Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

ДЬЯЧКОВ ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК ЛИТЬЕМ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

05.16.04 – Литейное производство

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент,
Никитин Константин Владимирович

Самара - 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……		4
1	Состояние вопроса. Постановка целей и задач исследования….	12
1.1	Современное состояние и проблемы литья по выплавляемым моделям…….	12
1.2	Современные направления в совершенствовании технологий изготовления огнеупорных керамических форм для ЛВМ……	15
1.3	Особенности модельных составов, применяемых в литье по выплавляемым моделям……..	27
1.4	Управление качеством литых изделий из сплавов системы Fe-C с позиции явления структурной наследственности ……..…	33
1.5	Цели и задачи исследования……	38
2	Методика исследования……..	40
2.1	Общая методика исследования. Объекты исследования…….	40
2.2	Основное оборудование и методы исследования свойств материалов……	44
3	Исследование взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма»……..	53
3.1	Исследование свободной линейной усадки модельных составов различных видов……..	53
3.2	Влияние вида огнеупорного материала на свойства огнеупорных керамических форм……..	59
3.3	Исследование взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма»	65
Выводы по главе 3……..		71
4	Разработка комплекса технологических решений с целью повышения качества стальных отливок способом ЛВМ……	74
4.1	Анализ технологии получения отливки «Вал» из стали 40ХЛ на ООО ПКФ «Вершина»……..	74
4.2	Моделирование процессов формирования дефектов в отливке «Вал» при литье по выплавляемым моделям……	79
4.3	Исследование влияния материала огнеупорного наполнителя и состава шихты на свойства стали 40ХЛ……..	82
Выводы по главе 4……..		86
5	Опытно-промышленная апробация результатов исследования….	88
5.1	Внедрение технологии получения отливок «Вал» из стали 40ХЛ в огнеупорные керамические формы на основе плавленого кварца…	88

5.2 Опытно-промышленные испытания технологии получения отливок «Корпус» из стали 35ХГСЛ……... 96
5.3 Получение отливок литьем по выплавляемым моделям с применением реверс-инжиниринга и аддитивных технологий….. 101
Выводы по главе 5……... 112
Заключение. Общие выводы по работе…… 113
Список литературы…… 117
Приложение А…… 132
Приложение Б…… 133
Приложение В…… 134
Приложение Г…… 135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Фасонные отливки ответственного назначения из стали находят широкое применение в таких основополагающих отраслях промышленности, как машиностроение, авиа- и ракетостроение. При этом, с развитием техники к стальным отливкам предъявляются все более жесткие требования по геометрической точности и надежности в эксплуатации. В связи с повышающейся конкуренцией в производстве фасонного литья, важное значение приобретает себестоимость литейной продукции и ее качество.

Современным требованиям по показателям качества в наибольшей мере отвечают специальные способы литья и, в частности, **литье по выплавляемым моделям (ЛВМ).** Это обусловлено тем, что с помощью ЛВМ можно получать отливки сложнейшей конфигурации, с минимальными припусками на механическую обработку, с высокой размерной точностью (до 4-5 класса) и чистотой поверхности (шероховатость по R_z до 10 и R_a до 1,25 мкм).

Однако, широкое применение ЛВМ сдерживается (в настоящее время - всего 1,5% от общей доли отливок в машиностроении) ее высокой трудоемкостью, материалоемкостью, и длительностью технологического процесса.

В связи с этим, *актуальными* становятся задачи по разработке комплекса технологических решений, направленных на обеспечение требуемого качества с одновременным снижением себестоимости стальных отливок ответственного назначения за счет использования плавленого кварца в качестве огнеупорного наполнителя для изготовления керамических форм, а также снижения брака огнеупорных керамических форм по растрескиванию и брака отливок по металлургическим и литейным дефектам.

Работа выполнена в рамках реализации Государственных программ Самарской области «Инновационное развитие предприятий машинострои-

тельного комплекса Самарской области до 2020 г.» (раздел «Металлургическое производство»), участия в конкурсе поддержки инновационных проектов «Инновация-2015» и программы модернизации участка литья по выплавляемым моделям на ООО ПКФ «Вершина» (г. Самара).

Основная часть исследований, экспериментов и испытаний выполнена на базе «Центра литейных технологий» (ЦЛТ) и Центра коллективного пользования «Исследование физико-химических свойств веществ и материалов» ФГБОУ ВО СамГТУ, а также в Центральной заводской лаборатории ПАО «КУЗНЕЦОВ» (г. Самара). Опытно-промышленная апробация проводилась в литейном производстве ООО ПКФ «Вершина» и Центре литейных технологий ФГБОУ ВО СамГТУ (г. Самара).

Целью работы является исследование, разработка и внедрение технологического процесса изготовления огнеупорных керамических форм с использованием плавленого кварца, обеспечивающего повышение эффективности производства стальных отливок ответственного назначения литьем по выплавляемым моделям.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

1. Выполнить сравнительные исследования линейной усадки модельных составов различных видов, в зависимости от температуры окружающей среды.
2. Исследовать закономерности взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма».
3. Разработать технологические параметры выплавления восковых моделей из огнеупорной керамической формы на основе плавленого кварца.
4. Разработать технологический процесс изготовления отливок ответственного назначения, получаемых литьем по выплавляемым моделям в огнеупорные керамические формы из плавленого кварца.
5. Оценить эффективность замены кристаллического кварца на плавленый кварц в технологии изготовления огнеупорных керамических

форм и обосновать целесообразность его применения при получении стальных отливок ответственного назначения.

6. Провести опытно-промышленные испытания и доказать эффективность разработанного технологического процесса.

7. Внедрить разработанный технологический процесс в производство стальных отливок ответственного назначения литьем по выплавляемым моделям.

Научная новизна.

1. Впервые проведено сравнительное исследование свободной линейной усадки в процессе затвердевания модельных составов различных видов. Установлено что усадочные процессы в модельных составах протекают в течение до 24 ч. Сделано обоснованное предположение, что это обусловлено длительностью процессов полимеризации, протекающих в модельных составах.

2. Впервые исследовано изменение линейных размеров моделей в зависимости от температуры окружающей среды в диапазоне от (-5) до +35 °С . Установлено, что с понижением температуры происходит уменьшение, а с повышением температуры, относительно комнатной - увеличение линейных размеров образцов из модельных составов. Диапазон изменения линейных размеров зависит от вида модельного состава: не наполненные модельные составы (Romocast 105, Romocast 152, МВС-3Т, ПС 50-50): от (-0,35) до (+0,44)%; наполненные модельные составы (Romocast 252, Romocast 325): от (-0,15) до (+0,4)%.

3. Для объяснения причин растрескивания огнеупорных керамических форм из плавленого кварца при выплавлении модельного состава предложено модифицированное выражение У.Д. Кингери: $\sigma_{BH} = \frac{k_{KO} \times E(T_1 - T_2)}{1-\mu} + P$, где Р – давление оказываемое на стенку ОКФ расширяющимся модельным составом при его нагревании для выплавления. Обосновано, что растрескивание ОКФ при выплавлении модельного состава не

происходит при соблюдении следующего условия: $\sigma_{ВН} \leq \sigma_{в}$, где $\sigma_{в}$ – предел прочности ОКФ при растяжении.

4. Получена зависимость величины зазора между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ в исследованном интервале температур для взаимосвязанной системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма»: $\Delta h = -0{,}0003T^3 - 0{,}0008T + 0{,}1322$, где Δh – зазор между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ, мм; Т - температура системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» перед выплавлением, ^{0}С.

5. Установлена закономерность взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» при использовании плавленого кварца в качестве огнеупорного наполнителя. На основании данной закономерности предложена физическая модель, объясняющая снижение давления модельного состава на огнеупорную керамическую форму из плавленого кварца при выплавлении модели за счет охлаждения системы перед выплавлением модельного состава на 10÷15 °С относительно ее текущей температуры.

6. Для формирования зазора в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» на практике предложено следующее условие: $\Delta T=(T_{ф1}–T_{ф2}) \sim +(10÷15)\ ^0$С, где ΔT – требуемая величина охлаждения относительно текущей температуры системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» (^{0}С); $T_{ф1}$ и $T_{ф2}$ – текущая и требуемая температуры ОКФ (^{0}С).

Практическая значимость.

1. На разработанную технологию получен патент на изобретение RU № 2509622 «Способ изготовления огнеупорной оболочковой формы» (дата публикации 20.03.2014).

2. Внедрение разработанного комплекса технологических решений в литейном производстве ООО ПКФ «Вершина» (г. Самара) способст-

вовало повышению эффективности производства отливок ответственного назначения из сталей марок 40ХЛ («Вал») и 35ХГСЛ («Корпус») по следующим показателям: устранение брака огнеупорных керамических форм из плавленого кварца по растрескиванию при выплавлении модельного состава; сокращение расхода электроэнергии на операцию прокаливания в 6 раз; увеличение производительности операции прокалки огнеупорных керамических форм в 5-7 раз; сокращение брака стальных отливок в 3 раза;

3. На основании разработанной технологии реализована программа модернизации участка ЛВМ для получения отливок «Вал» из стали 45ХЛ. Эффективность результатов исследования подтверждены актом внедрения в литейном производстве ООО ПКФ «Вершина» (г. Самара).

4. По разработанной технологии спроектирована и организована лаборатория для литья по выплавляемым моделям в Центре литейных технологий СамГТУ.

5. Впервые показана эффективность получения отливок единичной и мелкой серии литьем по выплавляемым моделям с использованием реверс-инжиниринга и аддитивных технологий.

6. Результаты исследований используются в учебном процессе кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ в курсе учебных дисциплин «Специальные способы литья», «Производство отливок из сталей и чугуна» и «Технология литейного производства».

Реализация результатов работы в промышленности. Выполнена модернизация участка литья по выплавляемым моделям и внедрена технология получения отливок из сталей марок 40ХЛ («Вал») и 35ХГСЛ («Корпус») в огнеупорные керамические формы на основе плавленого кварца (*ООО ПКФ «Вершина»,* г. Самара). Получено заключение о высоком качестве отливок «Корпус» из стали марки 35ХГСЛ (ОАО «Гидроавтоматика», г. Самара). В Центре литейных технологий ФГБОУ ВО СамГТУ

организовано производство стальных отливок единичной и мелкой серийности литьем по выплавляемым моделям.

Положения, выносимые на защиту.

1. Массив экспериментальных данных по свободной линейной усадке модельных составов различных видов в зависимости от времени выдержки моделей после их получения, и температуры окружающей среды.

2. Механизм взаимодействия в системе « выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма».

3. Комплекс технологических решений, направленных на повышение эффективности производства стальных отливок литьем по выплавляемым моделям.

Методы исследования. Работа выполнена с использованием современных методик исследования и аналитического оборудования для определения свободной линейной усадки модельных составов, предела прочности и газопроницаемости огнеупорных керамических форм, механических свойств сталей; моделирование гидродинамических и кристаллизационных процессов выполнялось с применением лицензионной системы автоматизированного моделирования литейных процессов; статистическая обработка результатов исследований осуществлялась с использованием методов статистического анализа в программе Microsoft Excel 2010 и «STATGRAPHICS».

Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов и разработанных технологий основана на применении современных методов исследований и аналитического оборудования Центра коллективного пользования «Исследование физико-химических свойств веществ и материалов» ФГБОУ ВО СамГТУ, а также Центральной заводской лаборатории ПАО «КУЗНЕЦОВ» (г. Самара); использовании лицензионной системы автоматизированного моделирования литейных процессов; соответствии результатов исследований, полученных автором, результатам других исследователей в этой области; практической реализации получен-

ных результатов, а также актах внедрения и апробации разработанных технологических решений, результатах опытно-промышленных испытаний и патенте на изобретение.

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

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических мероприятиях: IV-VI Всероссийских научно-технических конференциях «Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства» (2012…2014 г.г., Самара); Международных научно-практических и научно-технических конференциях «Литейное производство сегодня и завтра» (2014 г., Санкт-Петербург), «Современное состояние и перспективы развития литейного производства» (2015 г., Москва), «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве» (2016 г., Чебоксары); XII и XIII Съездах литейщиков России (2015 г., Нижний Новгород; 2017 г., Челябинск); III Всероссийской научно-практической конференции «Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение» (2017 г. Чебоксары). Разработки отмечены дипломами «За инновационную разработку в области литейных технологий» на международной выставке «Промышленный салон-2013» (2013 г., Самара), Самарского отделения Российской ассоциации литейщиков «За вклад во взаимодействие науки и литейного производства Самарской области» (2013 г. Самара), Самарского государственного технического университета «За вклад в развитие кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» и «Центра литейных технологий»» (2014 г., Самара).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 19 научных работ в журналах и сборниках трудов российских и международных научно-технических конференций, в том числе 1 патент на изобрете-

ние, 1 монография, 9 в изданиях из перечня ведущих научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности 05.16.04-Литейное производство: **в части формулы специальности:** «решения научно-технических проблем данной специальности … в совершенствовании существующих и создании новых высокопроизводительных малоотходных … технологий литья…, повышения качества отливок и технико-экономической эффективности литейного производства»; **в части области исследования:** пункту 1: Исследование физических, физико-химических, теплофизических, технологических и служебных свойств материалов, как объектов и средств реализаций литейных технологий; пункту 11: Ресурсосбережение в литейном производстве; пункту 12: Исследование проблем качества литья.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 5 глав, заключения и основных выводов, списка литературы и приложений. Изложена на 135 страницах (включая 4 приложения), содержит 50 рисунков, 17 таблиц, а также список литературы из 105 наименований.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЦЕЛЕЙ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Современное состояние и проблемы литья по выплавляемым моделям

Литьем по выплавляемым моделям называется способ получения литых изделий в многослойных оболочковых неразъемных разовых формах, изготовляемых по разовым (выплавляемым, выжигаемым и растворяемым) моделям [1].

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) является одним из старейших способов получения литых изделий и использовался ранее, в основном, для изготовления отливок декоративно-художественного назначения (ювелирные изделия, интерьерные и статуарные отливки). Процесс ЛВМ получил широкое распространение из-за возможности получать литые изделия сложной геометрии с высоким качеством поверхности и точностью размеров. Данный способ литья наиболее эффективен в тех случаях, когда требования предъявляемые к литой заготовке невозможно выполнить другими способами литья или обработки металлов (ковка, штамповка, механическая обработка и т.д.) или если получение такой заготовки другими способами будет дороже. Считается, что первые технологии литья по выплавляемым моделям берут свое начало с 5000 г. до н. э., когда ранний человек использовал этот способ для производства элементарных инструментов [2].

Начало промышленного освоения данного способа в мире относится к 40-м г.г. XX-го века и связано с освоением производства лопаток авиационных газотурбинных двигателей из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов [3].

Способ ЛВМ позволяет получать отливки массой от нескольких граммов до нескольких сот килограммов, сложной конфигурации с толщи-

ной стенки менее 1 мм практически из любых сплавов (магниевых, алюминиевых, медных, сталей, чугунов, а также жаропрочных никелевых и титановых сплавов).

ЛВМ обеспечивает коэффициент использования металла (КИМ) на уровне 90-95%, что сопоставимо с данным показателем для литья под давлением. Укрупненная схема технологического процесса ЛВМ представлена на рис. 1.1.

