ28Н2 и ЧХ16. В течение последних пяти лет на производстве несколько раз менялись огнеупорные наполнители, используемые для формирования керамической оболочки ЛВМ.

Первоначально все керамические оболочки производились на маршалите Люберецкого месторождения в качестве наполнителя и обсыпочногo материала. В 2019 г. с увеличением сложности конфигурации отливок потребовалось использовать другой огнеупорный материал – плавленный кварц. Первое время в качестве поставщика плавленогo кварца выступала компания ООО «Родонит», которая поставляла плавленный кварц китайского производства. Однако с введением санкций поставки прекратились и поставщиком стало местное предприятие ОАО «ДИНУР».

Эксперименты по внедрению в производство плавленогo кварца от предприятия ОАО «ДИНУР» проводились ещё с 2019 г., однако его качество проигрывало огнеупорному материалу фирмы ООО «Родонит», в основном, по качеству отсева и доле мелкой фракции. Но в 2022 г. плавленный кварц фирмы марки ПКП (50 мкм) ОАО «ДИНУР» оказался безальтернативным и потребовалось подстраивать технологический процесс к новым реалиям.

При введении новых огнеупорных материалов фирмы ОАО «ДИНУР» был обнаружен ряд проблем, приводящих к повышенному количеству дефектов, связанных с формообразованием. При использовании огнеупорных материалов от предприятия ОАО «ДИНУР» для приготовления суспензии по рецепту, отработанному ранее с плавленным кварцем от ООО «Родонит», не получалось создать литейную форму с требуемыми свойствами. Керамические оболочки имели дефектный формообразующий (лицевой) слой и не обладали достаточно механической прочностью для транспортировки, проковки и заливки.

В технологическом процессе в качестве модельного состава используется парафиностеариновая смесь в пропорции 1:1 (ПС 50–50). Для возврата модельного состава используется выплавление с помощью автоклава. После вытопки модельного состава керамические оболочки подвергаются обжигу без опорного наполнителя и складываются для дальнейшей заливки без подогрева в опорном наполнителе.

В качестве связующего на предприятии используется гидролизированный ЭТС–40 (таблица 4.1). Связующее ЭТС–40 гидролизовано по рецепту, используемому на предприятии и представленному в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Технологические характеристики ЭТС–40

Наименование показателя	Значение
Массовая доля SiO <sub>2</sub> , %	38–42
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	1,05–1,07
Кислотность, % (HCL)	0,015
Массовая доля тетраэтоксисилана, %	10–15

Таблица 4.2 – Рецепт гидролиза ЭТС–40

Наименование компонента	Содержание, %
ЭТС–40	50
Спирт изопропиловый	20
Ацетон	30
Соляная кислота 37,5 %	0,3 (сверх 100 %)
Дистиллированная вода	ЭТС x 0,08

Для приготовления гидролизованного раствора ЭТС–40 навески компонентов (ЭТС, спирт и ацетон) смешивают в мешалке в течение 10 мин, затем вливается, подкисленная соляной кислотой, вода. Далее в течение 30 мин полученный раствор нагревают до температуры 47–50 °С и выдерживают в течение 1,5 ч, затем охлаждают при постоянном помешивании до комнатной температуры и выстаивают в течение 8 ч. Срок жизни данного раствора составляет 72 ч.

В качестве обсыпочногo материала используется плавленый кварц фракции 0,3–0,4 мм для первых двух слоев, для последующих – 0,63–1,25 мм. Сушка каждого слоя производилась по режиму: аммиачный шкаф – 20 мин и сушка на воздухе – 20 мин.

Плавка металла на предприятии производится в индукционных тигельных печах марки ИСТ–0,25. Керамические оболочки перед заливкой прокаливаются без опорного наполнителя в камерной печи сопротивления ПВП 8.12.8/11,5 до температуры 900 °С в течение часа. Подогретые керамические оболочки выставляются в опорный наполнитель на заливочный плац, опорный наполнитель нагревается в процессе заливки металла. Заливка производится с поворотных крановых ковшей емкостью 70 кг и ручных ковшей меньшей емкости. После кристаллизации отливок керамическая оболочка разрушается на вибрационной решетке ИР–120. Отрезка литниковой системы производится вручную угло-шлифовальными

машинками SA5546R, для очистки отливок используется дробеструйные камеры «Contractor» (модель ECO 140P).

В производственной программе предприятия более 1000 наименований отливок. Большая часть отливок имеет низкий уровень брака, но наиболее прибыльные для производства отливки имеют сложную конфигурацию или высокие требования к качеству и потому уровень брака на них достаточно высок. Чертежи характерных отливок с повышенным уровнем брака приведены в Приложении А, а дефекты на них на рисунках 4.1 – 4.7.

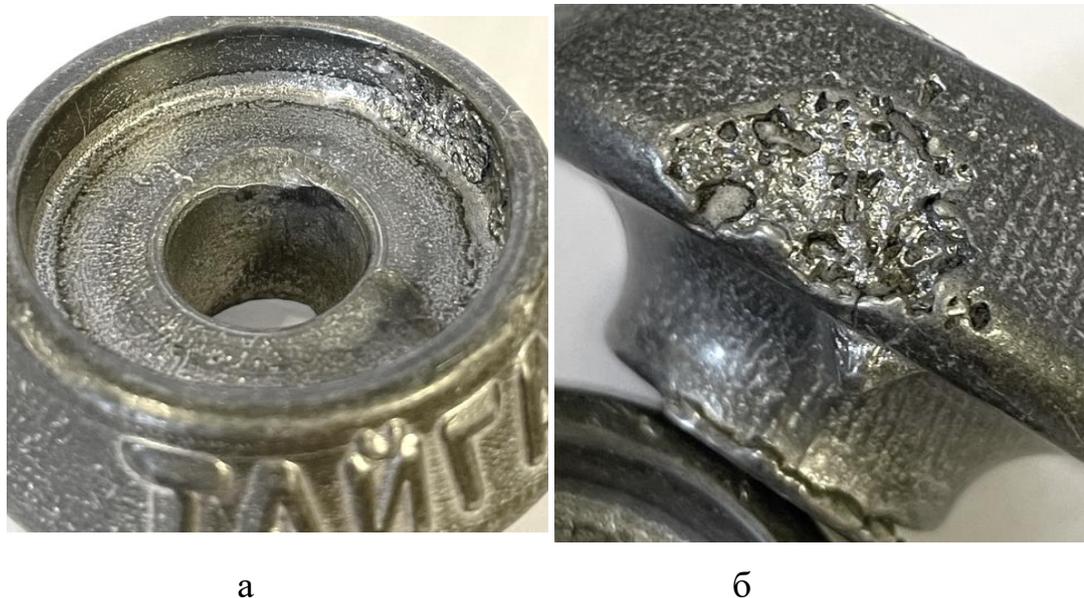


Рисунок 4.1 – Дефекты на отливке «Шайба Тайга»: а – пробой керамической оболочки, б – неметаллические включения



Рисунок 4.2 – Дефекты на отливке «Лопатка направляющая»



Рисунок 4.3 – Дефекты на отливке «Крышка корпуса»

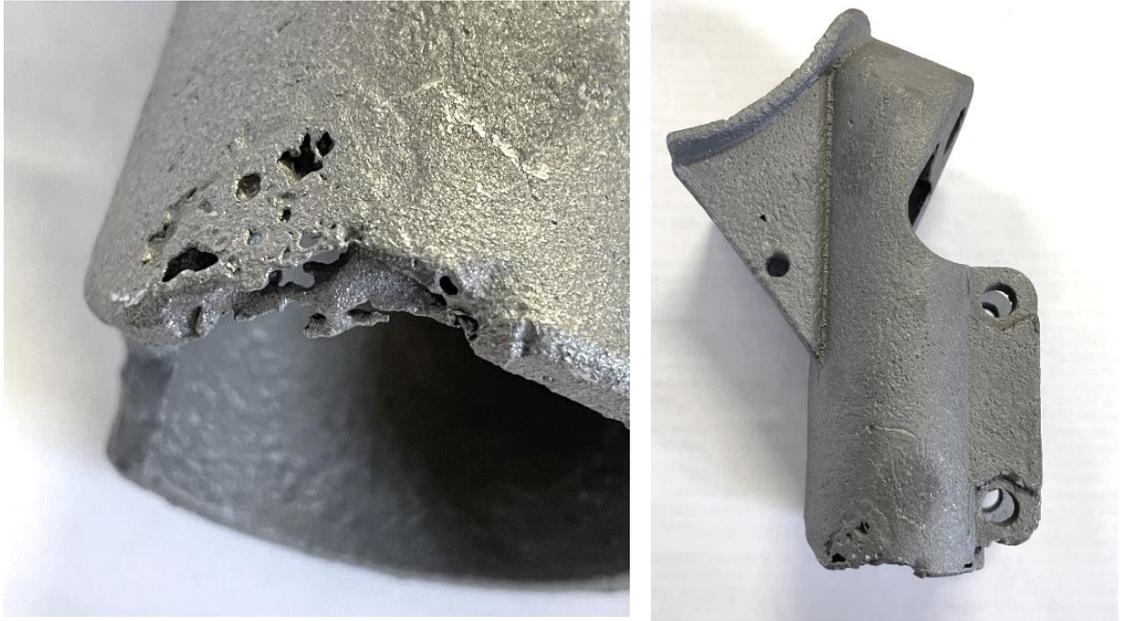


Рисунок 4.4 – Газовые дефекты на отливке «Кронштейн 14М»



Рисунок 4.5 – Дефекты поверхности на отливке «Опора»

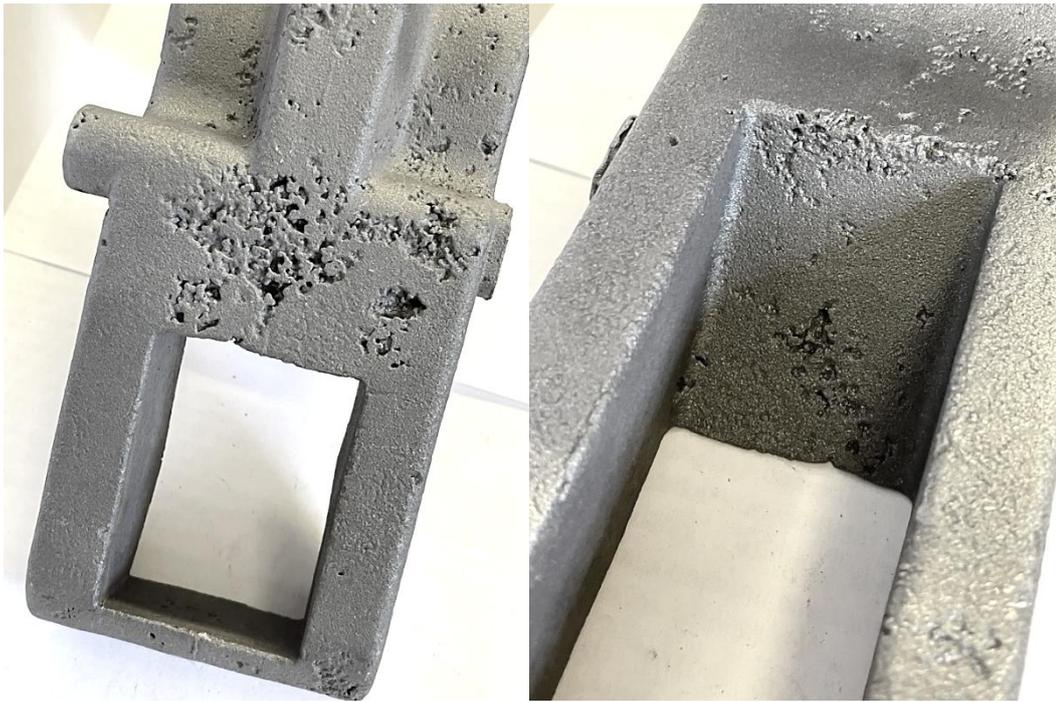


Рисунок 4.6 – Газовые дефекты на отливке «Челюсть»



Рисунок 4.7 – Дефекты на отливке «Наковальня»

Наиболее характерными видами брака являются неметаллические включения, разрушение керамической оболочки, газовые дефекты и «пробой».

## 4.2 Механизмы формирования дефектов

На основании изложенного ранее в диссертационном исследовании было выяснено, что значительная часть дефектов ЛВМ возникает как результат нарушений в структуре керамической оболочки. Первоначально был выяснен механизм образования такого дефекта, как неметаллические включения (рисунок 4.3).

Схема формирования неметаллических включений в отливке, с развитым рельефом, поднутрениями и острыми углами или гранями, обусловлена эффектом «кофейных колец» и представлена на рисунке 4.8. На первом этапе при растекании суспензии по восковой модели по окончании кинетического режима растекания при переходе в инерционный и вязкий режимы, течение суспензии замедляется за счёт формирования на периметре смачивания препятствия. На периферии скапливается большое количество частиц плавленного кварца, особенно, это хорошо прослеживается в высоковязких суспензиях, изготовленных на основе огнеупорных наполнителей с большим количеством мелкой фракции менее 5 мкм.

Впоследствии на следующем этапе в поднутрения, находящиеся за периметром кольца, сформированного из частиц огнеупорного наполнителя, проникает суспензия, сильно обеднённая по наполнителю, т.е. практически связующее в чистом виде, которое при сушке формирует агломераты мелкодисперсных частиц в поднутрениях.

На последнем этапе при заливке керамической оболочки металлом тонкая хрупкая стенка, состоящая практически из одного связующего, зачастую разрушается, что приводит к заливкам тонких поднутрений (рисунок 4.1), а также неметаллическим включениям в них, состоящих из частиц плавленного кварца (рисунок 4.1).

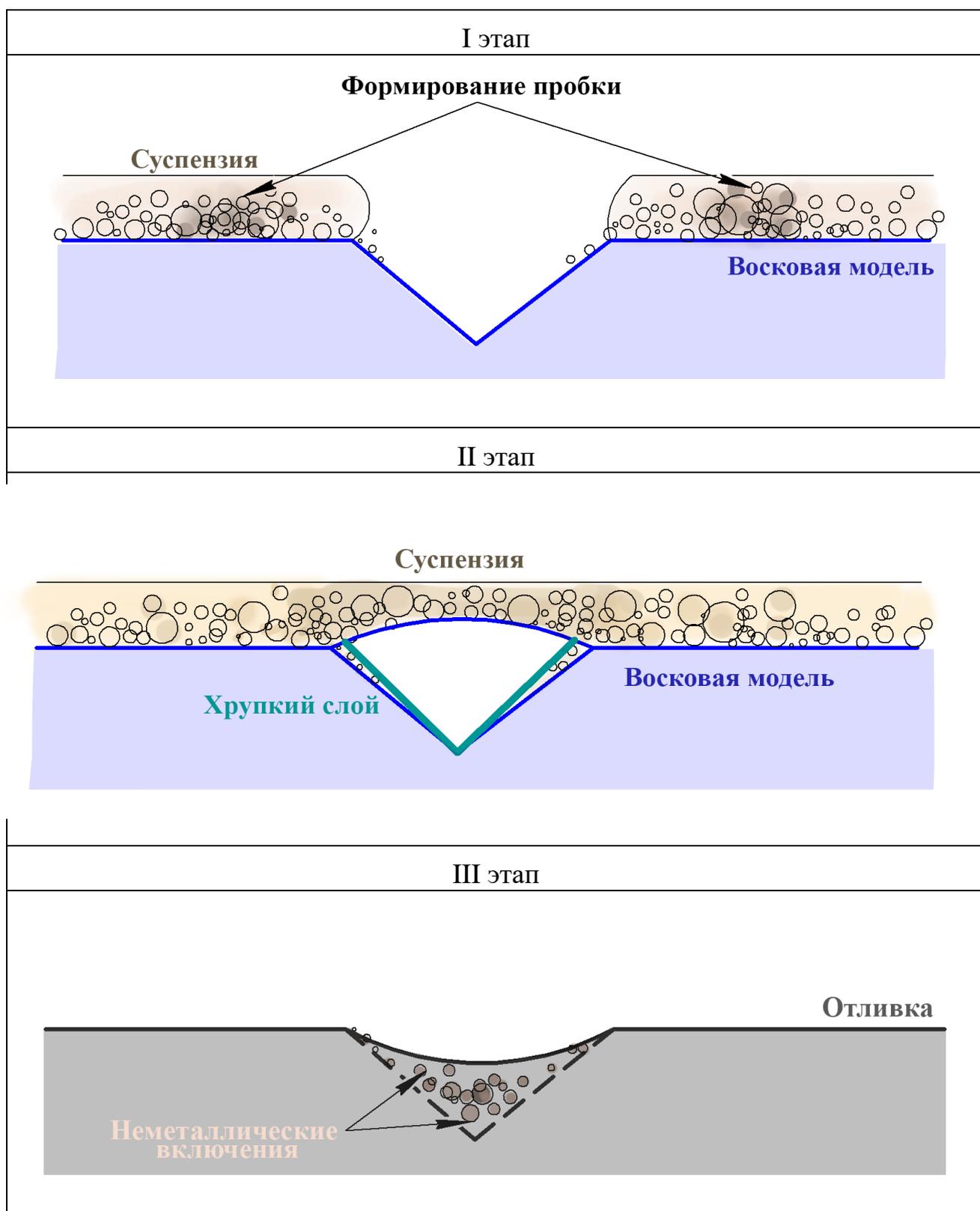


Рисунок 4.8 – Механизм образования дефекта

При обнаружении данного дефекта методом борьбы с ним является предотвращение образования «пробок» наполнителя при растекании суспензии, для чего требуется снизить долю наполнителя.

Следующий дефект по вине керамической оболочки, распространенный на предприятии ООО «ЛП УБМ» – это «пробой», проявляющийся, наоборот, при низкой вязкости суспензии и различием между краевыми углами смачивания суспензии по отношению к наполнителю и восковой модели (рисунок 4.9).



Рисунок 4.9 – Дефект «пробой»: а – поверхность контактного слоя керамической оболочки, б – итоговая отливка

Общий механизм образования «пробоя» представлен в первой главе на рисунке 1.15. Такой дефект может быть возможен по нескольким причинам. Первое при недостаточной толщине контактного слоя суспензии на модели, т.е. низкой вязкости суспензии, например, в 20–30 сек зерна огнеупорного наполнителя при обсыпке последующего слоя будут «пробивать» лицевой слой. Второй вариант происходит также из-за недостаточной толщины слоя суспензии и вследствие того, что краевой угол смачивания суспензии по отношению к наполнителю будет выше, чем к материалу восковой модели, формируются пустоты, впоследствии

заполняемые расплавом. Методом борьбы с этим дефектом является повышение вязкости суспензии с увеличением доли наполнителя.

Как уже было сказано ранее, при увеличении толщины слоя огнеупорной суспензии могут формироваться газовые дефекты – газовые раковины и газовая пористость, а также недолив (недолив в ЛВМ обычно дефект газового происхождения), образующиеся вследствие снижения газопроницаемости из-за увеличенной толщины керамической оболочки. Методика борьбы с этим дефектом – уменьшение толщины керамической оболочки за счет снижения вязкости суспензии при уменьшении доли наполнителя. Наоборот, разрушение керамической оболочки обычно является следствием ее недостаточной толщины, и для предотвращения этой проблемы необходимо увеличивать вязкость суспензии увеличением доли наполнителя.

Таким образом, для предотвращения выявленных дефектов, использовались рекомендации, разработанные в главе 2–3 диссертации. Сущность рекомендаций – варьирование доли наполнителя в суспензии в рамках рекомендуемого диапазона в зависимости от типа дефекта. Результаты проведенной работы представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Методы устранения с дефектов на рисунках 4.1 – 4.7

Вид дефекта	Причина формирования	Методика предотвращения	Эффект
1. Отливка «Шайба Тайга»			
Неметаллические включения	Развитая поверхность в связи с эффектом «кофейных колец» приводит к разнородности содержания наполнителя в керамической оболочке по поверхности. Механизм формирования дефекта приведен ниже на рисунке 4.8.	Использование суспензии с минимальной долей наполнителя	Акт внедрения от 13.01.2025 г. (приложение Б) Сокращение брака на 46 %

Продолжение таблицы 4.3			
<b>2. Отливка «Лопатка направляющая»</b>			
Пробой	Недостаточная доля наполнителя в суспензии. Механизм образования подробно описан в подразделе 1.3 на 36 странице.	Повышение доли наполнителя в суспензии	Акт внедрения от 13.01.2025 г. (приложение Б) Сокращение брака на 51 %
<b>3. Отливка «Крышка корпуса»</b>			
Газовые дефекты	Газовые дефекты являются следствием значительной толщины керамической оболочки из-за высокой вязкости суспензии вследствие значительной доли наполнителя	Снижение содержания наполнителя суспензии в рамках допускаемого диапазона до 45%	Акт внедрения от 13.01.2025 г. (приложение Б) Сокращение брака на 36 %
Просечки (разрушение лицевого слоя в углах керамической оболочки)	Высокая вязкость суспензии в сочетании со сложной конфигурацией отливки привела к значительному увеличению толщины слоя на углах оболочки, что при напряжениях при прокатке привело к её разрушению.		
<b>4. Отливка «Кронштейн 14М»</b>			
Газовые раковины	Значительная толщина керамической оболочки из-за завышенной вязкости суспензии вследствие высокого содержания наполнителя	Снижение содержания наполнителя суспензии в рамках допускаемого диапазона до 45%	Акт внедрения от 13.01.2025 г. (приложение Б) Сокращение брака на 20 %
<b>5. Отливка «Опора»</b>			
Разрушение лицевого слоя керамической оболочки	Низкая прочность оболочки из-за недостаточной доли связующего в суспензии	Снижение содержания наполнителя суспензии в рамках допускаемого диапазона до 45%	Акт внедрения от Акта внедрения от 13.01.2025 г. (приложение Б) Сокращение брака на 17 %
<b>6. Отливка «Челюсть»</b>			
Газовые раковины	Значительная толщина керамической оболочки из-за завышенной вязкости суспензии вследствие высокого содержания наполнителя	Снижение содержания наполнителя суспензии в рамках допускаемого диапазона до 45%	Акт внедрения от 13.01.2025 г. (приложение Б) Сокращение брака на 20 %
Неметаллические включения	Низкая прочность оболочки из-за эффекта «кофейных колец»		

Продолжение таблицы 4.3			
7. Отливка «Наковальня»			
Разрушение керамической оболочки	Малая толщина керамической оболочки из-за низкой вязкости суспензии при простой конфигурации отливки	Повышение доли наполнителя в суспензии до 60%	Акт внедрения от 13.01.2025 г. (приложение Б) Сокращение брака на 18 %

### 4.3 Ретроспективный анализ брака

Внедрение разработанных рекомендаций по сокращению брака на предприятии позволило снизить не только брак на отдельных отливках, но и общий уровень брака на предприятии, причем в разрезе по конкретным видам брака: неметаллические включения (рисунок 4.10), пробой (рисунок 4.11), разрушение керамической оболочки (рисунок 4.12), газовые дефекты (рисунок 4.13) и недолив, который также можно отнести к дефектам, связанным со значительной толщиной керамической оболочки, создающей препятствие для эвакуации газов.

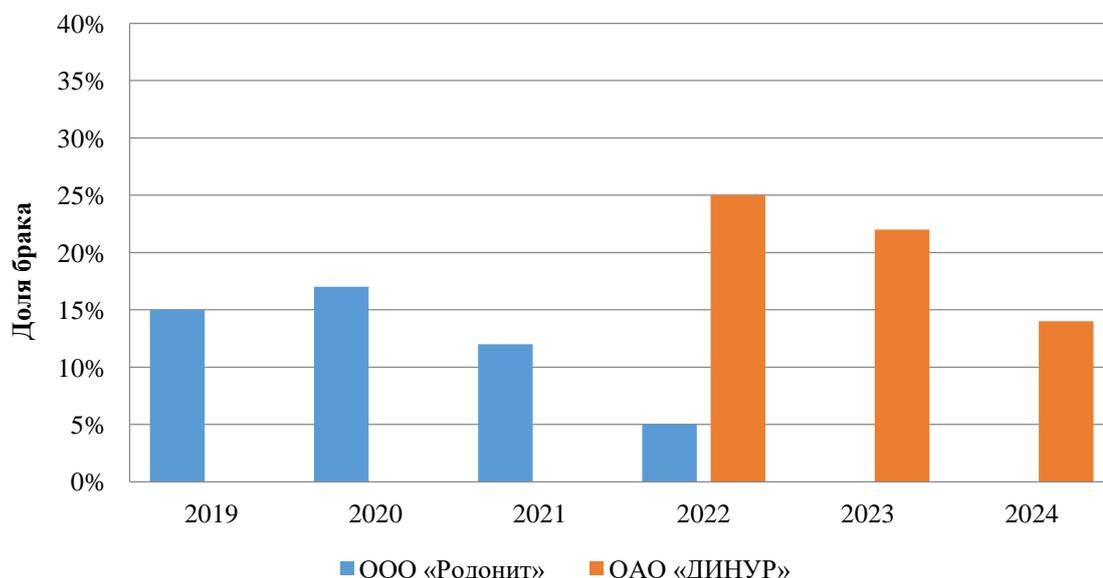


Рисунок 4.10 – Распределение по годам по дефекту неметаллические включения в отливках