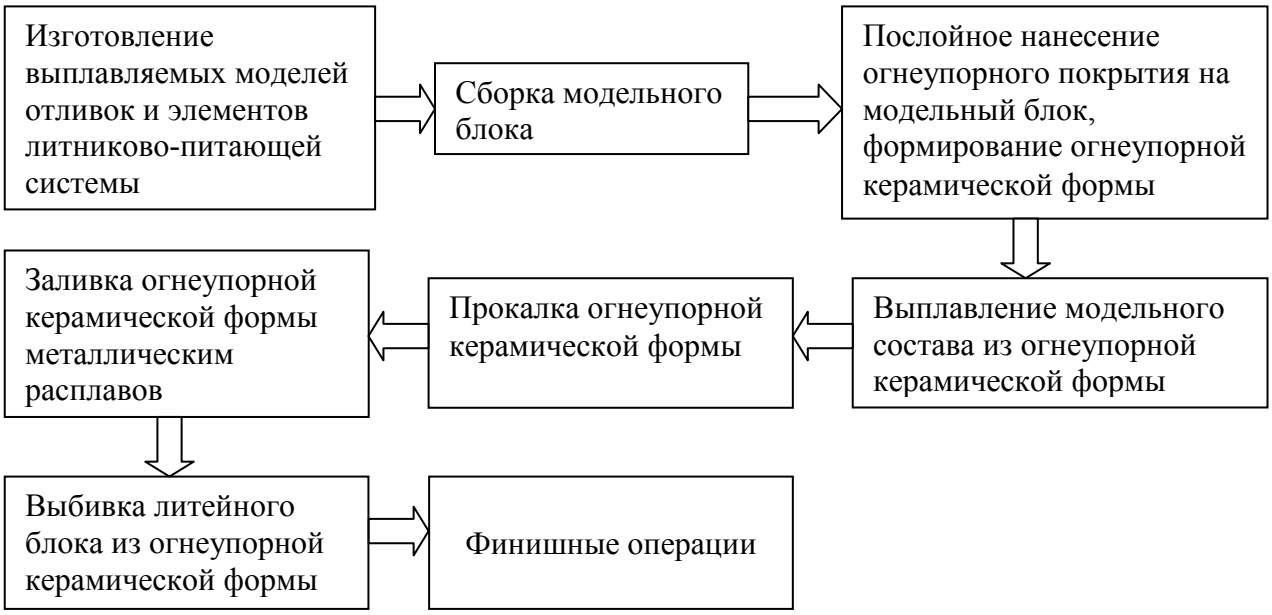


Рисунок 1.1 – Укрупненная схема технологического процесса литья по выплавляемым моделям

Основные технологические этапы современного способа ЛВМ заключаются в следующем. В специальных пресс-формах изготавливают модели отливок и элементов литниково-питающих систем. Материалом для изготовления моделей, как правило, служат легкоплавкие воскообразные составы на основе синтетических смол, пластмасс, восков. Модели и элементы литниково-питающих систем соединяют в блок, на который далее послойно наносят суспензию, состоящую из связующего материала и огнеупорного пылевидного наполнителя. На каждый нанесенный слой суспензии для повышения прочности и улучшения взаимосвязи между

слоями наносят обсыпочный огнеупорный материал, который может быть такой же природы, что и пылевидный, но более крупной фракции. Каждый слой в зависимости от вида связующего сушат по определенным технологическим режимам (влажность воздуха, температура, время и т.д.). Количество слоев зависит от сложности и габаритов модели отливки. Далее, из готовой неразъемной огнеупорной керамической формы производят выплавление модельного состава в теплоносителе (горячая вода, пар, и т.д.). Огнеупорные керамические оболочковые формы подвергаются прокалке и подаются на заливку.

В связи с многостадийностью и трудоемкостью процесса себестоимость тонны, например, стальных отливок, полученных ЛВМ, в 1,5÷10 раз выше, чем при литье в песчано-глинистые формы (ПГФ). Однако, отливки, полученные способом ЛВМ, характеризуются высокой размерной точностью (до 4-5 класса) и чистотой поверхности (шероховатость по R_z до 10 и R_a до 1,25 мкм) [1, 3, 4]. Для сравнения, при литье в ПГФ минимальная шероховатость по R_z составляет 40, а максимальная до 320 мкм.

Кроме того, применение точных отливок взамен изготовления деталей, например, из деформированных полуфабрикатов позволяет сократить объем механической обработки в 3 – 10 раз, в 5 – 10 раз повысить КИМ, тем самым существенно снизить трудоемкость изготовления изделия [5].

В связи с многостадийностью процесса литья по выплавляемым моделям совершенствование данного способа происходит по следующим основным направлениям:

- разработка новых технологичных модельных составов для изготовления выплавляемых моделей отливок и элементов литниково-питающих систем;
- внедрение эффективных огнеупорных материалов для изготовления огнеупорных керамических форм (ОКФ);
- разработка технологий подготовки ОКФ к заливке;
- разработка технологий подготовки расплавов к литью.

1.2 Современные направления в совершенствовании технологий изготовления огнеупорных керамических форм для ЛВМ

Проблемами совершенствования технологий литья по выплавляемым моделям интенсивно занимаются научные коллективы Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск) [6], Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (г. Санкт-Петербург) [7, 8], Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева» (г. Нижний Новгород) [9], «МАТИ - РГТУ им. К.Э.Циолковского» (г. Москва) [10], Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (г. Магнитогорск) [11] и др.

Для изготовления огнеупорной керамической формы (ОКФ) используют пылевидный (наполнитель в суспензию) и зерновой (обсыпочный) огнеупорные материалы, а также связующие. Типовой технологический процесс изготовления многослойных ОКФ можно представить в виде достаточно сложной, многоступенчатой схемы (рис.1.2), [12].

Для формирования керамического покрытия модельный блок под углом 40-60 градусов погружают на 3-6 с. в огнеупорную суспензию и медленно поворачивают вокруг оси с целью полного смачивания модельного блока суспензией. После извлечения из суспензии модельный блок выдерживают в течение нескольких секунд над баком с целью стекания излишков суспензии, производят обсыпку зернистым материалом и передают на сушку. В результате на поверхности модельного блока создается лицевой (контактный, рабочий) слой керамической оболочки. Зернистый обсыпочный материал придает прочность и жесткость керамической форме в целом. Количество наносимых на модельный блок слоев определяется в зависимости от требуемой прочности формы, ее металлоемкости, огнеупорности, способа формовки и составляет, как правило, от 4-х до 10 и более,

при этом толщина слоя в среднем составляет 0,8 мм. Необходимые прочностные свойства каждый слой огнеупорного покрытия приобретает только после сушки по определенным режимам. В результате сушки происходит удаление жидкой составляющей суспензии и твердение связующего вещества. При изготовлении керамической формы применяют различные растворы связующих материалов, где связующим веществом является тугоплавкий неорганический окисел или соединения окислов, которые образуются при сушке и прокаливании оболочки. Известные связующие подразделяются на кислые, амфотерные и основные [3, 4].

Рисунок 1.2 – Схема типового технологического процесса изготовления огнеупорных керамических форм (ОКФ)

К кислым связующим относится широко применяемый на предприятиях этилсиликат марок ЭТС-32 и ЭТС-40. Однако, применение этилсиликата имеет следующие основные недостатки: вредность для здоровья, необходимость применения органических растворителей, пожароопасность, необходимость проведения операции гидролиза с целью придания

вяжущих свойств, низкая живучесть суспензий на этилсиликате, необходимость сушки форм в среде аммиака [12-15]. В связи с вышесказанным, в настоящее время находит широкое применение готовое этилсиликатное связующее ГС-20П, производимое ООО «Пента-91», которое не требует проведения операции гидролиза, и предусматривает возможность проведения сушки без аммиака[16].

Низкокремнистое этилсиликатное связующее (НКЭС), содержащее 10÷12 % SiO_2 позволяет получать керамические оболочки с высокой термомеханической стойкостью при заливке жаропрочными сплавами [17]. Однако, в настоящее время данное связующее еще не нашло широкого промышленного применения.

В ряде исследований в качестве связующего рекомендуется применение жидкого стекла. Однако, в связи с тем, что температура плавления жидких стекол находится в пределах 800÷1100°С применение их в литье по выплавляемым моделям для сплавов с более высокими температурами заливки является достаточно затруднительным и сопровождается рядом сложностей. С целью получения качественной отливки, и предотвращения разрушения керамической оболочки при заливке, как правило, применяют заливку в опорном наполнителе [18].

Для ускорения коагуляции, в суспензии на основе жидкого стекла вводят добавку эфироальдегидной фракции или спирта [19]. Жидкостекольную суспензию в данном случае рекомендуется применять со второго слоя покрытия. Однако, такой прием усложняет технологический процесс изготовления форм. Применение указанной суспензии с первого слоя приводит к получению отливок ответственного назначения с неудовлетворительным качеством поверхности [20]. Каждый наносимый огнеупорный слой рекомендуется закреплять в 20%-ном растворе хлористого аммония с выдержкой на воздухе в течение 10-30 мин до исчезновения запаха аммиака. Несмотря на экологические преимущества по сравнению с этилсиликатом, в силу указанных особенностей процесса при изготовлении керамиче-

ских форм, жидкое стекло, как связующий материал, применяется крайне редко.

В настоящее время наиболее широкое применение находят кремнезоли, являющиеся водным коллоидным раствором двуокиси кремния, который стабилизирован микродобавкой двуокиси натрия. Связующие свойства кремнезолей обеспечиваются путем поликонденсации силанольных групп при удалении воды из раствора, что обеспечивает образование прочных силоксановых связей. Кремнезоли относятся к числу готовых связующих материалов. Кремнезоли обладают рядом следующих преимуществ: длительная живучесть (6-8 месяцев), высокая седиментационная устойчивость суспензий, высокая прочность керамических оболочек, экологическая безопасность. Наиболее распространенными на российском рынке являются кремнезоли: Сиалит-20С (ЗАО «Силикат», Россия), Ludox-SK (США), Syton (Великобритания), Remasol (Remet UK ltd).

Связующее марки «Сиалит-20С» является водным раствором высокодисперсного коллоидного силиката натрия с частицами кремнезема размером 8-10 нм [21]. Применение в производстве связующего «Сиалит-20» позволяет улучшить экологическую обстановку в цехах литья по выплавляемым моделям. Помимо этого, «Сиалит-20С» обладает высокой агрегативной и кинетической устойчивостью [22, 23]. Находят применение кислые кремнезоли такие, как «Армосил-К» (Россия) с pH<4,5. Наиболее известные импортные аналоги данного связующего: GS-30 (КНР) и Ludox SKF (США).

Основным отличием кислых связующих от стабилизированных щелочью является образование силиката натрия и его растекание по границам зерен огнеупорного материала [7, 8]. Использование кремнезоля «Армосил-К» обуславливает интенсивное нарастание керамического покрытия. Однако, прочностные свойства керамической формы при этом существенно не улучшаются, но высокая горячая прочность позволяет применять данное связующее при литье никелевых сплавов методом направленной

кристаллизации. На сегодняшний день активно проводятся исследования по применению в ЛВМ бескремнеземных связующих, например алюмоборфосфатного концентрата (АБФК) [24-29]. Применение АБФК ускоряет цикл формообразования и улучшает физико-механические свойства керамических форм по сравнению с формами на этилсиликате. Для получения отливок из титановых сплавов, а также сплавов с высокой температурой плавления разработаны связующие на основе α-Al_2O_3 (так называемые, алюмозоли). К ним относятся такие, как «Алюмокс» [30] и «Remal 20» [31]. Несмотря на их преимущества перед кремнезолями, применение алюмозолей в производстве весьма затруднительно: они твердеют в керамической форме обратимо, что требует определенных условий сушки слоев и удаления модельной массы. Суспензии на основе данного типа связующих рекомендуются применять только на лицевой (контактный) слой, а прокалку форм производить при высокой температуре (~1300°С), что приводит к повышению стоимости изготовления керамической формы.

Для изготовления керамических форм применяют пылевидные и зернистые огнеупорные материалы. Некоторые свойства наиболее широко применяемых огнеупорных материалов приведены в табл. 1.1. К огнеупорным материалам предъявляется ряд требований: огнеупорность, химическая стойкость к заливаемому расплаву, низкий и стабильный коэффициент теплового линейного расширения (КТЛР) в интервале рабочих температур, минимальная стоимость, экологическая безопасность [3, 4].

Кварц кристаллический (кварцевый песок, маршалит) является наиболее распространенным и дешевым материалом для изготовления керамических форм. В качестве обсыпочного материала применяют кварцевый песок с размером зерна 0,16-0,20 мм для первого слоя и 0,315-0,40 мм для последующих слоев. В качестве наполнителя для суспензии применяют молотый кварцевый песок (маршалит), при этом размер зерна должен быть менее 50 мкм.

Таблица 1.1 – Свойства огнеупорных материалов

Материал и химическая формула	Физико-химические свойства			
	химические	$t_{пл}$, °С	ρ, кг/м^3	КТЛР, 1/°С 10^6
Окислы				
Кварц кристаллический SiO_2 (кв.песок, маршалит)	Кислый	1713	2650	13,7
Кварц плавленый (аморфный) НКС SiO_2	Кислый	1713	2020	0,4-0,5
Электрокорунд белый α-Al_2O_3	Амфотерный	2050	3990	8,8
Окись магния (периклаз) MgO	Основной	2825	3580	13,5
Соединения окислов				
Дистен-силлиманит $Al_2O_3 \cdot SiO_2$	Слабокислый	1545	3250	4,5-5,5
Силикат циркония $ZrO_2 \cdot SiO_2$	Слабокислый	2420	4570	4,2
Высокоглиноземистый шамот $3Al_2O_3 \cdot SiO_2$	Амфотерный	1600	3000	5,3
Муллит $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	Амфотерный	1850	3040	4,3

Температура плавления кварца составляет 1713°С, при нагреве претерпевает ряд полиморфных превращений (в скобках указана плотность модификации, кг/м^3): β-кварц (2650) ↔ 573°С ↔ α-кварц (2530) ↔ 870°С ↔ β-тридимит (2220) ↔ 1470°С ↔ β-кристаболит (2190) ↔ 1713°С ↔ расплав. Так как происходит изменение плотности, то каждое полиморфное превращение сопровождается изменением объема [32]. Наиболее существенным является полиморфное превращение при температуре 573°С, которое сопровождающееся изменением объема кварцевого песка на 2,4% [24]. Это приводит к образованию большого количества микротрещин в теле огнеупорных керамических форм, в результате чего они теряют требуемые прочностные характеристики. Изменение объема ОКФ обуславливает снижение геометрической точности отливок.

В связи с вышесказанным, перспективным в настоящее время в качестве огнеупорного наполнителя является плавленый кварц (кварц аморф-

ный), несмотря на то, что как огнеупорный материал известен давно [33, 34]. Его отличительными особенностями являются отсутствие полиморфных превращений и очень низкий КТЛР. Огнеупорные керамические формы, изготовленные на основе плавленого кварца, обладают высокой термостойкостью и стабильностью размеров. Благодаря этому плавленый кварц можно применять для изготовления ОКФ при получении крупногабаритных отливок диаметром до 1200 мм из жаропрочных сплавов [35, 36]. Низкий КТЛР позволяет загружать в прокалочную печь формы из плавленого кварца при любой начальной температуре, что сокращает длительность прокаливания, а также производить заливку без опорного наполнителя.

Наиболее известной торговой маркой плавленого кварца в России является «Кефрон» (г. Екатеринбург). ОКФ на основе плавленого кварца обладают высокой прочностью, легкостью (ρ=2020-2150 кг/м^3), высокой химической стойкостью [37-41]. При этом первые два слоя керамической оболочки формируют из электрокорунда, а последующие - из плавленого кварца, который при высоких температурах способствует локализации трещин, образующихся в лицевых слоях.

Наиболее чистым по примесям огнеупорным материалом является электрокорунд (α-Al_2O_3), представляющий собой наиболее устойчивую в широком интервале температур разновидность глинозема. Его получают прокаливанием гидратов или солей алюминия при температуре >1200°С, а также плавлением при 2100÷2500°С технического глинозема γ- Al_2O_3 или бокситов – природных пород, содержащих гидраргиллит, бемит, диаспор [42]. В цехах литья по выплавляемым моделям наибольшее распространение получил белый электрокорунд, который применяют в качестве наполнителя в суспензию и как зернистый обсыпочный материал. В некоторых случаях, в целях экономии дорогостоящего белого электрокорунда, для обсыпки третьего и последующих слоев применяют черный (нормальный) электрокорунд. Для литья с направленной кристаллизацией, при получе-

нии лопаток турбины ГТД, рекомендуется применять электрокорундовую суспензию и обсыпку, а с целью получения регламентированной равноосной структуры в суспензию дополнительно вводят модификатор – алюминат кобальта [43].

К основному недостатку электрокорунда относится его высокий удельный вес - 3990 кг/м^3. С целью снижения массы керамической оболочки предлагается использовать сферокорунд – полые зерна сферической формы, насыпной вес которого составляет 800-1200 кг/м^3 [44]. Сферокорунд не изменяет своих свойств после заливки и может использоваться многократно без специальной предварительной подготовки.

Окись магния MgO (периклаз) используют, в основном, для изготовления ОКФ при получении отливок из высокомарганцовистых сталей [4, 42]. Периклаз, при использовании в составе с алюмоборфосфатным концентратом (АБФК), предлагается применять при изготовлении ОКФ для получения отливок из никелевых сплавов [24].

Дистен-силлиманит ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) и цирконовый песок (силикат циркония $ZrO_2 \cdot SiO_2$) редко используют в качестве обсыпочного материала. Данные огнеупоры, в основном, используются в качестве наполнителей в суспензию.

В НГТУ (г. Нижний Новгород) проводятся работы по вовлечению техногенных вторичных материалов и отходов в технологию ЛВМ при формировании огнеупорных керамических форм. В работе [45] для формирования первого слоя в суспензию рекомендуется вводить абразивную пыль, образующуюся в результате полировально-шлифовальной обработки изделий из сплавов черных металлов, в качестве мелкодисперсного модификатора. В результате направленного теплоотвода происходит получение отливок с мелкокристаллической структурой. Известен способ по использованию в качестве обсыпки отходов абразивной обработки деталей, которые представляют собой смесь электрокорунда, железной окалины и железа [46]. За счет этого ОКФ приобретает высокую теплопроводность и тре-

щиностойкость. В способах [47, 48] в ОКФ предлагается вводить кислородосодержащие добавки (полупродукт переработки шламов селитровых ванн) для повышения спекаемости, за счет протекания экзотермических реакций при прокаливании.

Формирование керамических слоев осуществляют при использовании пескосыпов псевдокипящего слоя и элеваторного (дождевого) типа. В настоящее время пескосыпы дождевого типа нашли широкое применение в автоматизированных линиях изготовления оболочковых форм.

На технологические параметры керамической формы большое влияние оказывают параметры сушки. Известно несколько способов сушки: конвективная при атмосферном давлении, воздушно-аммиачная, вакуумно-аммиачная, инфракрасная. Каждый из способов имеет свои достоинства и недостатки. Выбор способа сушки зависит, прежде всего, от типа применяемого связующего. Например, при использовании в качестве связующего этилсиликата, широко применяется воздушно-аммиачная сушка. При этом происходит ускорение процесса гелеобразования. С целью интенсификации процессов гелеобразования предлагается плакировать частицы обсыпочного материала специальным катализатором [44]. Применение плакированного зернистого материала (ПЗМ) в сочетании с суспензией на основе ЭТС-40 позволяет сократить более чем в 2,5 раза цикл изготовления керамических оболочек и повысить в 1,5 раза прочностные характеристики керамических форм.

При использовании связующих на водной основе находит применение инфракрасная сушка, позволяющая сократить цикл изготовления керамических форм в 20-30 раз [49]. Оборудование для инфракрасной сушки производится немецкой фирмой MK Technology. Одной из разработок указанной фирмы является установка Cyclone, позволяющая осуществлять полный цикл производства оболочковых форм менее чем за 4 часа.

Конвективная сушка является самым простым, но более длительным вариантом. Поэтому при использовании водных связующих с целью ин-

тенсификации процесса сушки необходим принудительный обдув ОКФ [4]. В работе [50] предлагается способ сушки керамических форм на основе плавленого кварца в объемно-напряженном состоянии, которое реализуется в потоке сушильного агента при погруженном в материал обсыпки модельном блоке. При этом время сушки сокращается в 4,1 раза, а также происходит повышение физико-механических свойств ОКФ.

Выплавление модельного состава из форм осуществляют, как правило, путем их нагрева в газообразной или жидкой среде до температуры 95-200 °С при давлении от атмосферного до 0,8 МПа. В качестве рабочей среды используют горячую воду, перегретый пар, жидкий модельный состав, горячий воздух. Выплавление модельного состава может осуществляться в полигликоле, на воздухе с использованием токов высокой частоты или светового излучения [3, 4, 51-53].

Прокаливание керамической оболочки является обязательной технологической операцией, которая включает нагрев до требуемой температуры и изотермическую выдержку. Во время прокаливания происходит удаление из оболочки газотворных веществ, спекание связующего вещества, образование пор в оболочке. Прокаливание керамических оболочек производят в электрических или газовых печах камерного или проходного типов. Условия и режимы прокаливания назначаются в зависимости от свойств сплава отливки, керамической формы, типа прокалочной печи и т.д. [3, 4, 52, 54].

Прокаливание керамической оболочки является самой энергоемкой операцией технологического процесса ЛВМ. В связи с этим многие работы направлены на снижение ее энергоемкости. В работах [9, 55, 56] предлагается технология низкотемпературного прокаливания (НТП) оболочковых форм из кварца, включающая следующие основные этапы: введение кислородосодержащих добавок в оболочку, использование мелкодисперсной обсыпки для первого слоя, применение «бережной формовки» (установка под стояками керамических подставок) и т.д. При выполнении указанных

условий обеспечивается существенное снижение температуры (до 650-750°С) и времени (в 1,5-2,0 раза) прокаливания.

В работе [11] показано, что оптимизация процесса прокаливания керамических форм со снижением температуры прокаливания возможна за счет использования в качестве обсыпочного материала (взамен кварцевого песка) золы ТЭЦ. Такой подход способствует снижению себестоимости технологического процесса ЛВМ.

С целью повышения прочности огнеупорных керамических форм в состав суспензии вводят нейлоновые волокна и специальные полимерные добавки [2]. При этом отмечается, что упрочнение ОКФ нейлоновыми волокнами обеспечивает лучшую газопроницаемость формы по сравнению с полимерными добавками. Кроме того, введение в суспензию нейлоновых волокон увеличивает скорость формирования огнеупорных слоев на модели [57]. Введение в суспензию активированного угля сокращает время сушки слоев, повышает пористость вторичных слоев и, в целом, снижает плотность ОКФ [58]. Увеличение пористости обуславливает повышение газопроницаемости формы. Кроме того, добавка 25% активированного угля в суспензию способствует увеличению прочности ОКФ, как в просушенном состоянии, так и после прокалки.

Как было сказано выше, литье по выплавляемым моделям является многостадийным процессом, что существенно повышает себестоимость литых изделий. В связи с этим ведутся интенсивные поиски по снижению затрат на дорогостоящие материалы для изготовления огнеупорных керамических форм.

Например, для изготовления керамических оболочковых форм, включающем обработку модельного блока в огнеупорной суспензии на этилсиликатном или жидкостекольном связующем предлагается использовать пылевидный диоксид кремния в качестве наполнителя в суспензию. Пылевидный диоксид кремния в качестве наполнителя используют в фазе тридимита с размером фракции до 100 мкм. Последующую обсыпку модель-

ного блока осуществляют зернистым материалом на основе диоксида кремния также в фазе тридимита размером зерен 100...400 мкм. Для экономии этилсиликата, снижения себестоимости литых изделий, а также для улучшения выбиваемости, в качестве связующего для первого и второго слоев при обработке модельного блока предлагается использовать гидролизованный раствор этилсиликата. Третий слой формируется за счет нанесения связующего на основе алюмоборфосфатного концентрата плотностью 1,25...1,30 г/см^3, а для последующих слоев в качестве связующего используют жидкое стекло. Для повышения скорости затвердевания жидкостекольных слоев зернистый материал плакируют алюмоборфосфатным концентратом в количестве 3-5% масс от массы зернистого материала [59].

Комплексные технологические подходы с целью повышения качества комбинированных керамических оболочек рассмотрены в работе [60], в которой представлены результаты по влиянию комбинации слоев суспензии на основе жидкого стекла и ортофосфорной кислоты с золой тепловых электростанций на их прочность, коэффициент теплового линейного расширения, газопроницаемость и т.д.

Таким образом, анализ современного состояния технологий изготовления огнеупорных керамических форм для ЛВМ показывает, что наблюдается тенденция к разработке ресурсосберегающих мероприятий, направленных на повышение качества оболочковых форм, уменьшения экологической нагрузки, снижения стоимости изготовления форм. Одним из важных направлений повышения качества керамических оболочек является поиск новых огнеупорных материалов, а также вовлечение в технологический процесс техногенных отходов.

Однако, в исследованиях недостаточно рассматривается такая важная проблема, как взаимодействие в системе «выплавляемая модель-огнеупорная керамическая форма». Процессы взаимодействия в системе «выплавляемая модель-огнеупорная керамическая форма» приобретают важное значение при операции выплавления модельного состава из формы.

1.3 Особенности модельных составов, применяемых в литье по выплавляемым моделям

Известные в настоящее время виды модельных составов обладают достаточно разнообразными свойствами и разработаны для различных условий и серийности производства, оборудования и используемой оснастки, номенклатуры отливок и требований к качеству литья и т.п.

Следует отметить, что с развитием и совершенствованием технологий ЛВМ не прекращаются исследования по модернизации известных и созданию новых модельных составов. Однако, из более, чем 200 различных марок, известных на сегодняшний момент, в ЛВМ используется не более десяти [61]. Геометрическая точность отливок во многом определяется точностью геометрии выплавляемых моделей, которая в свою очередь зависит от свойств используемого модельного состава, сложности моделей, условий их производства и хранения. Это объясняется следующими основными факторами. Во-первых, любая выплавляемая модель, получаемая из жидкого или пастообразного модельного состава, является, по сути, отливкой. Поэтому при формировании модели в пресс-форме в ней протекают сходные процессы, протекающие при формировании отливок из металлов и их сплавов, пластмасс, стекла, камня и др. [62].

Наиболее полная классификация свойств модельных составов представлена в работах [1, 3, 4]. Модельные составы (МС) классифицируются по следующим основным признакам: природа и количественное соотношение компонентов, входящих в МС; технологические свойства; методы изготовления моделей и способы их удаления из форм [1, 3]. В связи с этим к модельным составам предъявляется большой комплекс требований по физическим, химическим, технологическим и другим свойствам [4]. В целом, модельные составы должны обладать следующими основными характеристиками: температура плавления 50-90^{0}С; высокие теплопроводность и жидкотекучесть в жидком и пастообразном состояниях; мини-

мальное время затвердевания в пресс-форме; отсутствие прилипаемости к рабочей поверхности пресс-формы; возможность спаиваемости между собой отдельных элементов при сборке модельного блока; низкая плотность (не более 1 г/см^3) [3].

На рис. 1.3 представлены классификационные признаки модельных составов согласно [4]. На основании 4-х классификационных признаков

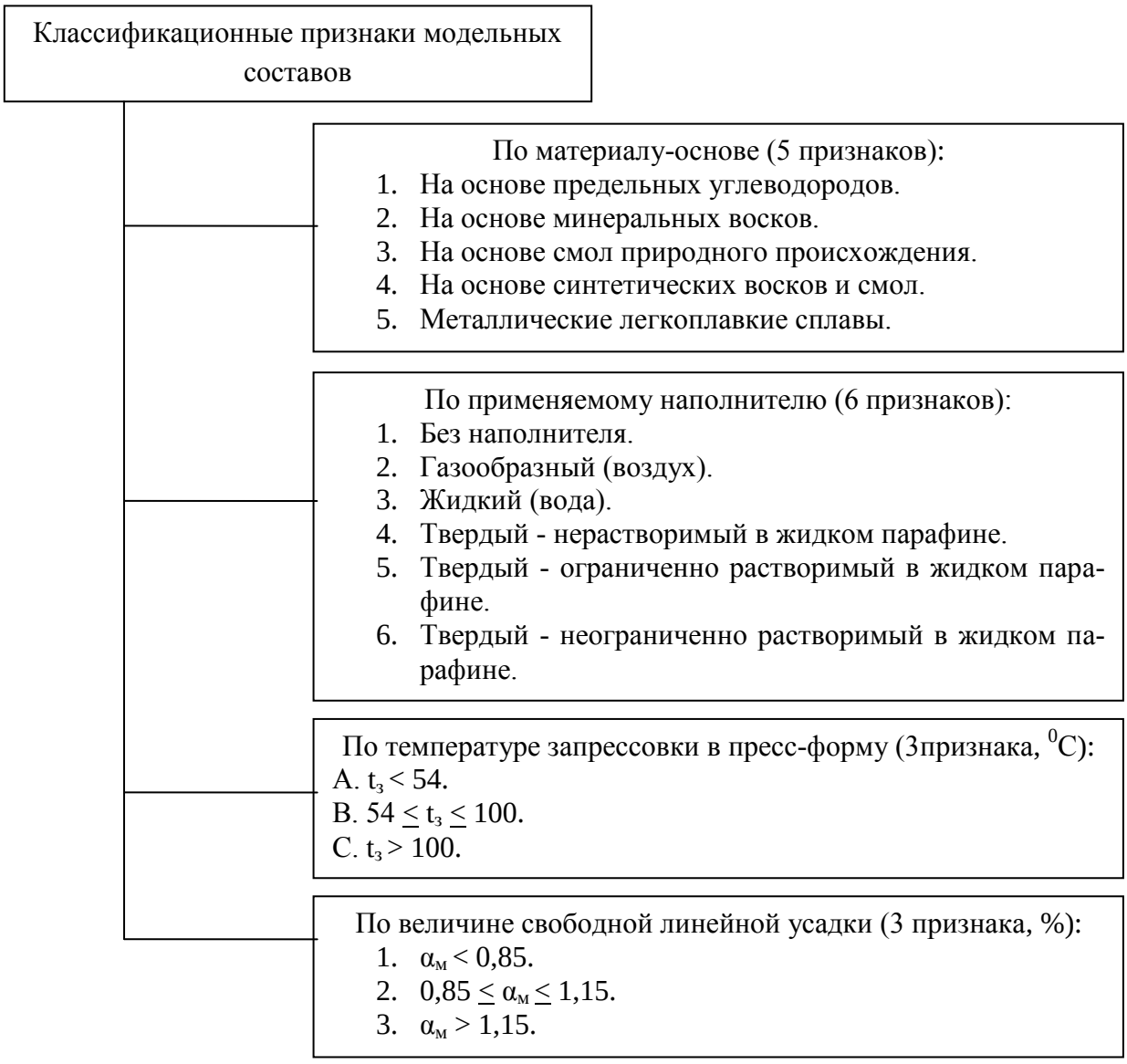


Рисунок 1.3 – Классификация модельных составов по основным признакам [4]

все известные модельные составы можно объединить в классы, в обозначении которых первая цифра обозначает группу модельного состава по материалу-основе; вторая цифра – подгруппу по применяемому наполните-

лю; буква – тип по температуре запрессовке; последняя цифра – разряд по величине свободной линейной усадки. Согласно приведенным классификационным признакам в табл. 1.2 представлены некоторые свойства наиболее широко известным модельных составов, которые до сих пор применяются в производстве отливок литьем по выплавляемым моделям.

Таблица 1.2 – Свойства модельных составов согласно классификации

Класс [4]	Марка	Вид и содержание компонентов, %	$t_з$, ^{0}C	$\alpha_м$, %
12A1	ПС 50-50	Парафин – 50; Стеарин – 50	47,5	0,3-0,4
12B3	МВС-3Т	Парафин – 45; Церезин (синтетический) – 40; Полиэтиленовый воск - 15	76,9	1,1-1,5
21B2	ВИАМ-102	Парафин – 25; Буроугольный воск – 35; Торфяной воск – 35; Триэтаноламин - 5	80-85	0,90-1,15

Однако, в различных источниках свойства указанных модельных составов различаются. Например, по данным [1] для модельного состава ПС 50-50 свободная линейная усадка находится в интервале 0,8-1,0%. Соответственно, по данному показателю состав ПС 50-50 должен быть отнесен к классу 12A2.

Модельный состав ПС 50-50 (класс 12A1) нашел широкое применение в связи с простотой состава (двухкомпонентный), а также хорошими технологическими свойствами (высокие текучесть и пластичность; низкая твердость; возможность запрессовки при невысоком давлении). Однако, на предприятиях, производящих тонкостенные отливки и использующих автоматизированные пресс-формы, составы типа ПС (парафин+стеарин) применять нецелесообразно. Это обусловлено следующими факторами: низкая скорость затвердевания и охлаждения моделей, что приводит к деформации тонкостенных моделей; недостаточная прочность МС, обуслав-

ливающая массовый брак моделей в процессе их извлечения из автоматизированных пресс-форм, а также при нанесении огнеупорного покрытия на автоматизированных линиях. В связи с этим МС данного класса используют ограниченно в литейных цехах с небольшой серийностью толстостенных стальных отливок или мелкого литья для ремонтных нужд.

В литейных цехах с высокой механизацией и автоматизацией процесса широкое применение находят МС типа МВС-3Т (класс 12В3). Модельные составы данного класса обеспечивают повышенную точность формы, прочность, теплостойкость. Однако, составы типа МВС, содержащие полиэтиленовый воск, характеризуются повышенной линейной усадкой и склонностью к образованию утяжин на моделях. Для устранения указанных недостатков при подготовке таких составов к запрессовке их наполняют газообразным наполнителем (как правило, воздухом).