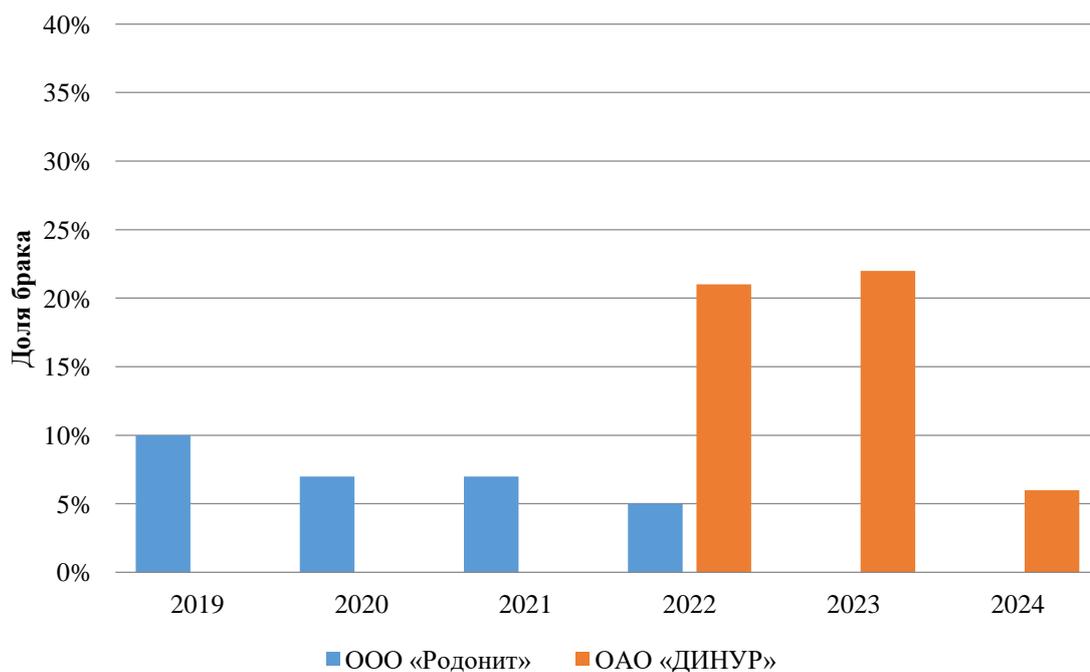


Рисунок 4.11 – Распределение по годам по дефекту «пробой»

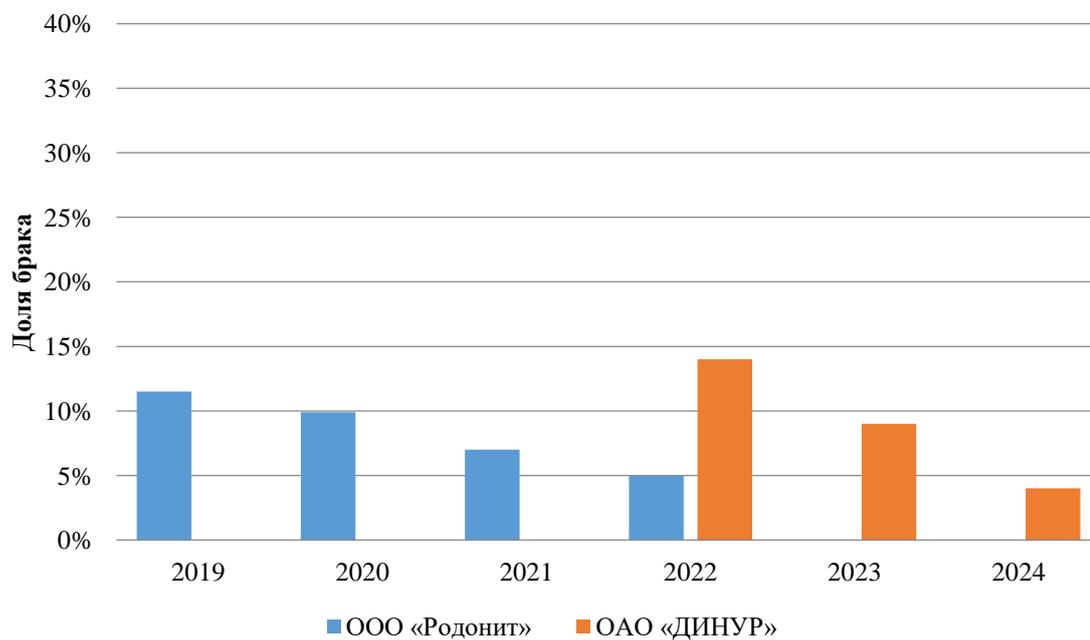


Рисунок 4.12 – Распределение по годам по дефекту разрушение керамической оболочки

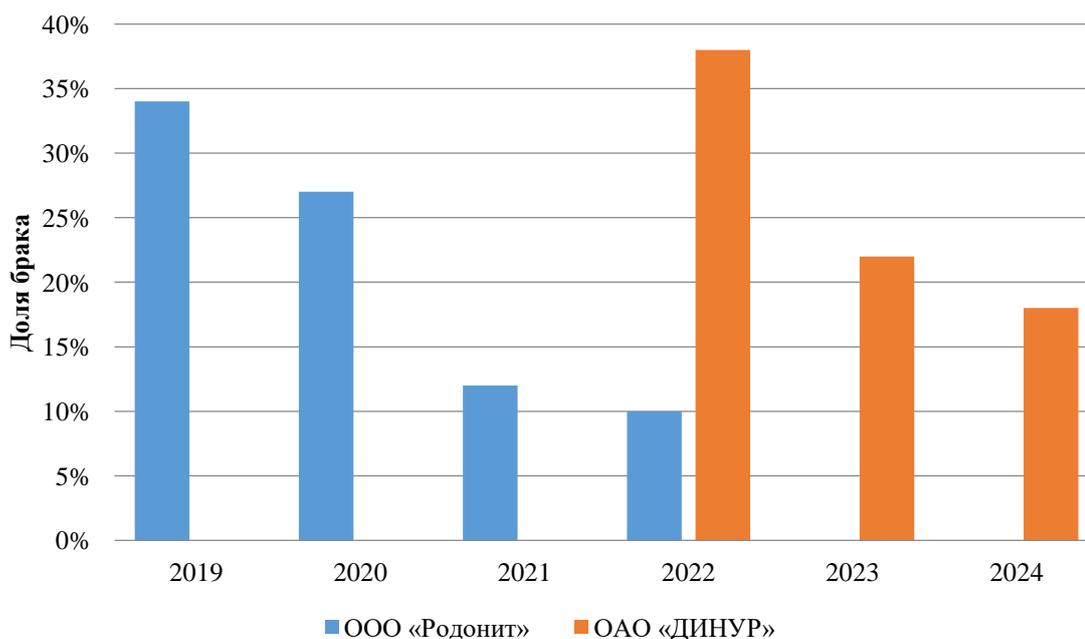


Рисунок 4.13 – Распределение по годам по газовым дефектам

Отличие плавленного кварца ОАО «ДИНУР» от ООО «Родонит» состоит в фракционном составе (глава 2). В плавленном кварце от ОАО «ДИНУР» большое количество мелкой фракции менее 5 мкм, что привело к повышению вязкости суспензии, а, следовательно, и заметному снижению газопроницаемости. Заметно повысилось количество брака по газовым раковинам и пористости, а также неметаллическим включениям, особенно на отливках со сложной рельефной поверхностью, что обусловлено эффектом «кофейных колец».

Как показывают гистограммы на рисунках 4.10 – 4.13 в результате внедрения рекомендаций по соотношению наполнителя и связующего в суспензии удалось снизить общий уровень брака, как в разрезе конкретных видов дефектов, так и, в целом, на предприятии ООО «ЛП УБМ». Достигнутый экономический эффект составляет 0,5 млн. Акт внедрения представлен в приложении Б.

#### **Выводы к главе 4**

1. Продемонстрирован механизм формирования неметаллических включений в отливках из-за эффекта «кофейных колец».

2. Проанализированы дефекты отливок на предприятии ООО «ЛП УБМ». Для предотвращения выявленных дефектов сформулированы рекомендации, сущность которых – варьирование доли наполнителя в суспензии в рамках рекомендуемого диапазона в зависимости от типа дефекта.

3. В результате внедрения рекомендаций удалось снизить общий уровень брака, как в разрезе конкретных видов дефектов, так и, в целом. Достигнутый на предприятии экономический эффект составляет около 0,5 млн руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационной работы были получены следующие научные и практические результаты:

1. Проведен анализ современного состояния ЛВМ и показано, что в настоящее время для реализации этого процесса используется большое количество новых материалов для изготовления керамических оболочек. Залогом получения качественных отливок является изучение формирования керамической оболочки на основе исследования структурно-чувствительных свойств суспензии (вязкость и поверхностное натяжение). Предложены гипотезы формирования дефектов, ассоциированных с керамической оболочкой.

2. Определено, что оптимальное значение вязкости суспензии для получения качественной отливки должно находиться в диапазоне 40–60 с по воронке ВЗ-4.

3. На вязкость суспензии влияет удельная поверхность частиц, их форма и размеры, а также характер взаимодействия частиц в связующем при различной концентрации. Определяющее значение для вязкости суспензии имеет доля пылевидной фракции (менее 5 мкм). Рекомендован диапазон варьирования доли наполнителя для каждого исследованного поставщика.

4. При растекании суспензии по подложке из модельного состава было обнаружено, что краевые углы смачивания сначала остаются небольшими, но в дальнейшем возникает резкий рост из-за торможения вследствие появления на периметре смачивания «кофейных колец» из огнеупорного наполнителя, которые искажают краевой угол смачивания. Установлено, что после торможения движения суспензии дальнейшее растекание происходит в результате фильтрации связующего сквозь

пористое препятствие, образовавшееся на периметре смачивания. В результате возникает неоднородность распределения наполнителя по поверхности модели; при малом содержании наполнителя механические свойства керамической оболочки снижаются, что приводит к дефектам.

5. Изучены углы смачивания суспензией различных модельных составов. Показано, что наилучшим смачиванием обладают суспензии на основе ЭТС, которые следует рекомендовать для получения отливок с высококачественной поверхностью.

6. Поверхностное натяжение суспензии не зависит от массовой доли огнеупорного наполнителя и соответствуют значениям поверхностного натяжения связующего. Поэтому единственным структурно-чувствительным свойством суспензии, позволяющим управлять формированием керамической оболочки, является вязкость.

7. Прокалка керамических оболочек при температуре 900 °С приводит к небольшой усадке (0,15 %), чего не наблюдается при прокалке при 1100 °С. Рекомендуется для отливок сложной конфигурации прокалку форм на основе плавленного кварца вести при температуре 1100 °С.

8. В диапазоне температур от 0 до 1200 °С теплоёмкость керамических оболочек, приготовленных на основе плавленного кварца, изменяется в узком диапазоне от 0,8 до 0,9 Дж/(г\*К). Их теплопроводность составляет 0,4–0,8 Вт/(м\*К). Полученные данные теплофизических свойств заметно отличаются от данных заложенных в библиотеках программ Pro Cast, LVM Flow для моделирования процессов затвердевания отливок в керамических оболочках. Использование уточненных теплофизических свойств в расчетах позволяет более точно спрогнозировать свойства и дефекты в отливках точного литья.

9. Проанализированы дефекты отливок на предприятии ООО «ЛП УБМ». Для предотвращения выявленных дефектов

сформулированы рекомендации, сущность которых – варьирование доли наполнителя в суспензии в рамках рекомендуемого диапазона в зависимости от типа дефекта.

10. В результате внедрения рекомендаций удалось снизить общий уровень брака, как в разрезе конкретных видов дефектов, так и, в целом. Достигнутый на предприятии экономический эффект составляет около 0,5 млн руб.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы исследования**

В рамках дальнейшей работы планируется сформулировать технические требования к плавленому кварцу для литейного производства, обеспечивающие минимальный уровень дефектности литья.

Полученные в диссертационной работе результаты показали перспективность данного направления для точного литья в керамические оболочки из плавленого кварца.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Дошкарж И. Производство точных отливок: перевод с чешского / И. Дошкарж, М. Гоушть, М. Павелка. – М. : Машиностроение, 1979. – 296 с.
2. Ефимов В. А. Специальные способы литья: справочник / В. А. Ефимов, Г. А. Анисович, В. Н. Бабич. – М. : Машиностроение, 1991. – 436 с.
3. Thoury M. High spatial dynamics-photoluminescence imaging reveals the metallurgy of the earliest lost-wax cast object / M. Thoury, B. Mille, T. Séverin-Fabiani, L. Robbiola, M. Réfrégiers, J-F Jarrige, L. Bertrand // Nature Communications. – 2016. – № 7. – p. 1–8.
4. Раскрыта тайна древнего магического амулета Мергарха [Электронный ресурс]. – Новостной портал Lenta.ru. – Режим доступа: <https://lenta.ru/articles/2016/11/16/wheel/>
5. Muhly J. D. The beginnings of metallurgy in the Old World / James D. Muhly // The Beginnings of the Use of Metals and Alloys. Second International Conference, Zhenghou, China. – 1988. – p. 2–20.
6. Pattnaik S. Developments in investment casting process: A review / S. Pattnaik, D. B. Karunakar, P. K. Jha // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – № 212. – Issue 11. – p. 2332–2348.
7. Дошкарж И. Точное литье в керамические формы: перевод с чешского / И. Дошкарж, О. Валихрах, Я. Габриель, О. Каштанек. – М.: Машиностроение, 1962. – 295 с.
8. Репях С. И. Теплофизические свойства материалов современных модельных составов / С. И. Репях // Литейное производство. – 2009. – № 9. – С. 31–33.
9. Лермантов В. В. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона : в 86 т. (82 т. и 4 доп.) / В. В. Лермантов, К. Рейхенбах. – СПб. – С.1890–1907.