К числу МС, лишенных вышеперечисленных недостатков относятся составы класса 21В2 (марки В-1, ВИАМ-102, Romonta PW), которые получают на основе минеральных восков природного происхождения. Составы этого класса применяются при производстве моделей отливок типа лопаток турбин, а также тонкостенных отливок ответственного назначения, для которых требуются высокая чистота поверхности и размерная точность.

В настоящее время, в зависимости от особенностей технологического процесса, применяют модельные составы марок «Салют» различных модификаций (разработчик ФГУП «ВИАМ», производитель ММПП «Салют»), ЗГВ (производитель ОАО «Завод горного воска», РБ), МВС (ТУ 0258-006-11035757-2004**),** наиболее распространенный и дешевый - ПС 50-50. На российском рынке появляются зарубежные аналоги Kindt Collins, Blason, Romocast, Remet и других различных модификаций. Как правило, данные составы отличаются друг от друга незначительными добавками, определяющими особенности их применения. Например, составы для изготовления моделей литниково-питающих систем, для изготовления моделей отливок и т.д. При этом, конечному потребителю важны не столько

компоненты, входящие в модельные составы, сколько физические и технологические свойства самих модельных составов. Следует отметить, что в сопроводительной документации, как правило, указывают плотность, прочность при статическом изгибе, температуру каплепадения и зольность модельных составов.

Опыт применения импортных модельных составов марок Remet GTW и Remet GTS (производства Remet UK, Великобритания) при изготовлении моделей лопаток ГТД показал следующее. Установлена возможность замены модельных масс на основе карбамида на синтетические воски марок Remet GTW и Remet GTS для изготовления моделей лопаток; воск Remet GTW рекомендован для изготовления моделей лопаток турбин, а Remet GTS – для моделей лопаток соплового аппарата; при обеспечении оптимальных параметров (температура прессования, время выдержки под давлением) изготовления моделей лопаток из восков Remet GTW и Remet GTS происходит без образования дефектов моделей; модельные воски Remet GTW и Remet GTS обеспечивают необходимую геометрическую точность деталей лопаток турбины и соплового аппарата [62].

Для модельных составов немаловажное значение имеют такие технологические свойства, как свободная и затрудненная линейные усадки, стабильность линейных размеров при изменении температуры окружающей среды. Следует отметить, что указанные технологические свойства МС следует рассматривать во взаимосвязанной системе «модельный состав-огнеупорная керамическая форма».

В работе [63] на основании анализа причин брака при производстве тонкостенных отливок ответственного назначения, получаемых ЛВМ, сформулированы основные технологические критерии для выбора модельных составов. К ним отнесены критерии определяющие склонность МС к короблению, трещиноустойчивости и образованию утяжин на моделях. При этом, отмечается, что в реальных производствах, в большинстве случаев, температура пресс-форм при запрессовке МС регламентируется в

диапазоне 25-30^{0}С, но не контролируется с помощью измерительной аппаратуры; не контролируется цикличность запрессовки и длительность выдержки модели в пресс-формах. Не контролируются такие важные параметры, как температура модели при извлечении ее из пресс-формы, длительность нахождения моделей на воздухе до сборки их в модельный блок, температурный режим и длительность хранения моделей и модельных блоков до нанесения огнеупорного покрытия. Указанные неконтролируемые факторы могут обуславливать повышенный брак моделей, а также оказывать существенное отрицательное влияние на качество будущих отливок.

С целью улучшения технологических свойств известных модельных составов широко применяются методы введения различных модифицирующих добавок. Установлено, что введение в состав промышленных МС небольших количеств соевой муки обуславливает улучшение целого ряда технологических свойств: снижается шероховатость поверхности моделей, уменьшается свободная линейная усадка, повышается твердость и прочность на растяжение МС, улучшается смачиваемость модифицированных моделей огнеупорной суспензией [64].

Важное значение при выплавлении модельного состава из огнеупорной керамической формы имеет степень адгезии на границе контакта «модельный состав-керамическая форма». В работе [65] показано, что величина адгезии меняется в зависимости от температуры выплавления, а также от вида модельного состава. Установлено, что при использовании наполненных промышленных МС проникновение жидкого модельного состава в поры формы не происходит. В связи с этим делается вывод о том, что при использовании наполненных модельных составов в контактном слое формы не остается неудаленных частиц модельного состава, что снижает пригар на поверхности отливок.

В последнее время для изучения процессов взаимодействия в системе «модельный состав-огнеупорная керамическая форма» широко приме-

няются методы компьютерного моделирования. Так, в работе [66] была разработана переходная термомеханическая нелинейная модель на основе конечных элементов, позволяющая прогнозировать образование трещин в огнеупорной керамической форме в зависимости от конструкции модели отливки. В результате моделирования и экспериментальных данных установлено, что наибольшее количество трещин образуется в острых углах сопряжения стенок. При выполнении радиального сопряжения растрескивания формы не происходит.

1.4 Управление качеством литых изделий из сплавов системы Fe-C с позиции явления структурной наследственности

Сохранение и передача структурной информации в системе «шихта-расплав-литое изделие» является природным свойством большинства изученных металлических сплавов [67].

С позиции кластерной природы строения микрогетерогенных расплавов считается, что полное разрушение кластеров и устранение наследственного влияния шихтовых материалов наступает при температуре кипения сплава. Однако, для нивелирования влияния структурной наследственности достаточно перегревов до температур 1,2-1,6$T_{пл}$ в зависимости от природы расплавов [68]. Авторы выделили два метода устранения отрицательной наследственности в сплавах системы Fe-C:

- экстенсивный, за счет замены чушковых чугунов, изменения состава шихт, корректировки технологии производства и химических составов сплавов;

- интенсивный, за счет применения термовременной обработки в печном агрегате, микролегирования и модифицирования, электромагнитного или вибрационного воздействия.

Наследственное влияние структуры шихтовых материалов на строение и структурно-чувствительные свойства жидкой промышленной стали было убедительно доказано в исследованиях научного коллектива под руководством Б.А. Баума [69 - 72]. Промышленные стали с одинаковым химическим составом в жидком состоянии имели разный уровень структурно-чувствительных свойств, а также температуры несовпадения свойств в режимах нагрева и последующего охлаждения (температуры гистерезиса). Исследователи объясняли данные эффекты влиянием предыстории (происхождением) расплава, т.е. структурой исходной шихты. Стальные образцы, полученные после переплава и имеющие повышенные механические свойства, после расплавления в жидком состоянии обладали более высокой вязкостью, меньшими температурами гистерезиса, и пониженными значениями электросопротивления. Влияние на строение расплавов, а, следовательно, и на их структурно-чувствительные свойства оказывал способ выплавки шихтовых материалов. Характерно, что расплав, приготовленный из зоны столбчатых кристаллов стального слитка, имел пониженные значения вязкости по сравнению с расплавом, полученным из центральной и корковой зон того же слитка.

В работе [73] делается заключение о том, что микронеоднородность промышленных сплавов обусловлена, прежде всего, большим количеством энергетически неравноценных межатомных связей, которые, в свою очередь, определяются сложным химическим составом промышленных сплавов. Атомные группировки с наиболее сильным взаимодействием частиц сохраняются в расплаве значительно дольше, чем группы атомов со слабым взаимодействием. Именно это определяет степень устойчивости структурной наследственности даже при высоких перегревах над принятыми технологическими температурами. Так как чугуны и стали являются системами, образованными различными по природе элементами (Fe – истинный металл; C – неметалл), то это предопределяет характер сильного

межчастичного взаимодействия в жидком состоянии и длительность сохранения унаследованной расплавом структурной информации.

В работе [74] изучали структуру доменных чугунов различных производителей, но с близким химическим составом. Основное различие в структурах заключалось в измельченности и равномерности распределения включений графита. При исследовании поверхностного натяжения расплавов в режимах нагрева и охлаждения было установлено, что расплавы из чугунов с крупными включениями графита имели более высокие температуры начала ветвления политерм (температур гистерезиса) и повышенные абсолютные значения вязкости в широком температурном интервале.

При производстве отливок из ЧШГ установлено, что применение в составе шихты добавок доменных чугунов, пакетированной листовой стали, различных видов возврата в различных соотношениях влияет на величину и характер распределения шаровидных включений графита, а следовательно и на механические свойства отливок, полученных из одной и той же марки ЧШГ[75-77]. На основании установленных закономерностей автор делает важный вывод о том, что явление структурной наследственности «зарождается в момент выбора исходных шихтовых материалов, формируется в процессе приготовления расплава, фиксируется в ходе кристаллизации и затвердевания и проявляется при оценке качества структуры и физико-механических свойств отливок». На основании исследований было установлено, что максимумы твердости и предела прочности на отливках получали при использовании в составе шихты 10-25% и 75-100% стальных отходов, соответственно.

Отдельные закономерности явления наследственности за счет корректировки шихтовых составов в сталях рассматривались в работах [78-81]. Установлено, что вовлечение в состав шихты определенного количества стружки, образующейся после механической обработки слитков или добавление предварительно продеформированных литых электродов позволило получать сортовой прокат из сталей ЭИ961 и 15Х11МФ с улучшен-

ными физико-механическими свойствами [78, 79]. Сокращение в составе шихты доли сильно загрязненного возврата собственного производства и замена его на высококачественный покупной лом позволило существенно сократить брак по трещинам при получении фасонных отливок из стали 35ГЛ при литье в песчано-глинистые формы [80].

Существенное влияние состава шихты на свойства стали 25Л выявлено в работе [81]. Установлено, что введение в состав шихты определенной доли проката (деформированная шихта) способствует снижению концентрации вредных примесей и улучшению хладостойкости стальных отливок.

Двойной переплав стали 45Л с последующей кристаллизацией с повышенными скоростями охлаждения способствовал повышению дисперсности литой структуры шихтовых заготовок и, как следствие, увеличению комплекса механических свойств в литом и термообработанном состояниях: пределов прочности и текучести, твердости HRC, ударной вязкости KCU и относительного удлинения [82].

Внепечное модифицирование стали 20ГФЛ добавками комплексных микрокристаллических модификаторов систем Ca-Ba-Si и Ca-Ba-Zr-Si способствовало повышению усвоения кальция и существенному росту ударной вязкости [83].

Существенным резервом улучшения структуры и повышения механических свойств сталей является модифицирование добавками быстрозакристаллизованных мелко- и микрокристаллических переплавов сталей аналогичного химического состава [84]. Согласно [67] использование мелко- и микрокристаллических переплавов классифицировано, как экономное модифицирование сплавов.

Известны технологии, основанные на применении физических способов обработки. Так, высокотемпературная обработка расплава позволила устранить карбидную неоднородность в структуре, анизотропию свойств по сечению литой заготовки и повысить технологические и эксплуатаци-

онные свойства литейной штамповой стали 4Х5В2ФСЛ [85]. Обработка расплавов системы Fe-C электрическим полем в процессе модифицирования способствует снижению расхода дорогостоящих модификаторов, повышению эффективности модифицирования, улучшению условий кристаллизации и росту механических свойств литых изделий [86].

Наряду с различными технологическими приемами большое влияние на повышение качества отливок в настоящее время оказывает предварительное моделирование литейных процессов.

Известно, что использование современных систем автоматизированного моделирования литейных процессов (CAM ЛП) при внедрении в производство новых и повышении эффективности литья серийных отливок позволяет снизить трудозатраты на проектирование и натурные испытания. Сегодня в мире насчитывается большое количество программ для моделирования литейных процессов. Известны такие программы, как Magmasoft (Германия), ProCast (Франция), SolidCast, Flow-3D (США), а также две отечественные разработки – «Полигон» и LVMFlow. Использование CAM ЛП на стадии проектирования конструкции моделей отливок и элементов литниково-питающих систем позволяет существенно сократить трудозатраты на корректировку литейных форм, сократить время внедрения литейной оснастки в производство, а также снизить металлоемкость литейной формы и сократить брак отливок по литейным дефектам [87, 88].

1.5 Цели и задачи исследования

Литье по выплавляемым моделям позволяет получать фасонные отливки ответственного назначения сложной конфигурации. Литые изделия, получаемые ЛВМ, характеризуются коэффициентом использования металла на уровне 98% и 5 классом точности по ГОСТ 26645-85. Однако, внедрение в процесс ЛВМ перспективных огнеупорных материалов сдерживается необходимостью применения дорогостоящего и энергоемкого оборудования на стадии выплавления модельных составов из огнеупорных керамических форм. Отсутствуют систематизированные данные по технологическим свойствам модельных составов и по процессам, протекающим в системе «модельный состав-огнеупорная керамическая форма». Недостаточно комплексных исследований, охватывающих все основные технологические этапы процесса литья по выплавляемым моделям, включающих изготовление моделей и огнеупорных керамических форм, выплавление модельных составов, подготовку огнеупорных керамических форм к заливке и подготовку расплавов к литью.

На основании проведенного литературного обзора поставлена следующая основная цель: исследование, разработка и внедрение технологического процесса изготовления огнеупорных керамических форм с использованием плавленого кварца взамен кристаллического кварца с целью повышения эффективности производства стальных отливок ответственного назначения литьем по выплавляемым моделям.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Выполнить сравнительные исследования линейной усадки модельных составов различных марок.
2. Исследовать закономерности взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма».

3. Разработать технологические параметры выплавления восковых моделей из огнеупорной керамической формы на основе плавленого кварца.

4. Разработать технологический процесс изготовления отливок ответственного назначения, получаемых литьем по выплавляемым моделям в огнеупорные керамические формы из плавленого кварца.

5. Оценить эффективность замены кристаллического кварца на плавленый кварц в технологии изготовления огнеупорных керамических форм и обосновать целесообразность его применения при получении стальных отливок ответственного назначения.

6. Провести опытно-промышленные испытания, и доказать эффективность разработанных технологических параметров.

7. Внедрить разработанные технологические параметры в производство стальных отливок ответственного назначения литьем по выплавляемым моделям.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Общая методика исследования. Объекты исследования

Решение поставленных задач и достижение цели работы обеспечивалось выполнением исследовательских этапов согласно разработанной схеме исследований (рис. 2.1).

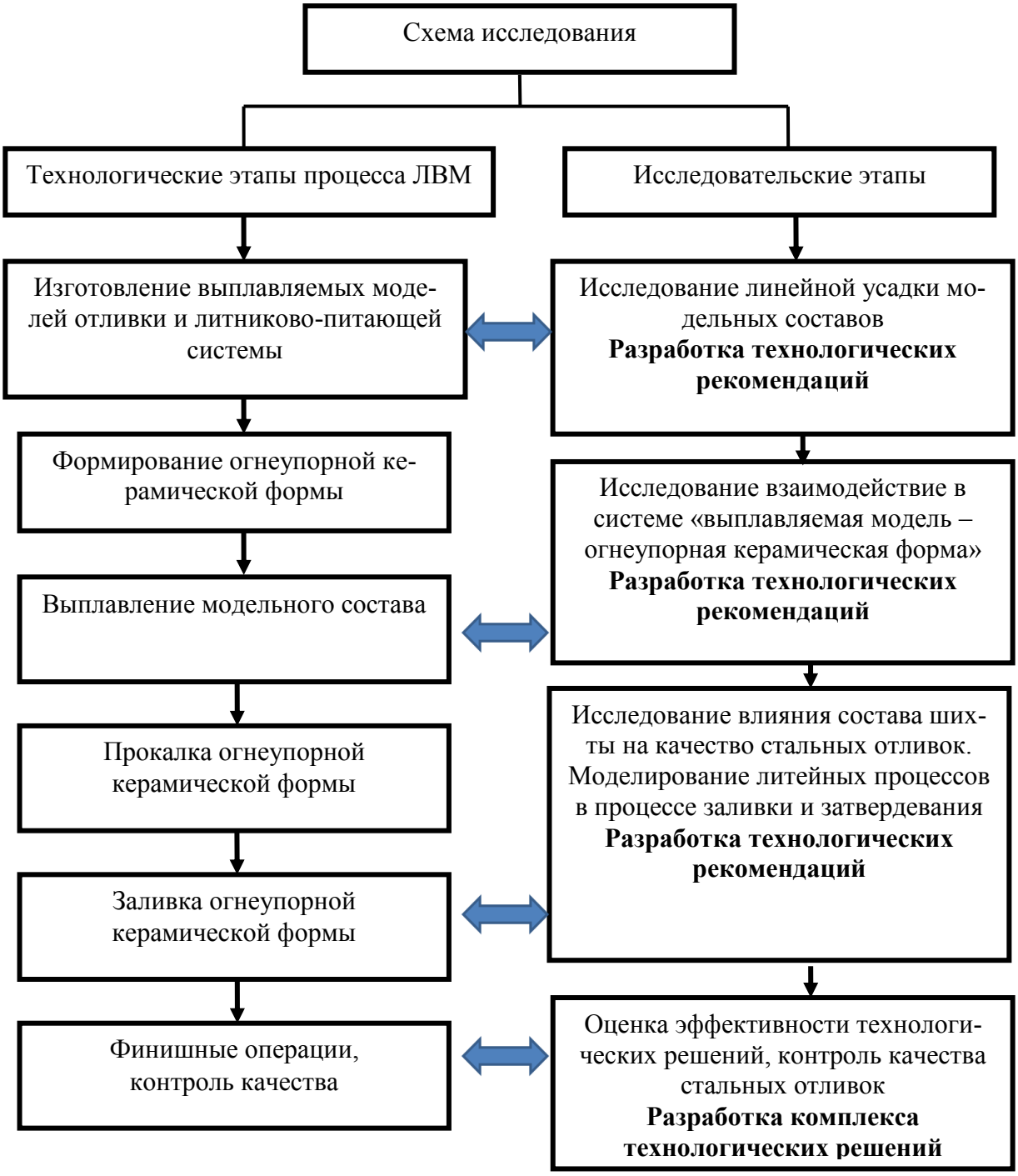


Рисунок 2.1 - Схема общей методики исследования

Выполнение исследовательских этапов во взаимосвязи с технологическим процессом литья по выплавляемым моделям способствовало разработке технологических рекомендаций и их опытно-промышленной апробации на каждом технологическом этапе.

Объектами исследования являлись модельные составы различных видов и производителей (рис. 2.2).

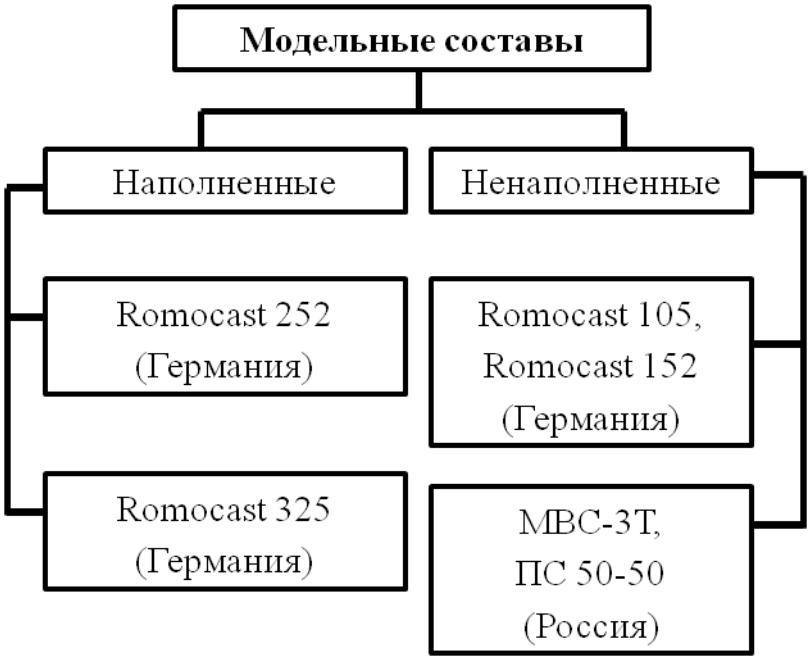


Рисунок 2.2 - Исследуемые модельные составы

В табл. 2.1. Представлены основные свойства исследуемых модельных составов.

Из табл. 2.1 видно, что модельные составы существенно различаются по температурам каплепадения и вязкости. Ненаполненные модельные составы российского производства характеризуются малым процентом остатка после прокаливания. Для модельных составов зарубежного производства отсутствуют данные по свободной линейной усадке.

Таблица 2.1 – Свойства исследуемых модельных составов

Группа	Марка	Содержание наполнителя, %	Вид наполнителя	Свободная линейная усадка при запрессовке, %	Температура каплепадения, ºС	Остаток после прокаливания, max %	Вязкость при 100º С, mPa.s
Ненаполненный воск	Romocast 105	-	-	Не указано	78 – 82	0,05	50 – 100
	Romocast 155	-	-	Не указано	67 – 71	0,05	120 – 180
	ПС 50-50	-	-	0,8-1,0	48-53	0,02	438
	МВС-3Т	-	-	1,1-1,5	76,9	0,02	784
Наполненный воск	Romocast 252	35	XLPS *	Не указано	67 – 72	0,05	300 – 600
	Romocast 325	30		Не указано	73 – 82		200 – 500

XLPS* - свысокомолекулярный полиэтилен

В табл. 2.2 приведены основные материалы, используемые для изготовления огнеупорных керамических форм (ОКФ).

Таблица 2.2 – Основные материалы для изготовления ОКФ

Наименование материала	ГОСТ, ТУ	Характеристика материала
Плавленый кварц «Кефрон»	ТУ 5931-002-71435339-2004	фракция: менее 0,063мм; 0,125-0,315мм; 0,315-0,43 мм.
Песок кварцевый 5К3О302	ГОСТ 2138-91	фракция: 0,125-0,315мм; 0,315-0,43 мм.
Связующее «Сиалит-20С»	ТУ 2145-003-438/1938-97	Плотность 1,133-1,138 г/см^3

Опытные отливки «Вал» и «Корпус» получали из сталей марок 40ХЛ и 35ХГСЛ, соответственно. Химические составы и механические свойства сталей согласно требованиям нормативной документации представлены в табл. 2.3-2.6.

Таблица 2.3 – Химический состав стали 40ХЛ (ГОСТ 977-88)

C	Si	Mn	Cr	S	P
0,35-0,45	0,20-0,40	0,40-0,90	0,80-1,10	<0,04	<0,04

Таблица 2.4 – Механические свойства стали 40ХЛ* (ГОСТ 977-88)

Механические свойств стали 40ХЛ, не менее				
$\sigma_{B,}$ (МПа)	$\sigma_{02,}$ (МПа)	δ ,%	Ψ,%	KCU, (кДж/м²)
638	491	12	25	392

*В термообработанном состоянии по режиму: нормализация 850÷860 ^{0}C, отпуск 600÷650 ^{0}C

Таблица 2.5 – Химический состав стали 35ХГСЛ (ОСТ 1 90093-82)

Массовая доля элементов, %						
C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P
0,32-0,40	0,60-0,90	0,90-1,20	0,70-1,0	0,10-0,20	<0,025	<0,025

Таблица 2.6 – Механические свойства стали 35ХГСЛ* (ОСТ 1 90093-82)

Механические свойства стали 35ХГСЛ, не менее				
$\sigma_{B,}$ (МПа)	$\sigma_{02,}$ (МПа)	δ ,%	Ψ,%	KCU, (кДж/м²)
980	835	9	25	290

2.2 Основное оборудование и методы исследования свойств материалов

Огнеупорные керамические формы в Центре литейных технологий СамГТУ готовили по единой методике, включающей следующие основные этапы:

- приготовление огнеупорной суспензии для облицовки модельного блока (связующее «Сиалит 20С», огнеупорный наполнитель - плавленый кварц «Кефрон»);

- облицовка модельного блока в пескосыпе псевдокипящего слоя (рис. 2.3);

- выплавление модельного состава в паровом котле (рис. 2.4);

- прокалка огнеупорных керамических форм в прокалочной печи (рис. 2.5).

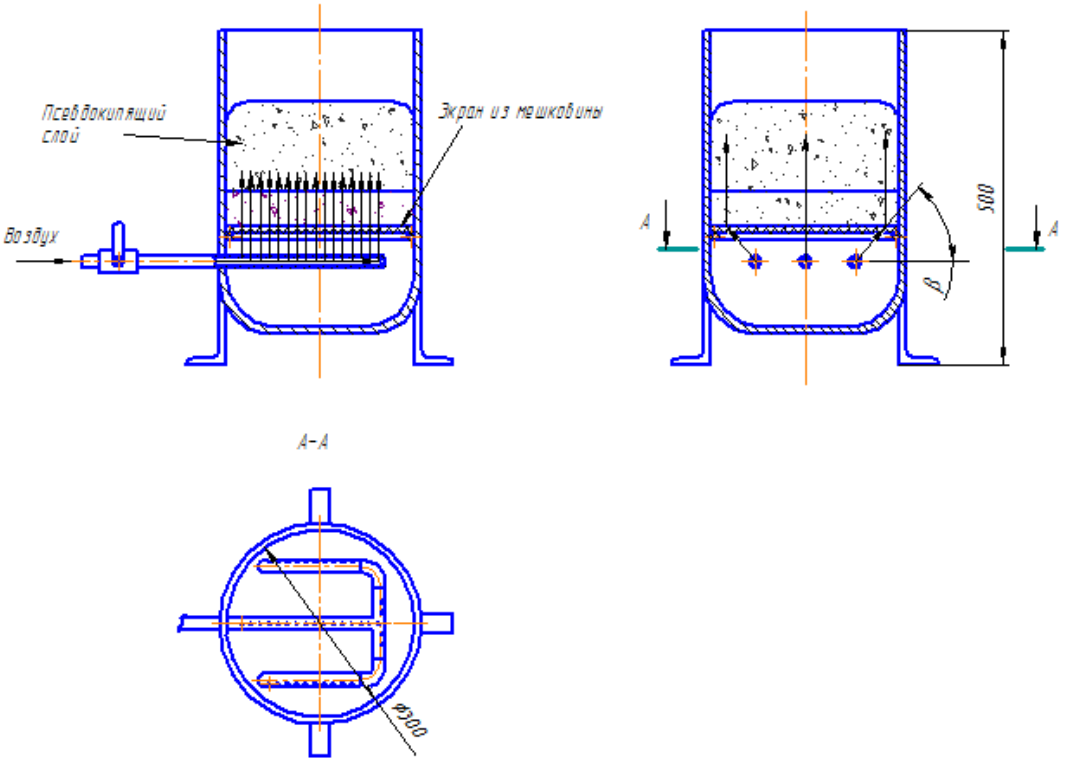


Рисунок 2.3 – Пескосып псевдокипящего слоя для облицовки модельных блоков

Рисунок 2.4 – Паровой котел для выплавления модельного состава модели КПЭМ 100/9

Рисунок 2.5 – Прокалочная печь модели ПС 51.41.52

Приготовление стали в Центре литейных технологий производили в печи плавильной индукционной марки ППИ-0,33 производства компании

«РЭЛТЕК» (г. Екатеринбург) с набивной периклазово-шпинельной футеровкой (рис. 2.6).

Рисунок 2.6 - Печь плавильная индукционная марки ППИ-0,33

Определение линейной усадки модельных составов. Определение свободной усадки при затвердевании ($\alpha_м$,%) и склонности к изменению линейных размеров модельных составов в зависимости от температуры окружающей среды (ΔL,%) производили по следующей методике. Навеску модельного состава массой 400 г расплавляли в электрошкафу при температуре 80^0С. Жидкий модельный состав запрессовывали с помощью ручного шприца при температуре 75^0С в специальную пресс-форму конструк-

ции ВНИИТМАШ (рис. 2.7). Размеры рабочей полости формы: 10×10×150 мм. После затвердевания модельного состава пресс-форму разбирали, извлекали образец. Измерение длины образцов производили с помощью электронного штангенциркуля Qstexpress (точность измерения 0,01 мм) через 24 ч после затвердевания. Из каждой марки модельного состава получали по 5 образцов. Образцы подвергали температурной обработке, обеспечивая температуру окружающей среды: (-5); (+5); (+20); (+30); (+35)^{0}С. Охлаждение образцов от комнатной температуры (+20)^{0}С до (-5)^{0}С производили в морозильной камере, контролируя температуру с помощью спиртового термометра. Охлаждение образцов до температуры +5^{0}С производили в холодной воде. Нагрев образцов до температур выше +20^{0}С производили в сушильном шкафу, задавая требуемый температурный режим с помощью ПИД-регулятора.

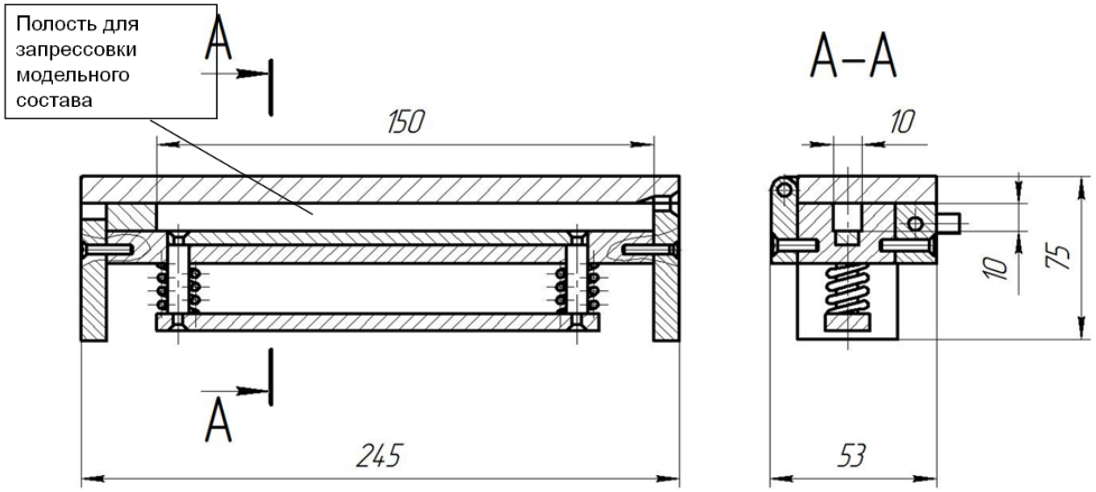


Рисунок 2.7 - Пресс-форма для получения образцов для определения свободной линейной усадки конструкции ВНИИТМАШ

Свободную линейную усадку (%) образцов вычисляли по формуле:

$$\alpha_м = [(L_п – L_{об}) / L_п] \times 100, \quad (2.1)$$

где: $L_п$ - длина полости формы (150 мм), $L_{об}$ – длина образца, мм.

Однако, формула (2.1) не позволяет оценить характер (уменьшение или увеличение) и величину изменения размера образцов при изменении температуры окружающей среды.

Для определения изменения длины ΔL образцов (%) в зависимости от температуры окружающей среды предложено выражение:

$$\Delta L = [(L_2 - L_1) / L_1] \times 100, \qquad (2.2)$$

где: L_1 - длина образца при комнатной температуре $(+20)^0$C, мм; L_2 – длина образца при заданной температуре окружающей среды, мм.

Приготовление суспензии для формирования ОКФ по восковой модели осуществляли в специальной емкости, в которую заливали требуемое количество связующего «Сиалит-20С». При постоянном перемешивании вводили огнеупорный наполнитель (кристаллический или плавленый кварц). После получения готовую суспензию выдерживали в течение часа. Вязкость контролировали вискозиметром ВЗ-4 (ГОСТ 9070-75, погрешность – не более 3%). Перед нанесением на восковую модель суспензии, ее перемешивали в течение 3-5 мин. Нанесение огнеупорной суспензии производили окунанием образцов. После стекания излишков суспензии с образцов вручную производили обсыпку зернистым огнеупорным материалом (кристаллическим или плавленым кварцем). После нанесения первого слоя осуществляли его сушку на воздухе в течение 24 ч при температуре окружающей среды. Далее операции повторяли, формируя требуемое количество слоев. Второй и последующие слои сушились в течение двух часов. После формирования огнеупорной керамической формы производили выплавление модельного состава в горячей воде. Далее осуществляли прокалку керамических образцов в печи при температуре 900 $\pm 5^0$C в течение часа. Определение предела прочности готовой огнеупорной керамической формы на разрыв производили на приборе модели 083 с приспособлением – захватом (рис. 2.8).

Рис. 2.8 - Прибор модели 083 для определения прочности
огнеупорных керамических форм на разрыв

Определение предела прочности керамических образцов на изгиб. Для определения предела прочности огнеупорных керамических оболочек на изгиб изготавливали модели с помощью запрессовки модельного состава ПС 50-50 в пресс-форму (рис.2.9).