10. Гутов Л. А. Разработка рецептур отечественных литейных восков / Л. А. Гутов, Г. А. Захарчук, О. В. Кесарев, А. Д. Фляте, П. И. Чайкин // Сборник трудов ВНИИювелирпром. – 1973. – № 2. – с. 23–29.
11. Прокопчук Н. Р. Исследование возможности использования модифицированной канифоли в модельных составах для точного литья / Н. Р. Прокопчук, Н. Д. Горщарик, А. Ю. Ключев, Н. Г. Козлов, Е. И. Рожкова, И. А. Латышевич // Труды БГТУ. Серия 2 : Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2013. – № 4. – с. 53–56.
12. Рублева Е. С. Влияние содержания стеарина на свойства модельных восков / Е. С. Рублева, О. Б. Лисовская // Общество. Наука. Инновации (НПК-2021) : сборник статей XXI Всероссийская научно-практическая конференция, Киров, 12–30 апреля 2021 г. Том 2. – Киров: Вятский государственный университет. – 2021. – С. 615–621.
13. Оспенникова О. Г. Модельные композиции на основе синтетических материалов. Особенности физико-механических и технологических свойств / О.Г. Оспенникова, Л.В. Пикулина, В.Ю. Орлова // Труды ВИАМ. – 2018. – № 10. – с. 37–43.
14. Развитие точного литья [Электронный ресурс]. – Pereosnastka.ru. Обработка дерева и металла. – Режим доступа: <http://pereosnastka.ru/articles/razvitie-tochnogo-litya>
15. Рогов В. А. Технология машиностроения. Штамповочное и литейное производство / В. А. Рогов, Г. Г. Поздняк. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2016. – 330 с.
16. Леушина Л. И. Разработка технологий стального литья по выплавляемым моделям с применением низкотемпературного прокаливания оболочковых форм и использованием техногенных отходов : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Леушина Любовь Игоревна. – Нижний Новгород, 2014. – 219 с.
17. Финкельштейн А. Б. Современное литейное оборудование : учеб. пособие / А. Б. Финкельштейн, А. С. Быков, С. Н. Злыгостев ; под общ.

- ред. А. Б. Финкельштейна ; Урал. гос. техн. ун-т - УПИ. – Екатеринбург : [ГОУ ВПО УГТУ-УПИ], 2005. – 112 с.
18. ГОСТ 26645-85. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку. – М. : Стандартинформ, 1987. – 54 с.
19. Яновская Л. Я. Шоу–процесс / Л. Я. Яновская, П. С. Сиротинский // Литейное производство. – 1962. – № 12. – С. 38–39.
20. Полухин П. И. Технология металлов и сварка / П. И. Полухин, Б. Г. Гринберг, В. Т. Жадан. С. К. Катеник, Д. И. Васильев. – М. : Высшая школа, 1977. – 464 с.
21. Озеров В. А. Литье по выплавляемым моделям / В. А. Озеров, С. С. Фельдман, Я. И. Шкленник. – М. : МАШГИЗ, 1958. – 321 с.
22. Максютин Л. Г. Литье по выплавляемым моделям отливок авиационно-космического назначения: учеб. пособие / Л. Г. Максютин, А. В. Шилов, В. Л. Звездин, А. С. Коряковцев. – Пермь : Перм. гос. техн. ун-т, 2005. – 140 с.
23. Гини Э. Ч. Технология литейного производства: Специальные виды литья: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Э. Ч. Гини, А. М. Зарубин, В. А. Рыбкин. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – 352 с.
24. Евстигнеев А. И. Специальные технологии литейного производства: учеб. пособие. Ч. 2 / А. И. Евстигнеев, Е. А. Чернышов. – М. : Машиностроение, 2012. – 436 с.
25. Репях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям / С. И. Репях. – Днепропетровск: Лира, 2006. – 1056 с.
26. Никифоров С. А. Отечественные кремнезоли для литейного производства / С. А. Никифоров, П. А. Никифоров, Ф. А. Закиров // Литейное производство. – 2001. – № 1. – с. 27–28.
27. Емельянов В. О. Водный раствор кремнезоля как альтернатива этилсиликата в ЛВМ / В. О. Емельянов, К. В. Мартынов, В. Н. Мутилов,

- А. В. Соколов, В. П. Суханова // Литейное производство. – 2012. – № 3. – с. 30–31.
28. Богданов М. Г. Влияние технологических факторов на прочность оболочки при литье по выплавляемым моделям / М. Г. Богданов // Литейное производство. – 1958. – № 9. – с. 18–20.
29. Шкленник Я. И. Подготовка формовочных материалов и прочность оболочек литейных форм при литье по выплавляемым моделям / Я. И. Шкленник, И. Н. Самсонова, М. Н. Гелеван // МДНТП. – 1960. – с. 25–28.
30. Вдовин К. Н. Технология литейного производства. Конспект лекций : учеб. пособие / К. Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов. – Магнитогорск: Изд-во МТУ им. Г.И. Носова, 2014. – 195 с.
31. Самсонов В. М. О механизмах коалесценции нанок капель и спекания твердых наночастиц / В. М. Самсонов, И. В. Талызин, С. А. Васильев, М. И. Алымов // Коллоидный журнал. – 2020. – Т. 82. – № 5. – С. 618–629.
32. Перель В. И. Две работы Я. И. Френкеля / В. И. Перель, В. Я. Френкель // Физика и техника полупроводников. – 1984. – Т. 18. – вып. 11. – С. 1931–1939.
33. ГОСТ 9077–82. Кварц молотый пылевидный. Общие технические условия. – М. : Стандартиформ, 1982. – 8 с.
34. Раскатов В. М. Машиностроительные материалы: краткий справочник / В. М. Раскатов, В. С. Чуенков, Н. Ф. Бессонова, Д. А. Вейс. – М. : Машиностроение, 1980. – 511 с.
35. Зверев В. А. Оптические материалы: ч.2 / В. А. Зверев, Е. В. Кривоустова, Т. В. Точилина. – С.-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. – 248 с.
36. Дышекова А. Х. Структурные изменения при полиморфных  $\alpha$ - $\beta$  фазовых переходах в кварце. / А. Х. Дышекова, А. М. Кармоков. //

- Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2017. – № 5. – с. 9–13.
37. Тепловое расширение, плавкость, полиморфные превращения минералов [Электронный ресурс]. – Всё о горном деле. – Режим доступа : <https://industry-portal24.ru/gornorazvedochnye-raboty/1292-teplovoe-rasshirenie-plavkost-polimorfnye-prevrascheniya-mineralov.html>
38. Филатов С. К. Систематика полиморфных превращений кристаллов, обобщенная на основе критериев Бюржера / С. К. Филатов, П. Пауфлер // Записки Российского минералогического общества. – 2019. – Т. 148. – № 5. – с. 1–23.
39. Обзор и влияние на здоровье в литейных цехах [Электронный ресурс]. – Ioencyclopedia of Occupational Health and Safety. – Режим доступа: <https://www.iloencyclopaedia.org/ru/contents/part-x-96841/food-industry/overview-and-health-effects?start=570&start=570>
40. ГОСТ 16548–80. Стекло кварцевое и изделия из него. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 1980. – 19 с.
41. Постников В. С. Оптическое материаловедение : курс лекций / В. С. Постников. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 280 с.
42. Бессмертный В. С. Плазменные технологии в производстве стекла / В. С. Бессмертный, Н. И. Бондаренко, Д. О. Бондаренко, Н. И. Минько, Д. В. Кочурин, А. В. Макаров // Стекло и керамика. – 2019. – № 7. – с. 3–7.
43. Колобов А. Ю. Особенности кристаллизации и свойств кварцевого стекла, полученного на плазмотронах ОАО «ДИНУР» из кварцевого песка Раменского месторождения / А. Ю. Колобов, Г. А. Сычева // Физика и химия стекла. – 2020. – Т. 46. – № 3. – с. 281–290.
44. Колобов А. Ю. Синтез непрозрачного кварцевого стекла для производства огнеупорной кварцевой керамики / А. Ю. Колобов,

- Г. А. Сычева // Физика и химия стекла. – 2021. – Т. 47. – № 3. – С. 273–285.
45. Овчинникова А. О. Эффективность использования связующих для ЛВМ / А. О. Овчинникова, Е. Д. Потапова, И. Е. Фурман, С. П. Казанцев. – Литейное производство. – 2020. – № 10. – С. 11–16.
46. Патент 2503520 Российская Федерация, МПК51 В22С 1/16. Суспензия огнеупорная для оболочковых форм по выплавляемым моделям / Дубровин В. К., Кулаков Б. А., Карпинский А. В. и др. – ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ». – № 2012122304/02 заявл. 29.05.2012, опубл. 0.01.2014.
47. Патент 2151017 Российская Федерация, МПК51 В22С 1/00. Суспензия для изготовления литейных керамических форм / Каблов Е. Н., Чубаров В. Г. – ФГУП «ВИАМ». – № 98114785/02 заявл. 29.07.1998, опубл. 20.06.2000.
48. Brown B. Seeking Profits from Water-Based Investment Casting / Bob Brown // Majors suppliers in industry. – Vol. 1. – 2013. – P. 45–54.
49. Лоханкин А. В. Новое готовое связующее для точного литья / А. В. Лоханкин // Литейщик России. – 2012. – № 5. – С. 42–44.
50. ООО «Новомосковские Полиэфиры» [Электронный ресурс]. – Российская ассоциация литейщиков. – Режим доступа: <http://www.ruscastings.ru/work/168/441/442/9834>
51. Мартынов К. В. Керамические формы на кремнезольном связующем для литья по выплавляемым моделям : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Мартынов Константин Викторович. – С.-Петербург, 2005. – 184 с.
52. Инструкция по изготовлению керамических форм для литья по выплавляемым моделям на основе связующего «Армосил» [Электронный ресурс]. – НТЦ Компас. – Режим доступа: <http://www.compass-kazan.ru/armosil.php>
53. Готовые термостойкие связующие «СИЛАРМ» для литья по выплавляемым моделям от компании «СИТЕК» [Электронный ресурс].

- Российская ассоциация литейщиков. – Режим доступа: <http://www.ruscastings.ru/work/168/2130/2968/3895>
54. База данных Insights [Электронный ресурс]. – REMET UK – Режим доступа: <https://www.remet.com/en/insights>
55. Баженов В. Е. Анализ свойств суспензии и керамики для литья по выплавляемым моделям, полученных на отечественных связующих на водной основе / В. Е. Баженов, Е. П. Ковышкина, А. В. Санников, А. В. Колтыгин, Д. В. Тен, А. А. Рижский, В. Д. Белов, Е. А. Лазарев // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2023. – Т. 29. – № 2. – С. 15–28
56. Вдовин К. Н. Применение универсальных кремнеземных связующих на водной основе для изготовления керамических форм для литья по выплавляемым моделям / К. Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов, М. В. Овчинников, А. С. Пинаев // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2019. – № 18. – с. 149–154.
57. Вдовин К. Н. Технология формообразования с применением связующих на водной основе в литье по выплавляемым моделям / К. Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов, М. В. Овчинникова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2020. – № 11. – с. 29–31.
58. Ворфоломеев М. С. Особенности изготовления корундовых керамических форм по выплавляемым моделям на основе неорганического водного связующего / М. С. Ворфоломеев // Литейное производство. – 2021. – № 11. – с. 16–18.
59. Ордин Д. А. Перевод технологии литья по выплавляемым моделям в авиастроении на керамику, полученную с использованием связующих на водной основе. Обзор выполненных исследований / Д. А. Ордин, Е. Н. Новокрещенных, В. З. Пойлов, Н. П. Углев // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2016. – №3.

60. Варламов А. С. Технологические процессы точного формообразования в литье по выплавляемым моделям : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Варламов Алексей Сергеевич. – Челябинск, 2011. – 192 с.
61. Шкленник Я. И. Состояние и перспективы способа литья по выплавляемым моделям / Я. И. Шкленник // Литейное производство. – 1980. – № 1. – С. 21–24.
62. Шкленник Я. И. Пути повышения качества отливок по выплавляемым моделям / Я. И. Шкленник // Прогрессивная технология литейного производства. – 1969. – С. 487–491.
63. Некрасов С. А. Особенности напряженно-деформированного состояния оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям при их изготовлении и заливке расплавом : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Некрасов Сергей Александрович. – Комсомольск-на-Амуре, 2003. – 202 с.
64. Овчинникова А. О. Поверхностные свойства суспензий на основе плавного кварца / А. О. Овчинникова, Я. А. Журавлёв, Е. Л. Фурман, И. Е. Фурман, Е. А. Усольцев // Новые огнеупоры. – 2022. – № 1. – С. 39–42.
65. Ovchinnikova A. O. Surface properties of slurries based on fused quartz / Y.A. Zhuravlev, A. O. Ovchinnikova, E. A. Usol'tsev, E. L. Furman, I.E. Furman // Refractories and Industrial Ceramics. – 2022. – Vol. 63. – №1. – С. 40-43.;
66. Казанцев С. П. Дефекты отливок при литье по выплавляемым моделям : ЭОР / С. П. Казанцев, Е. Л. Фурман. – Екатеринбург, 2019. – 110 с.
67. Танкелевич Б. Ш. Факторы заполняемости оболочковых форм из плавного кварца / Б. Ш. Танкелевич, А. А. Демидова, А. В. Абадаев // Литейное производство. – 1979. – №4. – с. 17–18.
68. ООО «Литейное производство УБМ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lpubm.ru>

69. ГОСТ 19200–80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. – М. : Стандартиформ, 1980. – 32 с.
70. Прохоров Н. М. Пригар при литье по выплавляемым моделям / Н. М. Прохоров // Литейное производство. – 1966. – № 2. – С. 33–35.
71. Мартыненко С. В. Совершенствование технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок с применением уточненной по свойствам материалов компьютерной модели : дис. канд. техн. наук : 2.6.3 / Мартыненко Сергей Витальевич. – Екатеринбург, 2022. – 160 с.
72. Черников Д. Г. Моделирование литья деталей аэрокосмического назначения в ProCAST: учеб.пособие / Д.Г. Черников и др. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – с. 182.
73. Никаноров А. В. Сравнительный анализ компьютерных программ для моделирования литейных процессов / А. В. Никаноров // Вестник ИрГТУ. – 2018. – №11. – с. 142.
74. Монастырский А. В. Разработка методики расчета термических напряжений в фасонных отливках и их автоматизированного моделирования для гравитационных методов литья : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Монастырский Алексей Валерьевич. – Москва, 2011. – 146 с.
75. Обухов А. А. Численное решение задачи определения температурной зависимости теплофизических параметров твердых сред / А. А. Обухов, Т. А. Новикова, В. Г. Лебедев, В. И. Ладьянов, А. В. Обухов // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90. – вып. 12. – с. 2013–2021.
76. Ордин Д. А. Физико-химические основы и технология литейных керамических форм на основе водно-коллоидного кремнезоля : дис. канд. техн. наук : 05.16.06 / Ордин Дмитрий Алексеевич. – Пермь, 2020. – 127 с.

77. Овчинникова А.О. Вязкость суспензий из плавленного кварца для литья по выплавляемым моделям / А. О. Овчинникова, Я. А. Журавлев, Е. Л. Фурман, И. Е. Фурман – Новые огнеупоры. – 2022. – № 5. – с. 65–67.
78. Ovchinnikova A.O. Scientific research and development viscosity of fused silica suspensions for investment casting / Y.A. Zhuravlev, A.O. Ovchinnikova, E. L. Furman, I.E. Furman // Refractories and Industrial Ceramics. – 2022. – Vol. 63. – №3. – С. 270-272.
79. Чернов В. П. Исследование свойств огнеупорных суспензий, используемых для керамических форм при литье по выплавляемым моделям / В. П. Чернов, Е. А. Селиванова // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2010. – № 3. – с. 21–25.
80. Adamczyk Z. Structure of colloid silica determined by viscosity measurements / Z. Adamczyk, B. Jachimska, M. Kolasińska // Journal of Colloid and Interface Science. – 2004. – Vol. 273. – Issue 2. – P. 668–674.
81. Александров Д. В. Введение в гидродинамику: учеб. пособие / Д. В. Александров, А. Ю. Зубарев, Л. Ю. Исакова. – Екатеринбург : Изд-во Урал, ун-та, 2012. – 112 с.
82. Огородников В. А. Вязкость и ее роль в динамических процессах : монография / Огородников В.А.. – Саров : Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2012. – 239 с.
83. Хаппель Дж. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса : монография : пер. с англ. / Дж. Хаппель, Г. Бреннер ; пер. В. С. Берман, В. Г. Марков ; ред. пер. Ю. А. Будкевич . – М. : Мир, 1976 . – 632 с.
84. Фукс Г. И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов / Г. И. Фукс. – под ред. проф. М. М. Кусакова. – Гостоптехиздат. – 272 с.
85. Крупенникова В. Е. Определение динамической вязкости на ротационном вискозиметре Brookfield RVDV-II+Pro: метод. указ. / В.Е. Крупенникова, В.Д. Раднаева, Б.Б. Танганов. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2011. – 48 с.

86. Волков В. А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы : учебник / В. А. Волков. – 2-е изд., испр. – С.-Петербург : Лань, 2015. – 672 с.
87. ГОСТ 9070-75. Вискозиметры для определения условной вязкости лакокрасочных материалов. Технические условия. – введ. 01.01.1977 – М. : Стандратинформ. – 11 с.
88. ГОСТ 8420-2022. Материалы лакокрасочные. Методы определения условной вязкости. – введ. 16.05.2022. – ИПС «Стандарт». – 12 с.
89. Einstein A. A new determination of molecular dimensions / Albert Einstein // *Annalen der Physik*. – 1906. – № 19. – С. 289–306.
90. Румянцев В. В. Гранулометрический анализ с помощью лазерных анализаторов серии SALD компании Shimadzu / В. В. Румянцев // *Оборудование и материалы*. 2013. – № 6. – с. 13.
91. Макеев К. А. Актуальные проблемы качества литых заготовок, получаемых методом ЛВМ и их неразъемных соединений / К. А. Макеев, Д. А. Пятаев, Д. С. Кайзер, Ю. И. Коновалов // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. – 2022. – Т. 1. – с. 516–518.
92. Юсипов Р. Ф. Метод оценки качества поверхности лицевого слоя формы литья по выплавляемым моделям / Р. Ф. Юсипов, Е. Д. Демьянов, В. Ю. Виноградов [и др.] // *Литейное производство*. – 2021. – № 8. – С. 23–26.
93. Ниженко В. И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов / В. И. Ниженко, Л. И. Флока. – М. : Metallurgia, 1981. – 208 с.
94. Попель С. И. Поверхностные явления в расплавах / С. И. Попель. – М.: Metallurgia, 1994. – 432 с.
95. Lu H.M. Surface tension and its temperature coefficient for liquid metals // H.M. Lu, Q. Jiang // *J. Phys. Chem. B*. – 2005. – V. 109. – P. 15463–15468.
96. Сумм Б. Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М. : Химия, 1976. – 231 с.

97. Рауд Э. А. Растекание ньютоновской жидкости по поверхности твердого тела / Э. А. Рауд, Б. Д. Сумм, Е. Д. Щукин // Докл. АН СССР. – 1972. – Т. 205. – № 5. – С. 1134.
98. Жен П. Ж. Смачивание: статика и динамика / П. Ж. де Жен // УФН. – 1987. – Т. 151. – № 4. – с. 619–681.
99. Патент 2614944С1 Российская Федерация, МПК С11D3/10 С11D3/20 С11D3/02. Раствор для смачивания поверхности восковых моделей для высокоточного литья / Звездин В. Л., Мерзляков К. С., Ордин Д. А., Пойлов В. З., Углев Н. П., Шилов А. В. – ОАО «АВИАДВИГАТЕЛЬ». № 2016105134 заявл. 16.02.2016, опубл. 31.03.2017.
100. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 416 с.
101. Калмыков В. В. Способы оценки краевого угла методом лежащей капли / В.В. Калмыков, Е.А. Медведева, Р.А. Конозобко // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2020. – № 1. – С. 51–56.
102. Быховский А. И. Растекание / А. И. Быховский. – Киев: Наукова Думка, 1989. – 191 с.
103. Фурман Е. Л. Создание и совершенствование технологий получения композиционных отливок на основе изучения капиллярного взаимодействия в литейной форме : дис. д-ра. техн. наук : 05.16.04 / Фурман Евгений Львович. – Свердловск, 1990. – 566 с.
104. Гимранов Э. Г. Моделирование методом крупных частиц полета и удара капли жидкости о твердую поверхность / Э. Г. Гимранов, А. А. Ольхов, А. В. Свистунов, Л. Ф. Хакимова // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16. – № 5. – С. 128–131.
105. Синтетические воска для литья по выплавляемым моделям [Электронный ресурс]. – Технологии точного литья. – Режим доступа: <http://ultracast.ru/catalog/synthetic-waxes/>
106. ВИТех. Разработка, испытание, производство и внедрение высококачественных материалов, применяемых в литейном

- производстве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.litmat.ru/products/>
107. Цех модельной восковой массы Remet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.remet.com/ru/remetproduct-category/цех-модельной-восковой-массы/>
108. Natural mineral vegetable synthetic waxes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.paramelt.com/waxes/natural-mineral-vegetable-synthetic-waxes/>
109. Сайт фирмы Castaldo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.castaldo.com/>
110. Сайт Freeman Manufacturing & Supply Company [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.freemanwax.com/>
111. Макаров П. Г. Термогидродинамика испарения коллоидных капель, формирование и морфология осадочных структур : дис. канд. техн. наук : 01.04.14 / Макаров Петр Георгиевич. – Москва, 2017. – 176 с.
112. Deegan R. Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops / R. Deegan, O. Bakajin, T. Dupont, G. Huber, S. Nagel, T. Witten // Nature. – 1997. – № 389. – p. 827–829.
113. Deegan R. Pattern formation in drying drops / R. Deegan // Phys. Rev. – № 61. – p. 475–485.
114. Овчинникова А. О. Об образовании неметаллических включений на художественных отливках при литье по выплавляемым моделям / А. О. Овчинникова, И. Е. Фурман, Е. Л. Фурман, В. Ю. Сон, Д. С. Болтрушко // Литейное производство. – 2024. – № 3. – С. 28–31.
115. Овчинникова А.О. Изготовление литейных форм для получения художественных отливок по выплавляемым моделям / А.О. Овчинникова, Е.Л. Фурман // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 82-й международной научно-технической конференции : Матер. конф. – Магнитогорск :

- Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2024. – С. 170.
116. Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / Ю. Г. Фролов. – 3-е изд. – М. : Альянс, 2004. – 462 с.
117. Попель С. И. Поверхностные явления в расплавах / С. И. Попель. – М. : Metallurgia, 1994. – 440 с.
118. Семериков И. С. Физическая химия строительных материалов: учеб. пособие / И. С. Семериков, Е. С. Герасимова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 204 с.
119. Зарудная Е. Н. Исследование поверхностного натяжения сыворотки крови животных с помощью модельных систем / Е. Н. Зарудная, В. И. Максимов, С. Ю. Зайцев, Н. А. Довженко // Ученые записки КГАВМ им. Н.Э. Баумана. – 2010.
120. Клындюк А. И. Поверхностные явления и дисперсные системы : учеб. пос. для студ. ВУЗ по хим.-тех. специальностям / А. И. Клындюк. – Минск : БГТУ, 2011. – 315 с.
121. Джамбулатов Р. С. Измерение поверхностного натяжения водных суспензий бентонитов методом максимального давления в газовом пузырьке / Р. С. Джамбулатов, Р. Х. Дадашев, И. Н. Дадашев // Известия ЧГПУ. – 2018. – Т. 15. – № 1. – С. 50–55.
122. Дадашев Р. Х. Методика измерения поверхностного натяжения суспензии бентонитов / Р. Х. Дадашев, Р. С. Джамбулатов, Д. З. Элимханов, И. Н. Дадашев // Журнал физической химии. – 2020. – Т. 94. – № 7. – С. 1114-1118
123. Dadashev R. N. Effect of Nanoscale Particles on the Surface Properties of Aqueous Suspensions of Bentonites / R. N. Dadashev, R. S. Dzhambulatov, D. Z. Elimkhanov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – 2018. – № 7. – p. 902–904.

124. Джамбулатов Р. С. Поверхностные свойства суспензий бентонитов и многокомпонентных растворов органических веществ : дис. канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 / Джамбулатов Роман Суламбекович. – Грозный, 2019. – 155 с.
125. Витюгин В. М. Исследование влияния концентрации бентонитовых суспензий на поверхностное натяжение и реологические свойства / В. М. Витюгин, О. А. Фукс, Т. Н. Сомова // Известия Томского политехнического института имени С. М. Кирова. – 1977. – Т. 214. – С. 106–108.
126. Hadidimasouleh R. Modeling of the Surface Tension of Colloidal Suspensions / R. Hadidimasouleh, M. S. Yaghmaee, R. Riahifar, B. Raissi // Surface Review and Letters. – 2017. – Vol. 24. – №4. – p. 1–9.
127. Щукин Е. Д. Коллоидная химия: учеб. для бакалавров / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. – 7-е изд., испр. и доп. – М. : Изд-во Юрайт, 2014. – 444 с.
128. Ronay M. Determination of the dynamic surface tension of liquids from the instability of excited capillary jets and from the oscillation frequency of drops issued from such jets / Maria Ronay // Proc. R. Soc. Lond. A361. – 1978. – p.181–206.
129. Bailey A. I. Surface and interfacial tension / A. I. Bailey // Thermopedia. – 2010. – №3. – p. 35–38.
130. Stückrad B. Measurement of Dynamic Surface Tension by the Oscillating Droplet Method / B. Stückrad, W. Hiller, T. Kowalewski // Experiments in Fluids. – 1993. – № 15. – p. 332–340.
131. Джейкок М. Химия поверхностей раздела фаз / М. Джейкок, Дж. Парфит ; пер. с англ. В. Ю. Гаврилова, В. Б. Фенелонова. – М. : Мир, 1984. – 269 с.
132. Кольцов Л. В. Седиментационный анализ суспензий: метод. указ. к лаб. работе / Л. В. Кольцов, М. А. Лосева. – Самара : СГТУ, 2017. – 13 с.