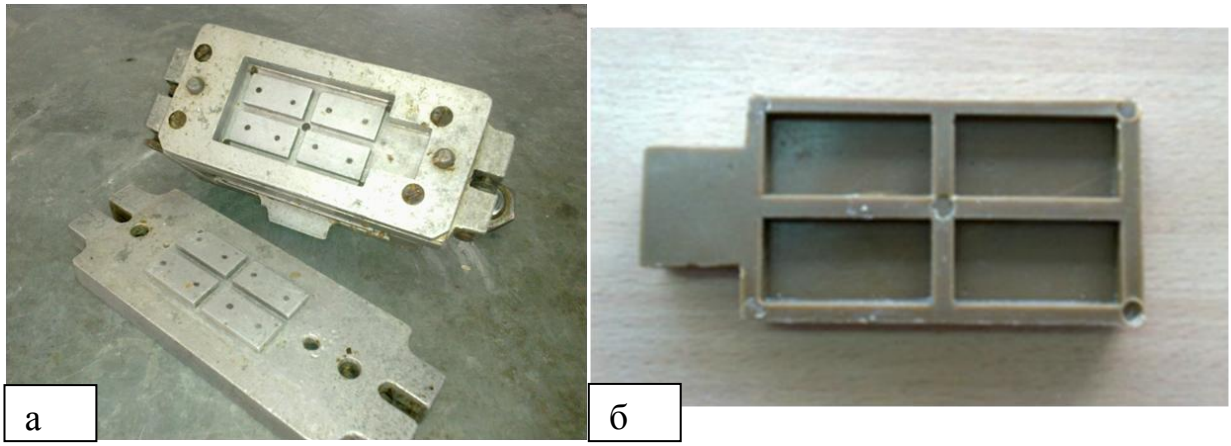


Рисунок 2.9 - Пресс-форма (а) и восковая модель (б) образца
для испытаний керамических форм на изгиб

Огнеупорные керамические формы получали по описанной выше методике. Испытание готовых ОКФ на изгиб проводили по трехточечной схеме нагружения образцов. Для испытаний использовали прибор модели 051. Предел прочности на изгиб высчитывали по формуле:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{3\text{p}l}{2bh^2} \qquad (2.3)$$

где $\sigma_{\text{изг}}$ – прочность, кгс/см^2; p – нагрузка, при которой разрушился образец, кг; l – расстояние между опорами, см; b и h – ширина и высота образца в месте его разрушения при испытаниях соответственно, см.

Определение газопроницаемости огнеупорных керамических форм. Величину газопроницаемости ОКФ определяли при комнатной температуре на образцах, имеющих диаметр 50 мм и толщину 3÷5 мм. Образцы ОКФ испытывали в предварительно прокаленном состоянии. На первом этапе получали образцы путем запрессовки модельного состава ПС 50-50 в пресс-форму (рис.2.10).

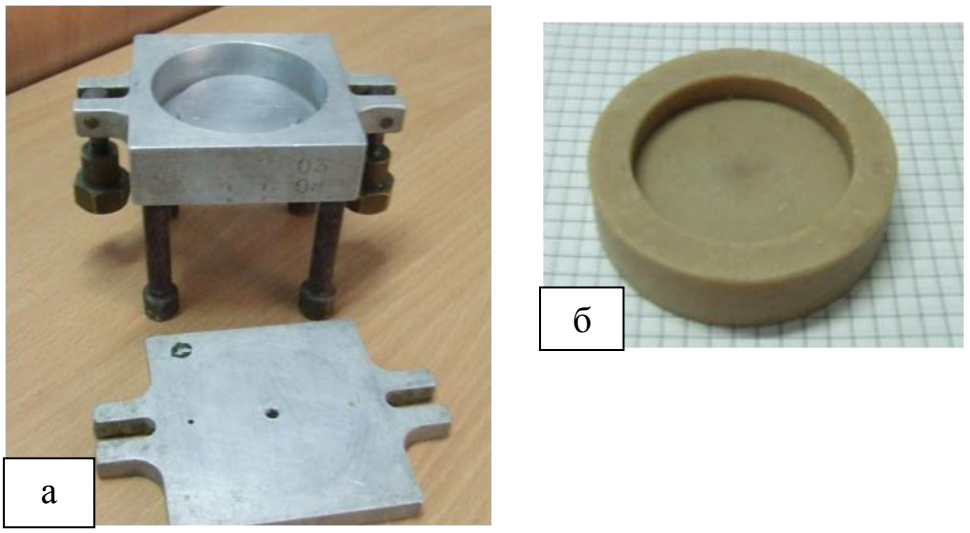


Рисунок 2.10 - Пресс-форма (а) и восковая модель (б) для определения газопроницаемости керамических образцов

Огнеупорные керамические формы получали по описанной выше методике. Газопроницаемость ОКФ исследовали на приборе модели 04315 (рис. 2.11), укомплектованном патроном Фишера модели 01511М.

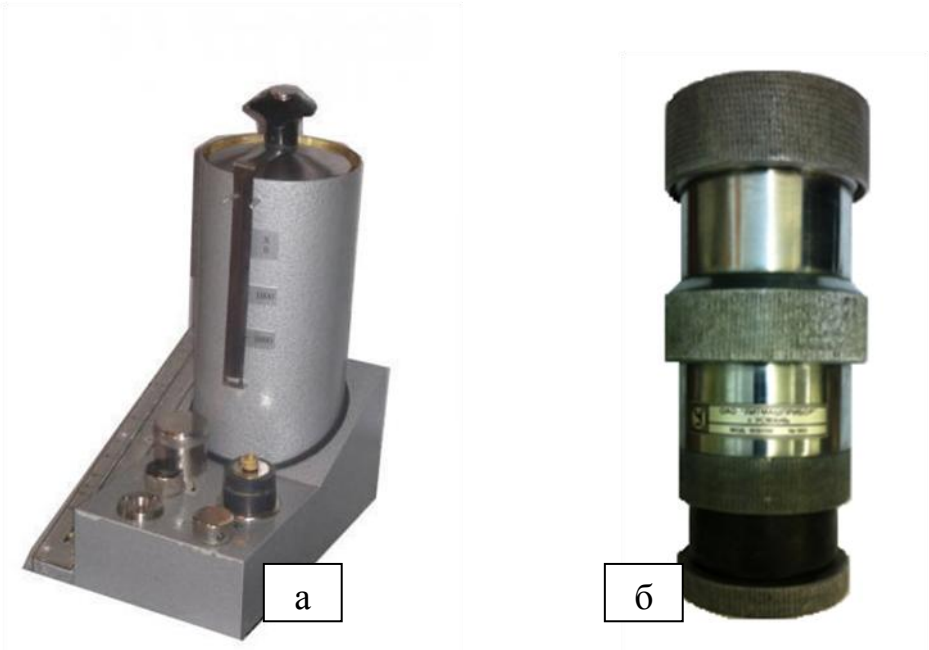


Рисунок 2.11 - Прибор для определения газопроницаемости ОКФ модели 04315 (а), патрон Фишера модели 01511М (б)

Методика исследования коэффициента линейного расширения (КТЛР) огнеупорных керамических форм. КТЛР определяли на экспериментальной установке ЭУ-1КТЛР (рис. 2.12). Образец прямоугольного сечения устанавливали между кварцевыми трубками. Включали нагревательное устройство. Показания с устройства измерения часового типа фиксировали через каждые 2 мин. Показания температуры фиксировали с мультиметра, непосредственно подсоединенного к термопаре. Термопара соприкасалась непосредственно с исследуемым образцом.

Коэффициент теплового линейного расширения образцов из огнеупорных керамических форм рассчитывали по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{l} \cdot \left(\frac{\Delta l}{\Delta T} \right) \qquad (2.4)$$

где l – длина образца, Δl - удлинение образца, $\Delta T = T_1 - T_2$, T_1 - текущая температура образца, T_2 - начальная температура образца.

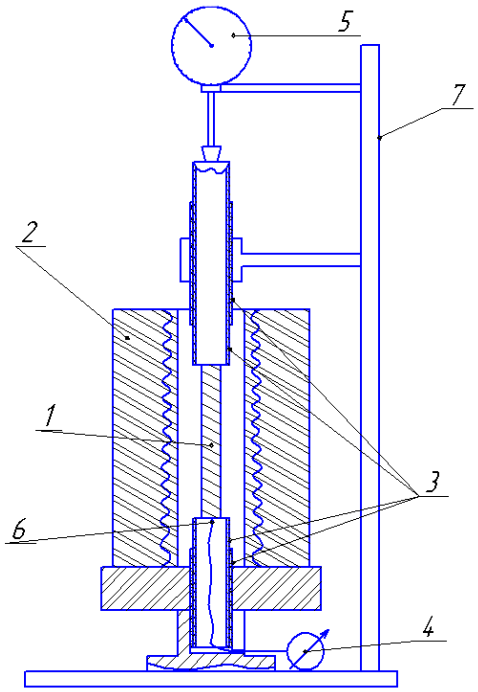


Рисунок 2.12 - Экспериментальная установка ЭУ-1КТЛР для измерения коэффициента теплового линейного расширения: 1- образец ОКФ; 2-электрический нагреватель; 3- кварцевые трубки; 4- мультиметр; 5-устройство измерения перемещения часового типа; 6- термопара; 7- штатив

Механические свойства сталей осуществляли на разрывной машине английской фирмы Testometric модели FS 150 kN AX в центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ) ОАО «КУЗНЕЦОВ» (г. Самара). Для испытания на механические свойства изготавливали «гагаринские» образцы согласно ГОСТ 1497-84 тип 3 номер 8 и тип 5 номер 5.

Моделирование процессов заполнения форм и затвердевания расплавов производили с использованием лицензионного пакета системы автоматизированного моделирования литейных процессов LVMFlow (версия 4.6r2) в конструкторском бюро Управления главного металлурга ОАО «Кузнецов».

Статистическая обработка результатов исследований осуществлялась с использованием методов статистического анализа в программе Microsoft Excel 2010 и «STATGRAPHICS».

3.ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ «ВЫПЛАВЛЯЕМАЯ МОДЕЛЬ – ОГНЕУПОРНАЯ КЕРАМИЧЕСКАЯ ФОРМА»

3.1. Исследование свободной линейной усадки модельных составов различных видов

В настоящее время на отечественном рынке появляются различные марки модельных составов для литья по выплавляемым моделям. Многочисленные марки модельных составов характеризуются разнообразными технологическими свойствами. Выбор того или иного вида модельного состава, как правило, обусловлен конструктивными особенностями и требованиями, предъявляемыми к геометрической точности будущей отливки, а также технологией изготовления восковых моделей.

К наиболее важным технологическим свойствам большинства модельных составов можно отнести следующие: точное воспроизведение конфигурации рабочей полости пресс-формы; необходимые твердость и прочность после затвердевания в пресс-форме; стабильность размеров при изменении температуры окружающей среды; минимальную и стабильную усадку при затвердевании; невысокую температуру плавления и хорошую жидкотекучесть и т.д. [1, 3, 4]. Производители модельных составов в сопроводительной документации указывают температуру каплепадения, предел прочности при статическом изгибе и плотность при комнатной температуре, свободную линейную усадку, зольность. Кроме указанных свойств необходимо также знать склонность модельного состава к изменению линейных размеров при постоянной температуре, а также в зависимости от ее изменения. Как правило, данное свойство не указывается в сопроводительной документации и не учитывается при изготовлении и хранении готовых моделей.

В Центре литейных технологий СамГТУ исследовали свободную линейную усадку исследуемых модельных составов при постоянной температуре (+20±2) ^{0}С [89]. Замеры длин образцов производили через 1 и 24 часа после их затвердевания и извлечения из пресс-формы.

Наибольшей свободной линейной усадкой обладал модельный состав марки МВС 3-Т (рис. 3.1). Минимальную линейную усадку имеют модельные составы марок Romocast 252 и 325, относящиеся к наполненным модельным составам.

Следует отметить, что усадочные процессы протекают в образцах в течение достаточно длительного времени (до 24 ч). Это, вероятно, связано со следующими основными факторами: длительностью процессов полимеризации и низкой теплопроводностью модельных составов.

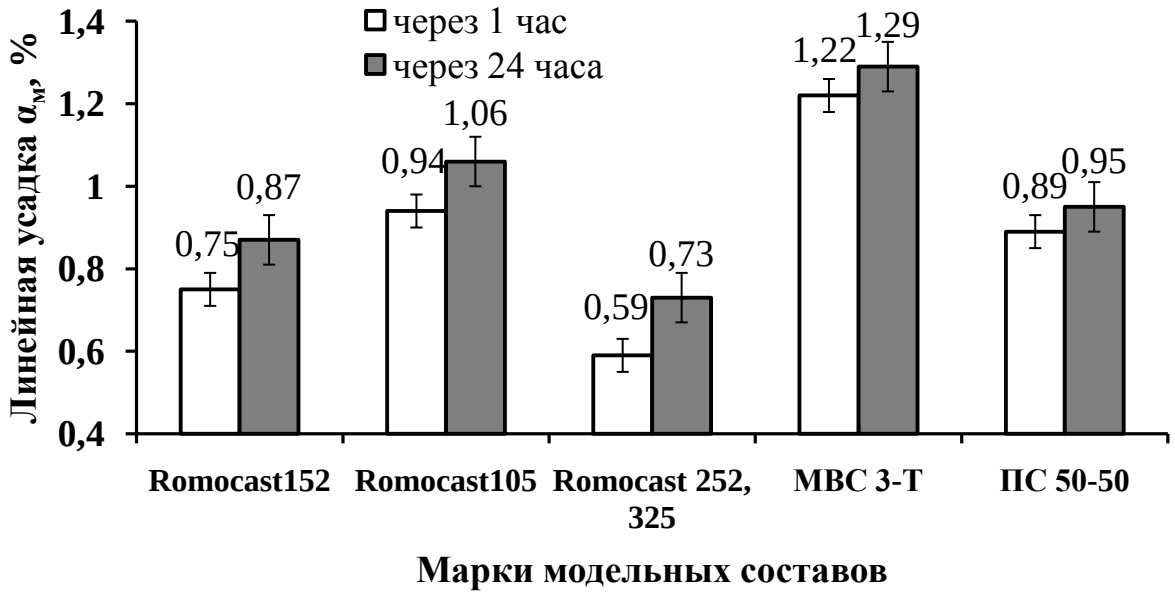


Рисунок 3.1 - Влияние времени выдержки модельных составов после затвердевания на свободную линейную усадку образцов

Технологическая усадка модельных составов, определяющая геометрическую точность литого изделия, зависит от ряда физических свойств модельных составов и размеров испытуемого образца [4]:

$$\alpha_{\text{МС}} = 100 \times \left[\alpha_{\text{С}} - \frac{\sigma_{\text{ТР}}}{\text{Е}_{\text{МС}}} \times (4l/b)^m\right], \qquad 3.1$$

где α_C – свободная линейная усадка, %; σ_{TP} – касательные напряжения, возникающие в восковой модели при ее усадке, Па; E_{MC} - модуль упругости модельного состава при растяжении; l – длина восковой модели, см; b – длина стороны поперечного сечения восковой модели; m – показатель степени, учитывающий влияние давления запрессовки (Р) модельного состава в пресс-форму на величину усадка восковой модели.

Анализ выражения (3.1) показывает, что при прочих равных условиях наиболее существенное влияние на технологическую усадку оказывает свободная линейная усадка модельного состава определенной марки. На основании выполненных исследований (рис. 3.1) можно сделать вывод, что наибольшей технологической усадкой будут характеризоваться восковые модели, изготовленные из ненаполненных модельных составов марок Romocast105 и МВС 3-Т.