133. Гельфман М. И. Коллоидная химия: 5-е изд., стер. / М. И. Гельфман, О. В. Ковалевич, В. П. Юстратов. – СПб.: Изд-во «Лань», 2010. – 336 с.
134. Шантарин В. Д. Физико-химия дисперсных систем / В. Д. Шантарин, В. С. Войтенко. – М. : Недра, 1990. – 315 с.
135. Кочурова Н. Н. Эффект Джонса-Рея и поверхностная электризация / Н. Н. Кочурова, А. И. Русанов, Н. О. Мырзахметова // Доклады академии наук СССР. – 1991. – № 6. – с. 1425–1427.
136. Джамбулатов Р. С. Измерение поверхностного натяжения водных суспензий бентонитов методом максимального давления в газовом пузырьке / Р. С. Джамбулатов, Р. Х. Дадашев, И. Н. Дадашев // Известия ЧГПУ. – 2018. – Т. 15. – №1 (18). – С. 50–55.
137. Дадашев Р. Х. Методика измерения поверхностного натяжения суспензии бентонитов / Р. Х. Дадашев, Р. С. Джамбулатов, Д. З. Элимханов, И. Н. Дадашев // Журнал физической химии. – 2020. – Т. 94. – № 7. – С. 1114–1118.
138. Van Olphen H. Forces between suspended bentonite particles / H. van Olphen // Clays and clay minerals (National Conference on Clays and Clay Minerals). – 1955. – № 62. – p. 204–224.
139. Дадашев Р. Х. О методических особенностях и ошибках измерения поверхностного натяжения водных суспензий / Р. Х. Дадашев, Р. С. Джамбулатов // Доклады АМАН. – 2022. – с. 57–66.
140. Адамсон А. В. Физическая химия поверхностей / А. В. Адамсон. – М.: Химия, 1979. – 568 с.
141. Заводовский А. Г. Исследование поверхностного натяжения методом вращающейся капли / А. Г. Заводовский // Сборник статей по материалам XXII международной научно-практической конференции, Москва. – Т. 3. – М: ООО «Международный центр науки и образования». – 2019. – С. 23–28.
142. Директор Л. Б. Усовершенствованный метод лежащей капли для определения поверхностного натяжения жидкостей / Л. Б. Директор,

- В. М. Зайченко, И. Л. Майков // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48. – вып. 2. – с. 193–197.
143. Адам Н. К. Физика и химия поверхностей / Н. К. Адам : перевод с 3-го англ. изд. Д. М. Толстого ; под ред. проф. А. С. Ахматова. – М. : Гос. изд. тех.-теор. лит-ры, 1947. – 552 с.
144. Дадашев Р. Х. Измерение поверхностного натяжения методом висящей капли на тензиометре DSA-100 / Р. Х. Дадашев, Р. С. Джамбулатов, Д. З. Элимханов // Сборник Тр. КНИИ РАН. – Грозный. – 2012. – № 5. – с. 3–7.
145. Адамова Л. В. Процессы на поверхности раздела фаз: Курс лекций / Л. В. Адамова. – Екатеринбург : УрГУ, 2007. – 125 с.
146. Циклис Д. С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях / Д. С. Циклис. – изд. 4-е, пер. и доп. – М. : Химия, 1976. – 432 с.
147. Ребиндер П. А. Избранные труды. Коллоидная химия / П. А. Ребиндер. – М. : Наука, 1978. – с. 74–120.
148. Ребиндер П. А. Избранные труды. Физико-химическая механика / П. А. Ребиндер. – М. : Наука, 1979. – с. 142.
149. Зайдель А. Н. Техника и практика спектроскопии / А. Н. Зайдель, Г. В. Островская, Ю. И. Островский. – М. : Изд-во «Наука», 1976. – 392 с.
150. Плавленый кварц фирмы ООО «Родонит» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rodonit.spb.ru/materialy/plavlenyj-kvarts.html>
151. Силикатные готовые связующие [Электронный ресурс]. – Компания «Силиконовые Материалы». – Режим доступа: [https://pentasever.ru/catalog/prochee/silikatnye\\_svyazuyushchie/](https://pentasever.ru/catalog/prochee/silikatnye_svyazuyushchie/)
152. LUDOX® SK – Primary Binder [Электронный ресурс]. – REMET. – Режим доступа: <https://www.remet.com/us/remetproduct/ludox-sk/>
153. LUDOX® Colloidal Silica [Электронный ресурс]. – W. R. Grace & Co. – URL: <https://grace.com/products/ludox/>

154. Связующие Remasol [Электронный ресурс]. – ООО «sueАмальгама – Инженерный центр». – URL: <http://amalgamaic.ru/remasol>
155. Okubo T. Surface Tension of Structured Colloidal Suspensions of Polystyrene and Silica Spheres at the Air-Water Interface / T. Okubo // Journal of Colloid and Interface Science. – 1995. – Vol. 171. – Issue 1. – P. 55–62.
156. Fan L. T. Contact angle of ethanol and n-propanol aqueous solutions on metal surfaces / L. T. Fan, X. G. Yuan, C.-X. Zhou, A. W. Zeng, K. T. Yu, M. Kalbassi, K. Porte // Chemical Engineering & Applied Chemistry. – 2011. – Vol. 34. – Issue 9. – P. 1535–1542.
157. Петрунин Г. И. Теплофизические свойства вещества Земли: Ч.1 / Г. И. Петрунин, В. Г. Попов. – М. : Физ. факультет МГУ, 2011. – 68 с.
158. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел / С. И. Новикова. – М. : Изд-во «Наука», 1974. – 294 с.
159. Дьячков В. Н. Разработка комплекса технологических решений с целью повышения эффективности производства стальных отливок литьем по выплавляемым моделям : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Дьячков Виктор Николаевич. – Красноярск, 2018. – 135 с.
160. Верцюх С. С. Ресурсосберегающая технология формообразования с применением алюмофосфатного концентрата в литье по выплавляемым моделям : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Верцюх Сергей Сергеевич. – Магнитогорск, 2014. – 126 с.
161. Знаменский Л. Г. Применение алюмоборфосфатного концентрата в литье по выплавляемым моделям / Л. Г. Знаменский, О. В. Ивочкина, С. С. Верцюх, А. С. Варламов // Литейное производство. – 2012. – № 3. – с. 29–32.
162. Ивочкина О. В. Ресурсосберегающая технология формообразования в точном литье / О. В. Ивочкина, С. С. Верцюх, А. С. Варламов, Л. Г. Знаменский // Литейное производство. – 2012. – №5. – с. 25–26.

163. Абдрахманов Е. С. Огнеупоры для металлургических и литейных печей: учеб. пособие / Е. С. Абдрахманов, М. Ж. Тусупбекова. – Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2006. – 86 с.
164. Лотов В. А. Дилатометрический анализ силикатных материалов: метод. указания к лаб. практикуму / В. А. Лотов, Т. А. Хабас, Е. А. Кулинич. – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – 20 с.
165. Жиялков А. Ю. Формирование структуры сплавов систем Ni-Cr-Mo и Fe-Ni-Cr-Mo при деформационном и термическом воздействии с целью повышения их коррозионной стойкости в ионных жидкостях : дис. канд. техн. наук : 05.16.01 / Жиялков Аркадий Юрьевич. – Екатеринбург, 2014. – 157 с.
166. Колобов А. Ю. Особенности кристаллизации и свойств кварцевого стекла, полученного на плазмотронах ОАО «ДИНУР» из кварцевого песка Раменского месторождения / А. Ю. Колобов, Г. А. Сычева // Физика и химия стекла. – 2020. – Т. 46. – №3. – с. 281–290.
167. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
168. Wang T. Progress and Application of Microstructure simulation of alloy solidification / Wang T., Wei J., Wang X., Yao M // Acta Metallurgica Sinica. 2018. – Vol. 54. – № 2. – P. 193–203.
169. Приходько О. Г. Влияние теплофизических характеристик сплава и материала литейной формы на скорость затвердевания отливок / О. Г. Приходько, В. Б. Деев, Е. С. Прусов, А. И. Куценко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63. – № 5. – С. 327–334.
170. Васильев Л. Л. Теплофизические свойства пористых материалов / Л. Л. Васильев, С. А. Танаева. – Минск : Наука и техника, 1971. – 268 с.
171. Кржижановский Р. Е. Теплофизические свойства неметаллических материалов / Р. Е. Кржижановский, З. Ю. Штерн. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.

172. Литовский Е. Я. Теплофизические свойства огнеупоров / Е. Я. Литовский, Н. А. Пучкелевич. – М. : Metallurgiya, 1982. – 152 с.
173. Миснар А. Теплопроводность твёрдых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар. – М. : Мир, 1968. – 464 с.
174. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов / В. С. Чиркин. – М. : Физматгиз, 1959. – 356 с.
175. Бройтман О. А. Численный анализ процесса теплообмена и определение эффективных теплофизических свойств формовочных материалов на основе построения их структурных моделей : автореф. канд. техн. наук : 05.16.04. – Бройтман Олег Аркадьевич. – Санкт-Петербург, 2006. – 17 с.
176. Чеховской В. Я. Теплофизические свойства жаропрочного никелевого сплава ХН55ВМТКЮ / В. Я. Чеховской, В. Е. Пелецкий // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т.43. – №1. – С. 51–56.
177. Чечельницкий А. З. О теплопроводности плавленого кварца в интервале температур  $350 \div 1000$  °К / А. З. Чечельницкий // Теплофизика высоких температур. – 1972. – Т.10. – вып. 2. – С. 285–289.
178. Мень А. Н. Теплофизические свойства твердых тел при высоких температурах / А. Н. Мень, О. А. Сергеев // Труды всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ при высоких температурах, Новосибирск, 25-30 июля 1966 г. : в 2 т. / Ком. стандартов, мер и измер. приборов при Совете министров СССР, Гос. служба стандарт. и справ. данных ; под ред. чл.-кор. АН СССР И. И. Новикова, д-ра техн. наук А. Н. Гордова. – М. : Изд-во стандартов, 1969/
179. Devyatkova E. D. Fused quartz as a model material in thermal conductivity measurements / E. D. Devyatkova, A. V. Permova, I. A. Smirnov, B. Va. Moizhes // Soviet physics. Solid state. – 1960. – Т. 2. – С. 681.

180. Sugawara A. The Precise Determination of Thermal Conductivity of Pure Fused Quartz / Akira Sugawara // Journal of Applied Physics. – 1968. – Vol. 39. – P. 5994–5997.
181. Мень А. Н. Теплофизические свойства плавленого кварца и лучистая составляющая теплопереноса / А. Н. Мень, О. А. Сергеев // Докл. АН СССР. – 1972. – Т. 203. – № 6. – С. 1272–1274.
182. Мень А. А. О теплопроводности плавленого кварца / А. А. Мень, А. З. Чечельницкий // Теплофизика высоких температур, 1973. – Т. 11. – № 6. – с. 1309–1312.
183. Подшибякина Е. Ю. Исследование теплофизических свойств керамических материалов на основе оксида кремния / Е. Ю. Подшибякина, А. И. Новиков, А. А. Черкашин, Д. С. Медушевский, О. А. Суханова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 2. – с. 820–822.
184. Суздальцев Е. И. Свойства кварцевой керамики / Е. И. Суздальцев // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – № 11. – С. 3–15.
185. Гусейнов Г. Г. Эффективная теплопроводность пористых стекол, насыщенных флюидом / Г. Г. Гусейнов // Вестник ДГТУ. Технические науки. – 2013. – № 4. – С. 38–44.
186. Литовский Е. Я. Теплофизические свойства огнеупоров в широком диапазоне температур, давлений и состава газовой среды : дис. д-ра техн. наук : 01.04.14 / Литовский Ефим Яковлевич. – Москва, 1984. – 498 с.
187. Литовский Е. Я. Теплофизические свойства огнеупоров / Е. Я. Литовский, Н. А. Пучкелевич. – М. : Metallurgiya, 1981. – 345 с.
188. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В. А. Осипова, М. П. Вукалович. – М. : Энергия, 1969. – 392 с.
189. Пустовалов В. В. Теплопроводность огнеупоров / В. В. Пустовалов. – М. : Metallurgizdat, 1966. – 84 с.

190. Архаров И. А. Выбор метода исследования теплопроводности ниобия в сверхпроводящем состоянии / И. А. Архаров, С. С. Кошелев, Д. А. Сергацков, Р. Карканьо // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – №1. – с. 186–195.
191. Киселёв И. Г. Оптический метод и устройство для измерения температуропроводности твердотельных материалов / И. Г. Киселёв, Е. В. Ивакин // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2. – С. 12–16.
192. Лоцинин Ю. В. Исследование влияния технологических факторов на теплопроводность материалов керамических форм для литья / Ю. В. Лоцинин, С. Ю. Шорстов, И. Г. Кузьмина // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 2. – С. 89–94.
193. Головин Д. Ю. Термографические методы и средства для измерения температуропроводности и дефектоскопии керамических и композитных материалов / Д. Ю. Головин, А. Г. Дивин, А. А. Самодуров [и др.] // Управление большими системами : материалы XVI Всероссийской школы-конференции молодых учёных, Тамбов, 10–13 сентября 2019 г. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет. – 2019. – С. 141–147.
194. Parker W. J. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity / W. J. Parker, J. Jenkins, C. P. Butler, G. L. Abbott // Journal of Applied Physics. – 1961. – Т. 9. – С. 1679–1684.
195. Макарова Е. С. Исследование влияния технологических факторов на неопределенность результатов измерения теплопроводности методом лазерной вспышки // Е. С. Макарова, А. В. Асач, И. Л. Тхоржевский, В. Е. Фомин, А. В. Новотельнова, В. В. Митропов // Физика и техника полупроводников. – 2022. – Т. 56. – № 2. – С. 173–177.
196. Резник С. В. Высокоэффективное поглощающее покрытие для теплофизических исследований на установках радиационного нагрева / С. В. Резник, М. О. Забежайлов, С. А. Анучин, М. О. Сотников,

- К. В. Афонин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 9. – с. 120–130.
197. Точное определение удельной теплоемкости в широком диапазоне температур с помощью ДСК [Электронный ресурс]. – Netzsch. – Режим доступа:<https://analyzing-testing.netzsch.com/ru/application-literature/tochnoe-opredelenie-udelnoi-teploemkosti-v-shirokom-temperaturnom-diapazone-po-sredstvam-dsc>
198. Cisse A. PyDSC: a simple tool to treat differential scanning calorimetry data / A. Cisse, J. Peters, G. Lazzara, L. Chiappisi // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2021. – Vol. 145. – С. 403–409.
199. Garden J.-L. Derivative scanning calorimetry: A new highly sensitive method in differential calorimetry / J.-L. Garden, G. Moiroux, C. Dignac, J. Chaussy // Thermochemica Acta. – 2018. – Vol. 670. – С. 202–210.
200. Haines P. J. Principles of thermal analysis and calorimetry / P. J. Haines. – Royal Society of Chemistry: Cambridge, 2002. – 220 p.
201. Halmaciu I. A. Comparative analysis of the energy content of diverse fuels performed via thermogravimetric investigations / I. A. Halmaciu, M. R. Wachter, A. R. Wachter // A Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – С. 1–10.
202. ГОСТ 473.4–81. Изделия химически стойкие и термостойкие керамические. Метод определения кажущейся плотности и кажущейся пористости. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 2 с.
203. Титанистый корунд (марка ЭТ) [Электронный ресурс]. – ОАО «ДИНУР». – Режим доступа: [https://www.dinur.ru/uploadedFiles/files/product/prospekt\\_abraziv\\_2019\\_1.pdf](https://www.dinur.ru/uploadedFiles/files/product/prospekt_abraziv_2019_1.pdf)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

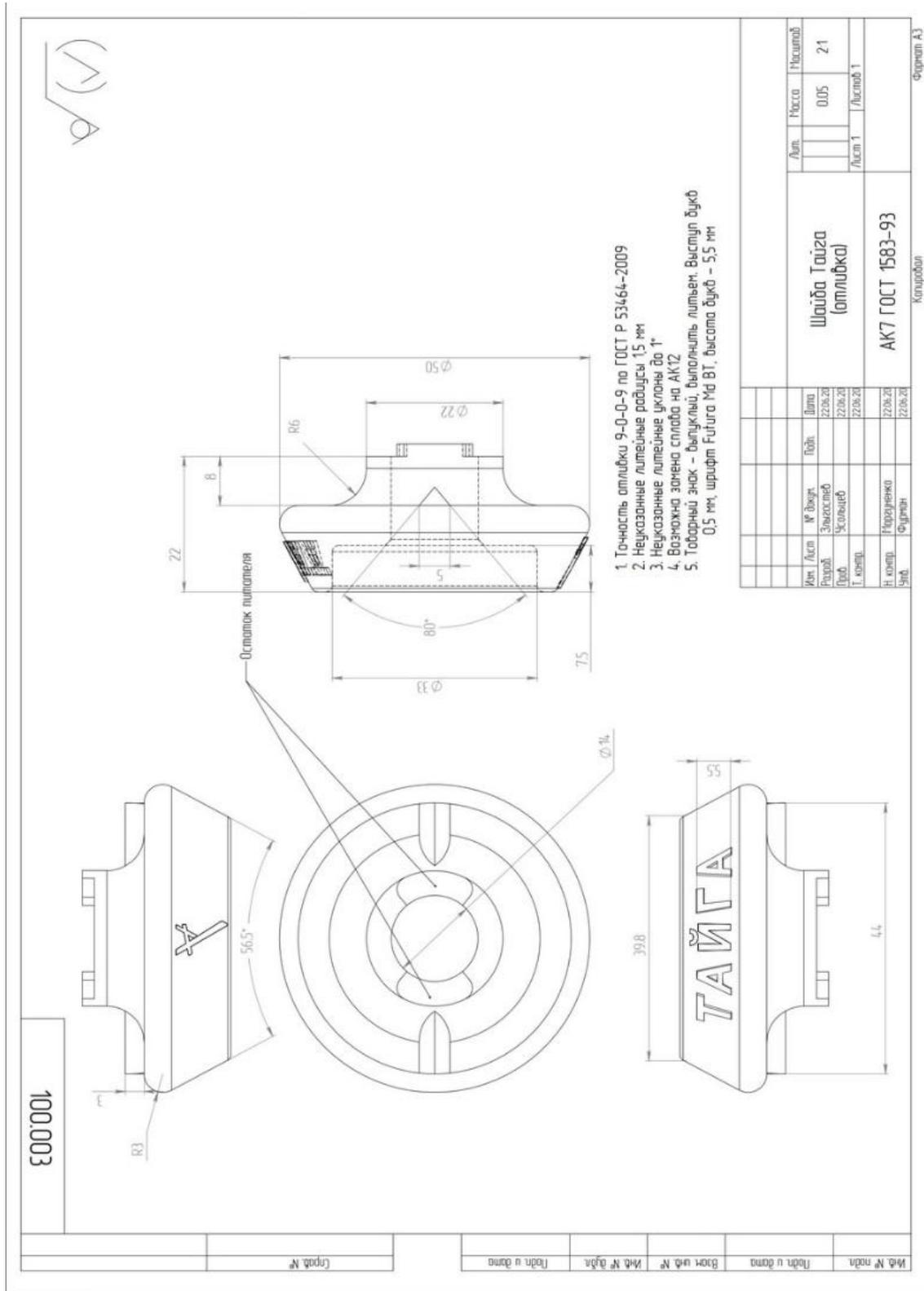


Рисунок А.1 – Чертеж отливки «Шайба Тайга»

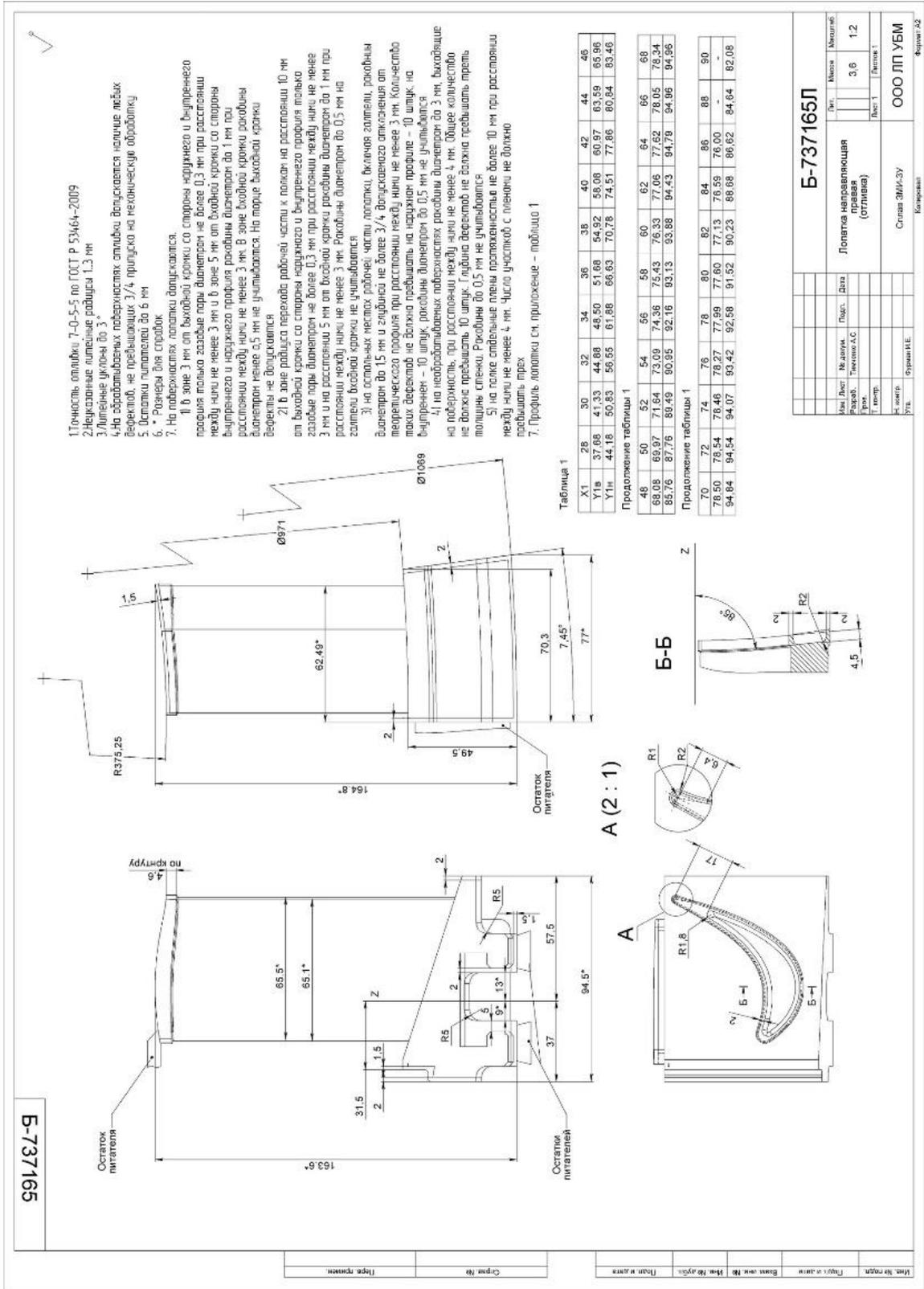


Рисунок А.2 – Чертеж отливки «Лопатка направляющая»

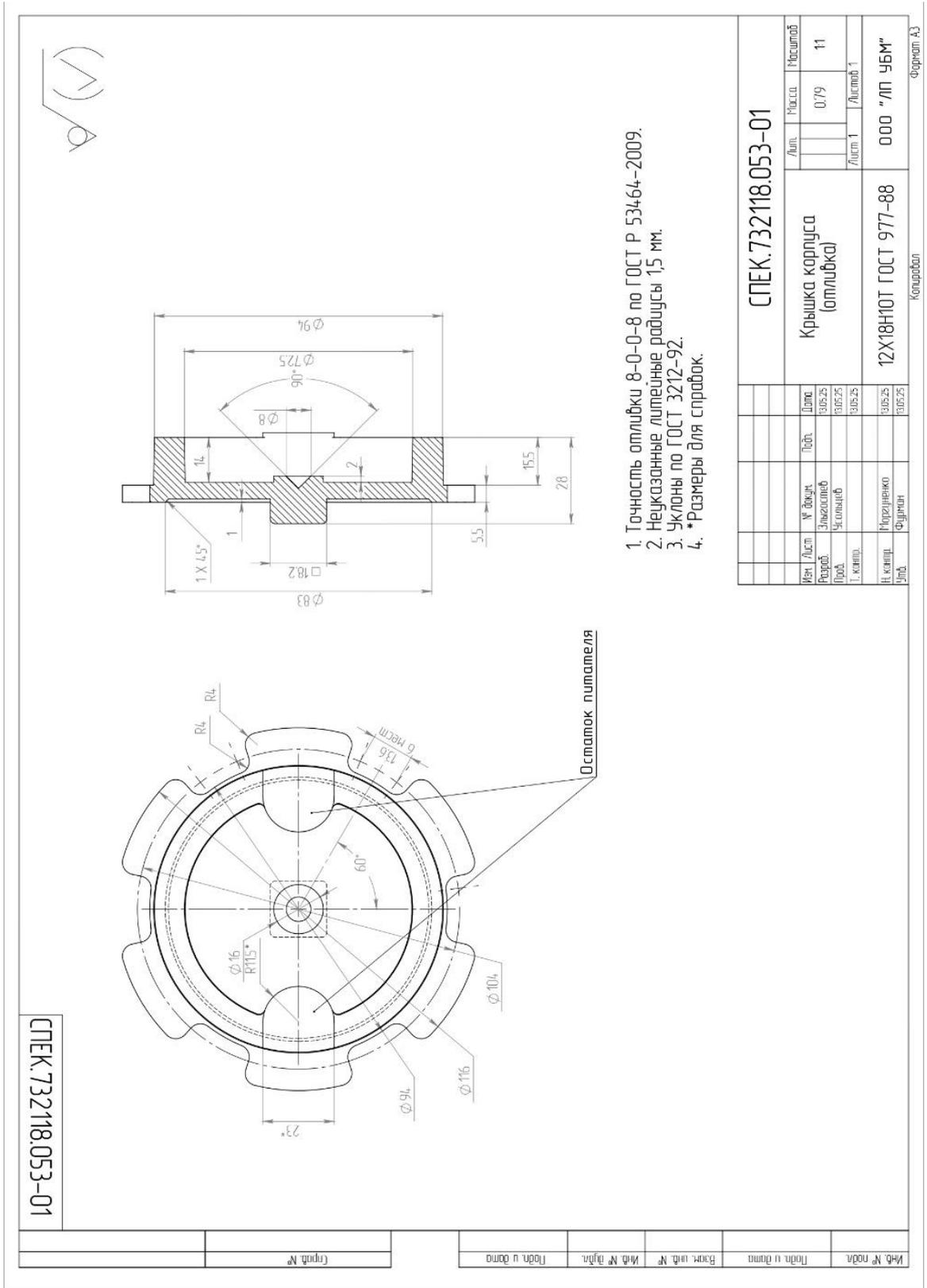


Рисунок А.3 – Чертеж отливки «Крышка корпуса»