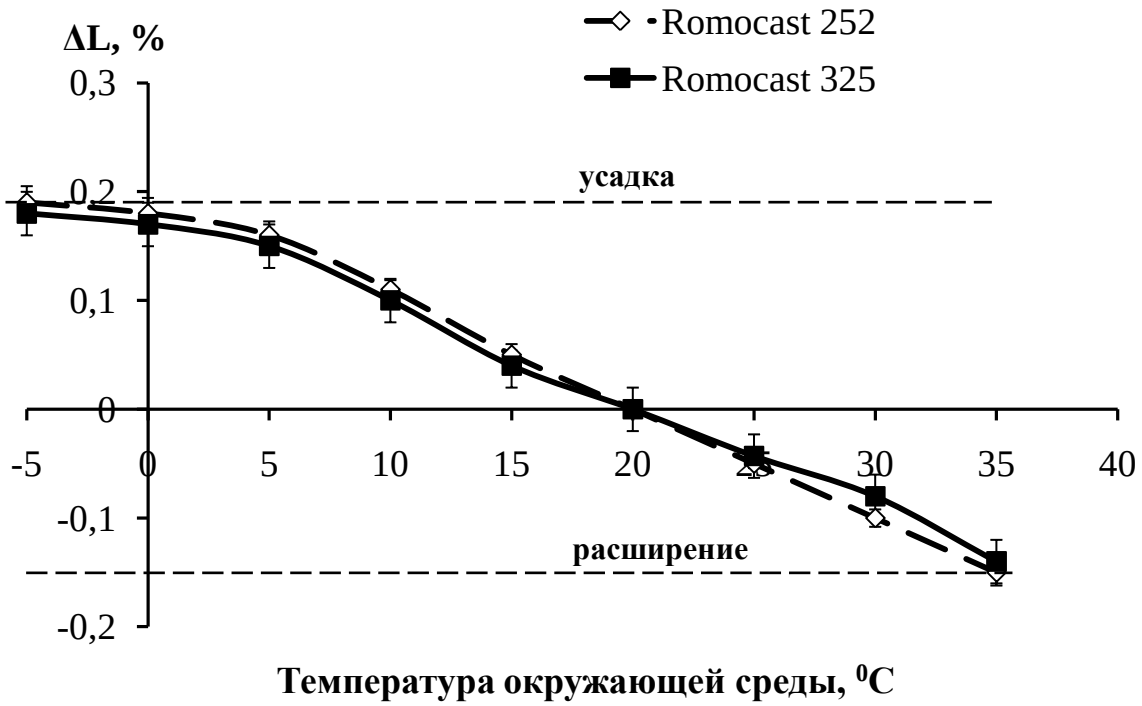
Иследовали влияние температуры окружающей среды на свободную линейную усадку модельных составов (рис. 3.2). Положительные значения ΔL означают усадку образцов при их охлаждении ниже (+20) ^{0}С, отрицательные значения ΔL характеризуют тепловое расширение образцов при их нагреве выше (+20) ^{0}С относительно исходного размера образцов.

Результаты исследований показали, что все исследованные модельные составы реагируют на изменение температуры окружающей среды: при охлаждении ниже (+20) ^{0}С происходит уменьшение их линейных размеров из-за усадки, а при повышении температуры – увеличение линейных размеров из-за теплового расширения. Однако, наибольшими изменениями длины в зависимости от температуры окружающей среды характеризуются образцы, полученные из ненаполненных модельных составов марок Romocast 105, 152, ПС 50-50 и МВС 3-Т. Так, в диапазоне температур (-5)÷(+5) ^{0}С уменьшение длины образцов ΔL из модельного состава марки ПС 50-50

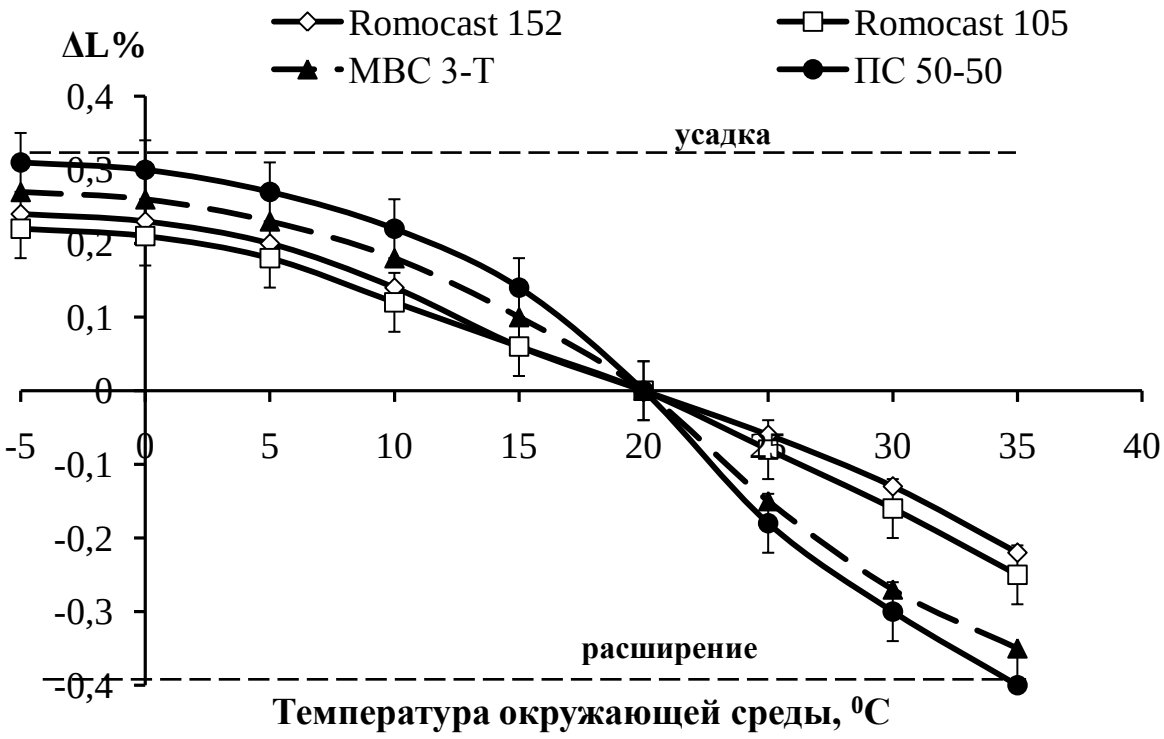
составило (-0,31)÷(-0,27)%. Это означает, например, что длина образца уменьшилась со 148,3 мм при (+20) ^{0}C до 147,8 мм при (-5) ^{0}C. Длина образцов из этого же состава при температуре (+35) ^{0}C увеличилась на 0,4%. Следовательно, длина данных образцов при нагревании до указанной температуры составила 148,9 мм. В этих же диапазонах изменялись длины образцов из модельного состава марки МВС 3-Т. При этом, указанные модельные составы обладают максимальной свободной линейной усадкой в процессе затвердевания.

Интервал изменения длины ΔL образцов для наполненных модельных составов Romocast 252 и 325 в исследованном диапазоне температур составил (-0,19)÷(+0,15)%.

С технологической точки зрения важным параметром является сохранение стабильности линейных размеров образцов в зависимости от температуры окружающей среды. Для выявления данной особенности образцы охлаждали до (-5) ^{0}C и нагревали до (+35) ^{0}C относительно температуры (+20) ^{0}C, выдерживая при указанных температурах в течение 24 ч. Далее образцы снова приводили к исходной температуре (+20) ^{0}C, выдерживали в течение 24 ч и производили замеры их длин. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.3. Анализ результатов показывает, что после оказанных на образцы температурных воздействий не происходит стабилизация их линейных размеров и, как следствие, возврат к исходным размерам, установленным при температуре (+20) ^{0}C.



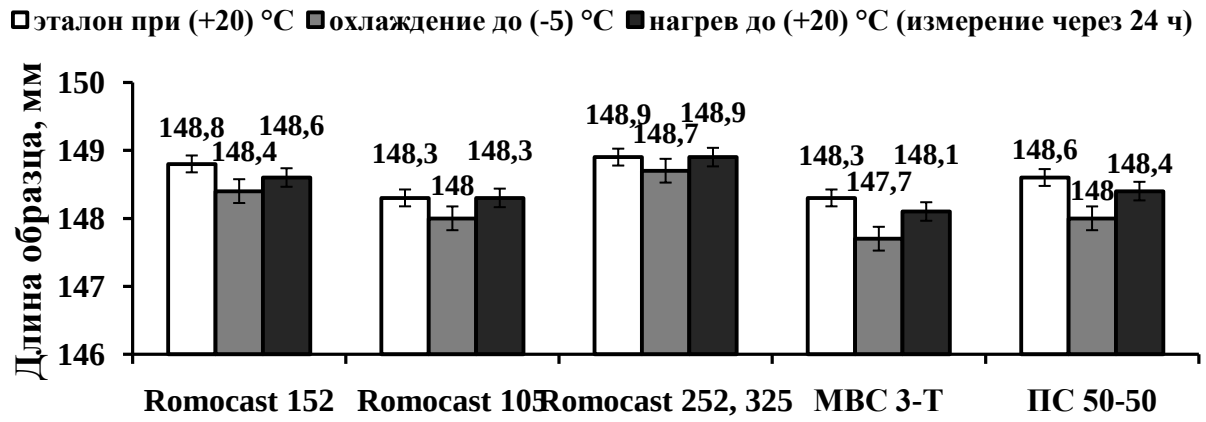
а



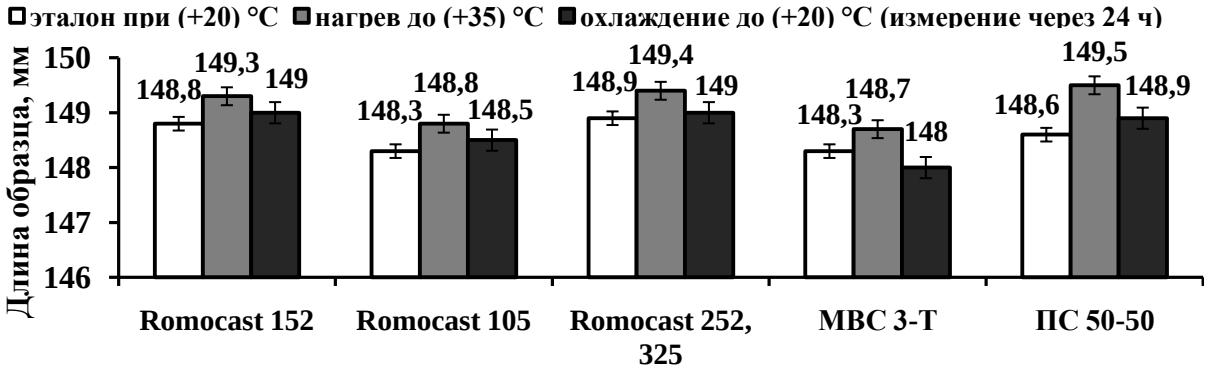
б

а, б – наполненные и ненаполненные модельные составы, соответственно

Рисунок 3.2 – Влияние температуры окружающей среды на свободную линейную усадку образцов из различных модельных составов



а



б

а – после охлаждения до (-5) ^{0}С; б – после нагрева до (+35) ^{0}С

Рисунок 3.3 - Исследование стабильности линейных размеров моделей в зависимости от температуры окружающей среды

Наибольшими отклонениями размеров от исходного состояния характеризовались образцы из ненаполненных модельных составов.

Таким образом, температура окружающей среды оказывает ощутимое влияние на изменение геометрических размеров образцов из модельных составов различных видов, что необходимо учитывать при проектировании пресс-форм для получения моделей отливок, а также хранении готовых модельных блоков.

Исследованные особенности в поведении модельных составов в процессе затвердевания, а также при изменении температуры окружающей среды будут оказывать существенное влияние на обеспечение требуемой геометрической точности готовых отливок. Наибольшим изменением ли-

нейных размеров характеризуются образцы, изготовленные из ненаполненных модельных составов марок Romocast 152 и 105 (Германия), а также МВС 3-Т и ПС 50-50 (Россия).

Полученные результаты по свободной линейной усадке для российских марок модельных составов совпадают со значениями, приведенными в работах [3, 4]. Для зарубежных составов результаты по измерению свободной линейной усадки получены впервые.

3.2 Влияние вида огнеупорного материала на свойства огнеупорных керамических форм

Основой формы при ЛВМ является многослойная огнеупорная керамическая форма, изготовленная по разовым выплавляемым моделям. После выплавления модельного состава огнеупорная керамическая форма (ОКФ), как правило, перед заливкой подвергается прокаливанию при высоких температурах (до 900ºС и выше).

ОКФ, при ее прокалке и заливке расплавом, как правило, формуется в опорный наполнитель. Данная операция производится с целью защиты керамической формы от резких изменений температуры при прокаливании и последующей заливке расплавленным металлом, для предотвращения ее от механического разрушения при заливке, для длительного обеспечения в полости формы высокой температуры после заливки.

На основании выполненного литературного обзора было установлено, что огнеупорные материалы, применяемые для изготовления ОКФ, характеризуются существенным отличием по таким физическим свойствам, как температура плавления, плотность, коэффициент теплового линейного расширения. Указанные свойства во многом определяют и свойства готовой ОКФ при постоянстве других технологических параметров: вид свя-

зующего, фракционный состав огнеупорного наполнителя, количество слоев, режимы сушки.

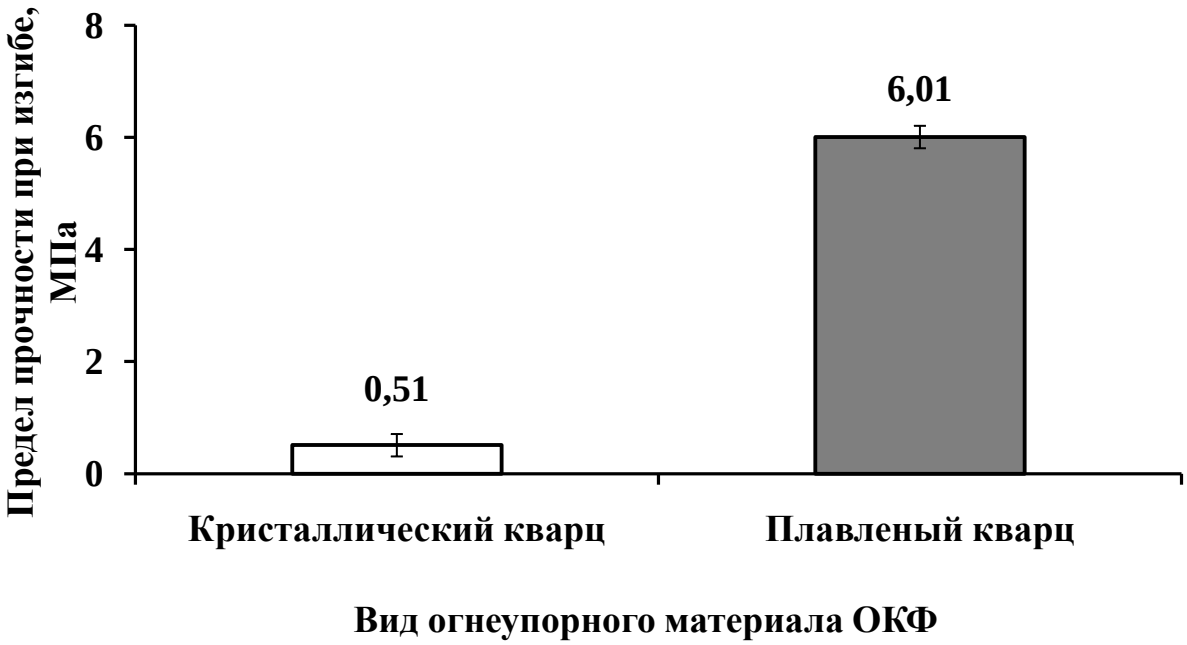
Известно, что в ОКФ при изменении линейных размеров восковых моделей, а также при выплавлении восковых моделей могут возникать напряжения растяжения, сжатия, изгиба и среза. На практике измерение прочности при растяжении хрупких керамических материалов производится редко. Как правило, определяют прочность ОКФ на изгиб.

Другим важным технологическим свойством ОКФ, определяющим качество отливок, является их газопроницаемость.