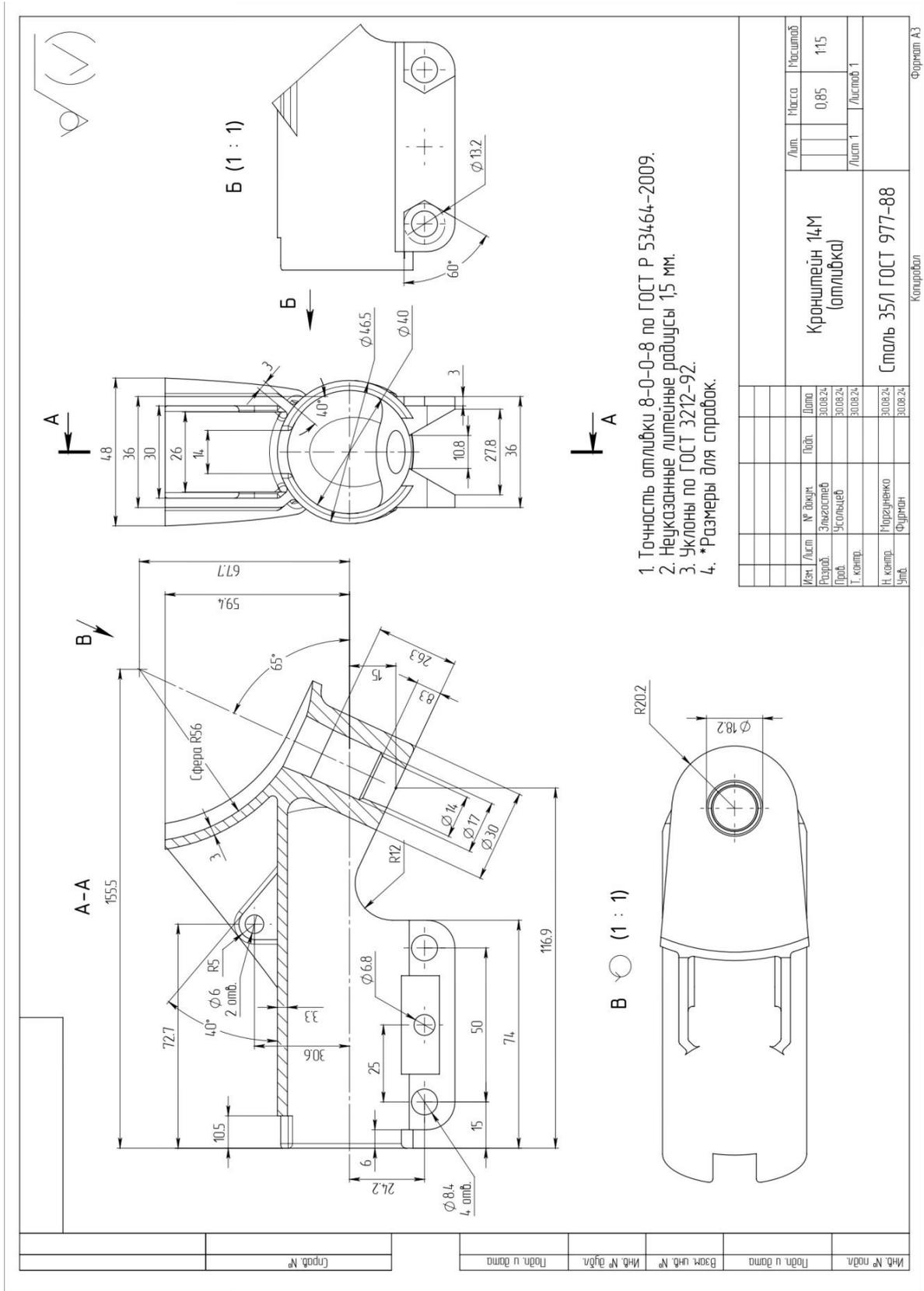
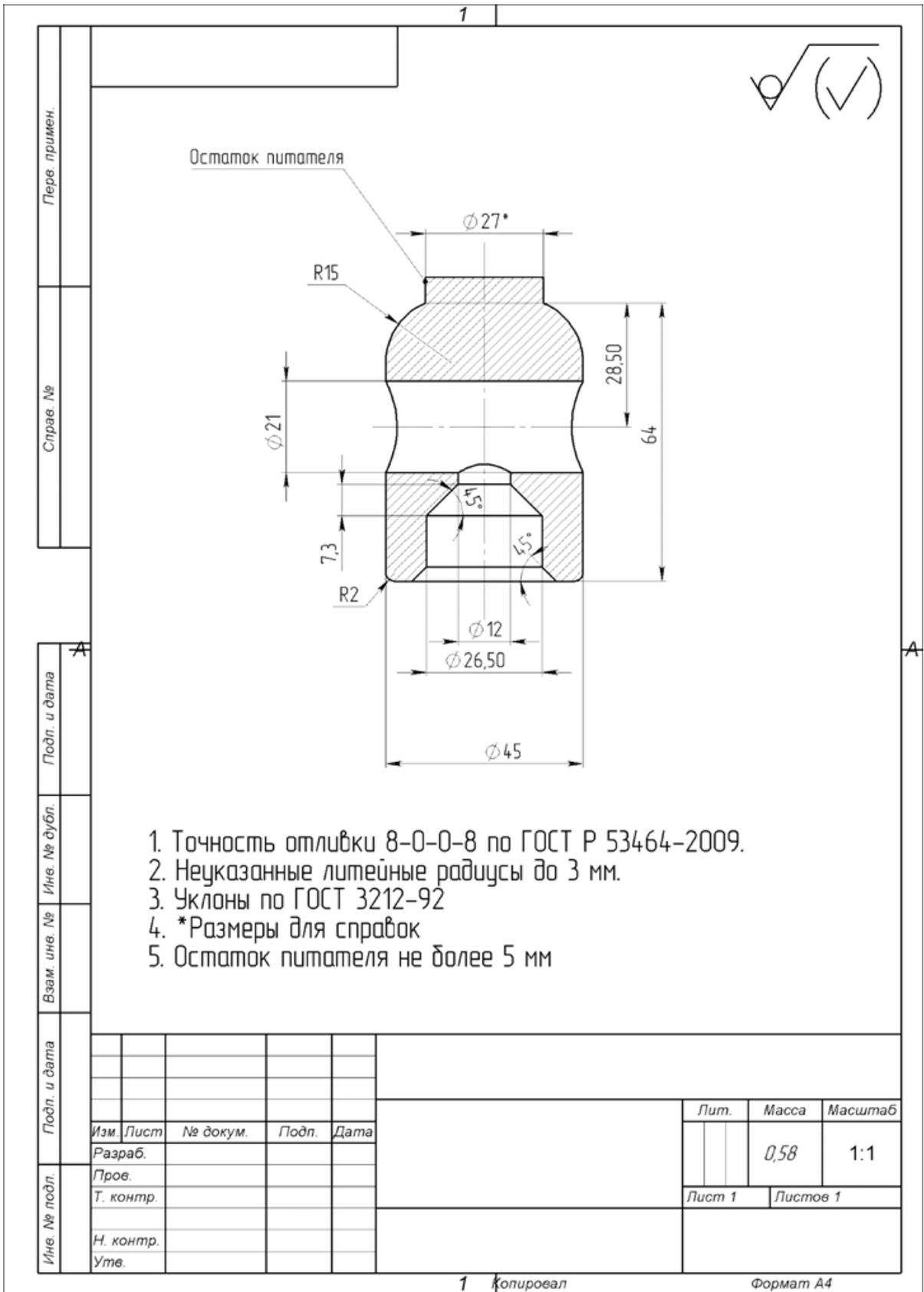


Рисунок А.4 – Чертеж отливки «Кронштейн 14М»







1. Точность отливки 8-0-0-8 по ГОСТ Р 53464-2009.
2. Неуказанные литейные радиусы до 3 мм.
3. Уклоны по ГОСТ 3212-92
4. \*Размеры для справок
5. Остаток питателя не более 5 мм

Подп. и дата								
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.							0,58	1:1
Пров.						Лист 1	Листов 1	
Т. контр.								
Ине. № подл.								
Н. контр.								
Уте.								

1 Копировал

Формат А4

Рисунок А.7 – Чертеж отливки «Наковальня»

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**ООО «Литейное производство УБМ»**

---

Р/счет 40702810200000007695 В КБ «КОЛЬЦО УРАЛА» г. Екатеринбург к/с 3010181050000000768 БИК 04657768 ИНН6646010406 / КПП661901001	623070, пгт. Верхние Серги, Свердловской обл., ул. Володарского, 10. тел.: (343) 375-48-41 тел./ф.: (343) 384-84-74 e-mail: <a href="mailto:lp@lpubm.ru">lp@lpubm.ru</a>
--	---

---

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ООО «Литейное производство УБМ»  
И. Е. Фурман  
«20» декабря 2024 г.

  
АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы**

Настоящим актом подтверждаем, что предложенные в диссертационной работе Овчинниковой А. О. «Влияние структурно-чувствительных свойств суспензии на технологию точного литья» рекомендации позволили снизить брак на предприятии. Использование значений теплофизических свойств литейных форм из плавленого кварца производства ОАО «ДИНУР», полученных Овчинниковой А.О., позволили оптимизировать технологию литья стальных отливок на предприятии ООО «Литейное производство УБМ». Экономический эффект в результате внедрения технологических рекомендаций за 2024 г. составил 0,5 млн. руб.

Начальник цеха №13  
ООО «Литейное производство УБМ»  Е. М. Колясников

Рисунок Б.1 – Акт о внедрении результатов диссертационной работы

## ООО «Литейное производство УБМ»

Р/счет 40702810200000007695  
 В КБ «КОЛЬЦО УРАЛА»  
 г. Екатеринбург  
 к/с 30101810500000000768  
 БИК 04657768  
 ИНН6646010406 / КПП661901001

623070, пгт. Верхние Серги,  
 Свердловской обл.,  
 ул. Володарского, 10.  
 тел.: (343) 375-48-41  
 тел./ф.: (343) 384-84-74  
 e-mail: lp@lpubm.ru



УТВЕРЖДАЮ  
 Генеральный директор  
 ООО «Литейное производство УБМ»  
 И. Е. Фурман  
 «13» января 2025 г.

### о внедрении результатов диссертационной работы

Настоящим актом подтверждаем, что предложенные в диссертационной работе Овчинниковой А. О. «Влияние структурно-чувствительных свойств суспензии на технологию точного литья» рекомендации позволили снизить количество брака на следующих отливках: «Шайба Тайга», «Лопатка направляющая», «Крышка корпуса», «Кронштейн 14М», «Опора», «Челюсть», «Наковальня» (таблица 1).

Таблица 1 – Брак литья за период 2023–2024 гг.

Отливка	2023			2024			Снижение брака, %
	Всего, шт	Брак, шт	Брак, %	Всего, шт	Брак, шт	Брак, %	
«Шайба Тайга»	5000	6000	54	5500	500	8	46
«Лопатка направляющая»	50	200	80	50	20	29	51
«Крышка корпуса»	1500	1500	50	1200	200	14	36
«Кронштейн 14М»	3000	2000	40	4000	1000	20	20
«Опора»	300	60	20	300	10	3	17
«Челюсть»	1500	750	30	1000	100	10	20
«Наковальня»	200	80	28	200	20	10	18

Начальник цеха №13  
 ООО «Литейное производство УБМ»

Е. М. Колясников