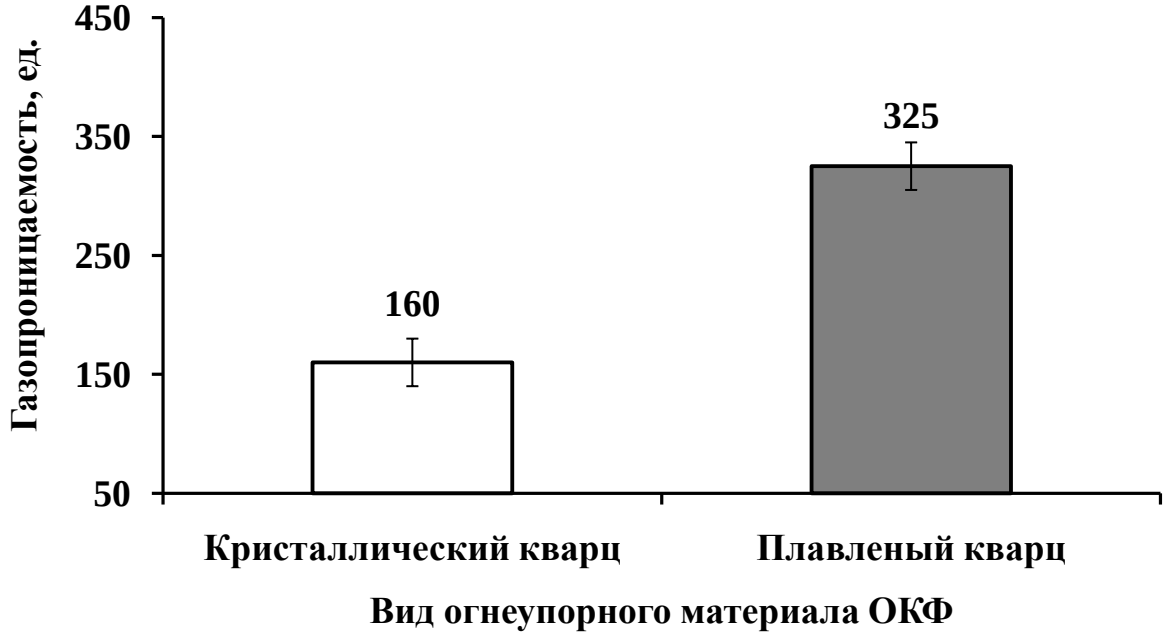
Исследовали влияние вида огнеупорного материала на прочность при изгибе и газопроницаемость ОКФ [90, 91]. Для изготовления образцов ОКФ спользовали водное связующее «Сиалит 20С». Для сравнения, в качестве огнеупорных наполнителей, использовали кристаллический и плавленый кварц.

Для изготовления образцов на соответствующую восковую модель наносили 5 слоев покрытия, 6-ой слой формировался без обсыпки и являлся закрепляющим слоем. Размер фракции огнеупорного материала: в первом слое – 0,2 мм; во втором и последующих – 0,4 мм. Размер образцов составлял 40×20×3÷5 мм. Сушка первого (формирующего) слоя длилась 4 ч, последующие слои формировались с интервалом в 2 ч. Прокалка образцов проводилась при температуре 900 °С в течение часа.

На рис. 3.4 представлены результаты по исследованию влияния вида огнеупорного материала на прочность и газопроницаемость ОКФ.



а



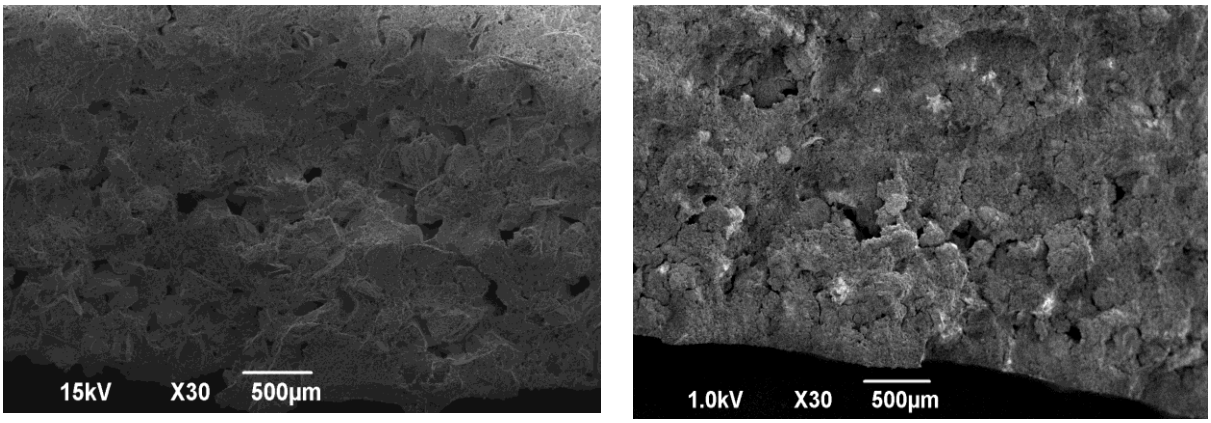
б

а, б – предел прочности на изгиб и газопроницаемость

Рисунок 3.4 – Влияние вида огнеупорных материалов на свойства ОКФ

Видно, что прочность огнеупорной керамической оболочки, изготовленной с применением плавленого кварца, на порядок выше ОКФ на осно-

ве кристаллического кварца (рис. 3.4, б). При этом газопроницаемость ОКФ на основе плавленого кварца практически в 2 раза выше ОКФ из кристаллического кварца. В литературных источниках крайне мало информации о влиянии вида огнеупорного материала на газопроницаемость ОКФ. Так, согласно [92] газопроницаемость форм из плавленого кварца в 4 раза меньше, чем из кварцевого песка. Однако, значения газопроницаемости зависит не только от материала керамической формы, вида связующего, но и от методики исследования. Анализ фрактографического излома показал, что ОКФ на основе плавленого кварца имеет более пористую структуру с развитыми сообщающимися каналами по сравнению с формой на основе кристаллического кварца (рис. 3.5).



а б

а – на основе плавленого кварца; б – на основе кристаллического кварца

Рисунок 3.5 – Фрактограммы изломов огнеупорных керамических форм

В литературных источниках имеется достаточно данных о коэффициентах теплового линейного расширения различных огнеупорных материалов (электрокорунд, плавленый кварц, кварцевый песок и т.д.) [25, 26]. Однако, сведения о КТЛР готовых огнеупорных керамических форм встречаются крайне редко. При этом, КТЛР формы оказывает существенное влияние на процессы выплавления модельных составов из ОКФ, на режимы их прокалки и заливки. Кроме того, по значениям КТЛР формы

можно судить о ее способности с высокой точностью воспроизводить геометрические размеры будущих отливок.

Исследовали влияние вида огнеупорного материала на КТЛР форм в интервале температур 100÷350 ^{0}C. В качестве связующего применяли водное связующее «Сиалит 20С». Наполнителем для суспензии, а также материалом в качестве обсыпки сушили кристаллический или плавленый кварц.

Анализ результатов исследования показывает, что образцы ОКФ из плавленого кварца практически не изменяют своих линейных размеров во всем исследованном интервале температур (рис. 3.6). КТЛР образцов формы, полученной из кристаллического кварца, увеличился почти в 8 раз при нагреве от 100 до 350 ^{0}C. Следует отметить, что керамическая оболочка является многокомпонентной системой и на КТЛР влияет не только основа связующего, но и материал наполнителя в суспензии и в обсыпке.

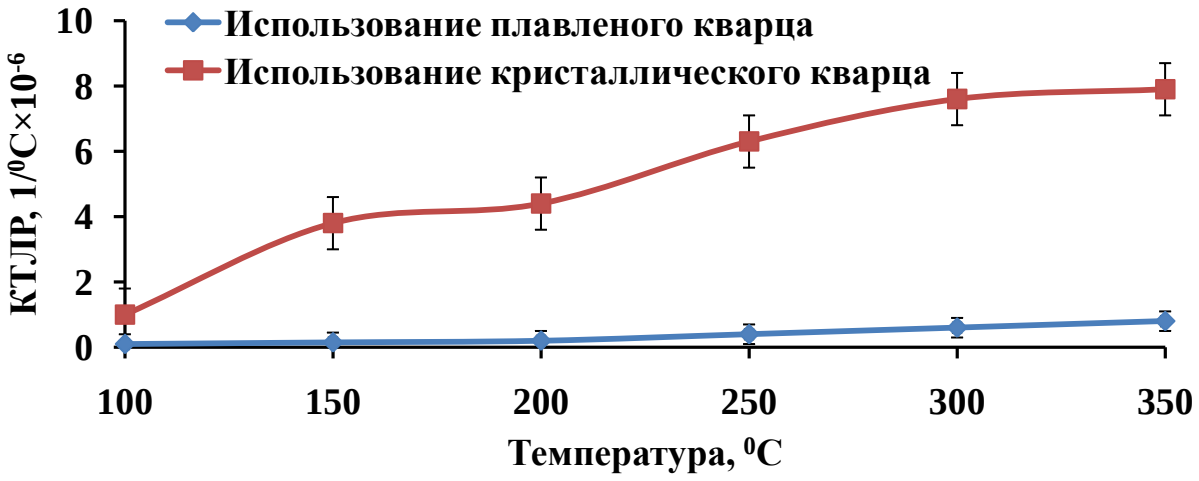


Рисунок 3.6 – Влияние вида огнеупорного материала на КТЛР огнеупорных керамических форм

Известно, что растрескивание огнеупорных керамических форм при прокалке происходит при условии, когда внутренние напряжения, возни-

кающие из-за разницы температур на внутренней и внешней поверхностях ОКФ превышают предел прочности материала керамической формы [60]. Для оценки термоустойчивости ОКФ в ряде работ предложено использовать формулу У.Д. Кингери [3, 4, 93, 94]:

$$\sigma_{\text{ВН}} = \frac{k_{\text{КО}} \times \text{E}(\text{T}_1 - \text{T}_2)}{1-\mu}, \qquad 3.2$$

где $\sigma_{\text{ВН}}$ – величина внутренних напряжений в стенке ОКФ, МПа; $k_{\text{КО}}$ - коэффициент теплового линейного расширения, $1/^0\text{C}\times10^{-6}$; Е – модуль упругости материала ОКФ, МПа; T_1 и T_2 – температуры на внешней и внутренней стенках ОКФ, соответственно, ^{0}C; μ – коэффициент Пуассона материала ОКФ.

Сложность определения внутренних напряжений в ОКФ заключается в том, что значения модуля упругости и коэффициента Пуассона известны только для исходных материалов, используемых при изготовлении огнеупорных керамических форм. В литературе отсутствуют величины указанных физических свойств для готовых керамических форм. Это, прежде всего, связано с тем, что на величину модуля упругости и коэффициента Пуассона готовых керамических форм будут оказывать влияние тип связующего и количество слоев ОКФ. Однако, учитывая, что у большинства огнеупорных материалов, широко применяемых в литье по выплавляемым моделям, значения модуля упругости и коэффициента Пуассона близки, можно сделать вывод, что решающее значение на растрескивание ОКФ будет оказывать КТЛР и разница температур на внутренней и внешней поверхностях. Следовательно, наименьшей склонностью к растрескиванию при прокалке будут характеризоваться тонкостенные ОКФ, изготовленные из материалов с низкими значениями КТЛР. Анализ результатов, представленных на рис. 3.4 *а* и 3.6, показывает, что наименьшей склонностью к

трещинообразованию будут обладать ОКФ, изготовленные с применением плавленого кварца.

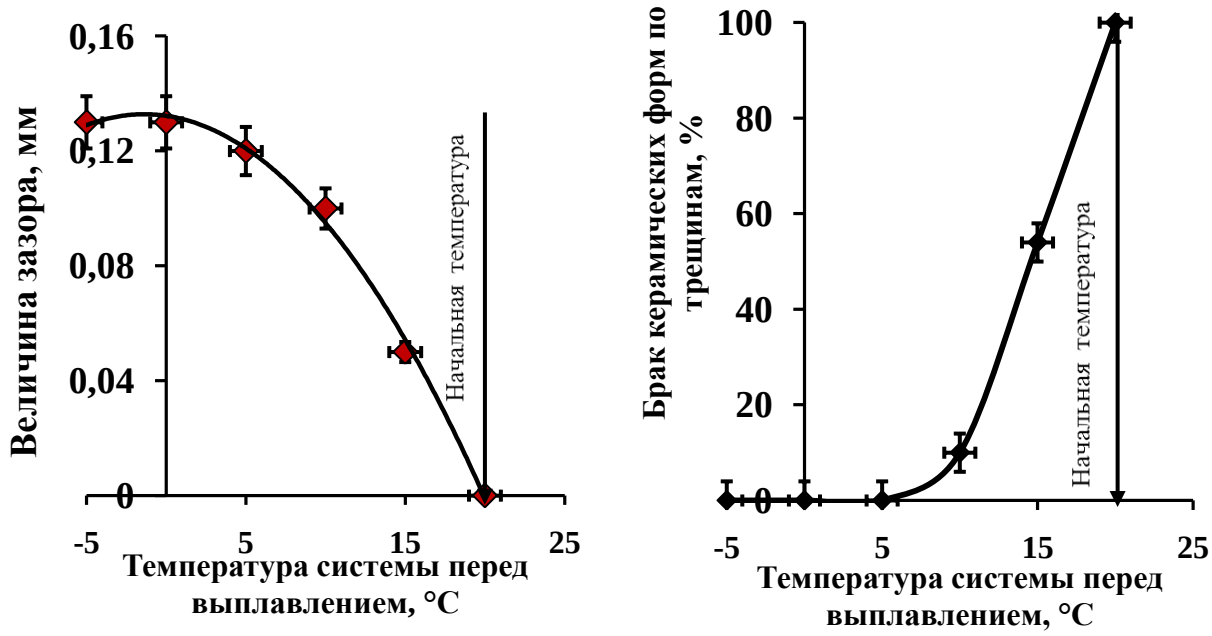
Таким образом, анализ результатов исследования показывает, что использование плавленого кварца обеспечивает комплекс повышенных свойств огнеупорных керамических оболочек по сравнению с более дешевым кристаллическим кварцем.

3.3 Исследование взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма»

Как было установлено выше, ОКФ из плавленого кварца характеризуются минимальным значением коэффициента теплового линейного расширения в интервале температур 100÷350 ^{0}C. Выплавление модельных составов в зависимости от их вида, как правило, производится при температурах в диапазоне 60÷95 ^{0}C, при которых ОКФ из плавленого кварца практически не будет менять своих размеров. При нагреве огнеупорной керамической формы с модельным блоком сразу до температуры выплавления (~95-100^{0}C) модельный состав начинает расширяться. При этом оказывается давление на стенки ОКФ. Давление расширяющегося модельного состава на стенки ОКФ может служить причиной растрескивания керамических форм при выплавлении модельного состава. Особенно критичным это становится в переходах от тонких сечений к толстым. Во избежание этого необходимо увеличивать количество слоев (толщину стенки керамической оболочки) в сочетании с использованием опорного наполнителя при выплавлении. Дополнительным технологическим приемом, предотвращающим растрескивание ОКФ на основе плавленого кварца, является выплавление модельных составов в среде перегретого пара, что обеспечивается использованием специального оборудования в виде бойлерклава. Способ удаления модельного состава из ОКФ в бойлерклаве считается достаточно

технологичным и хорошо зарекомендовал себя при выплавлении модельных составов с температурой плавления до 100^0С. Существенными недостатками указанного способа является высокая стоимость оборудования, дополнительный расход электроэнергии для выработки пара с необходимым давлением и температурой (Р=0,8Па, Т=170^0С), а также необходимость регенерации модельных составов для повторного использования из-за насыщения их влагой. Данные факторы снижают производительность, повышают энергоемкость и, как следствие, себестоимость процесса ЛВМ.

На основании вышесказанного проводили исследования по влиянию температуры системы «выплавляемая модель-огнеупорная керамическая форма» непосредственно перед операцией выплавления модельного состава [95-97]. Модели получали из модельного состава ПС 50-50. Огнеупорные керамические формы изготавливали по принятой методике. Температуру системы «выплавляемая модель-огнеупорная керамическая форма» варьировали в диапазоне (-5) ÷ (+20) ^{0}С. Охлаждение системы осуществляли в морозильной камере, нагрев – в сушильном шкафу. После достижения заданной температуры производили изотермическую выдержку системы в течение 30 мин для выравнивания температуры по всему объему. Далее систему извлекали и измеряли зазор между выплавляемой моделью и стенкой огнеупорной керамической формы с использованием программно-аппаратного комплекса СИАМС 700. Выплавление модельных составов из ОКФ осуществляли в воде, имеющей температуру (+95) ^{0}С. Влияние температуры на величину зазора и состояние системы «выплавляемая модель-огнеупорная керамическая форма» представлено на рис. 3.7.



а б

а – величина зазора; б – доля треснувших ОКФ при выплавлении

Рисунок 3.7 – Закономерность взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма»

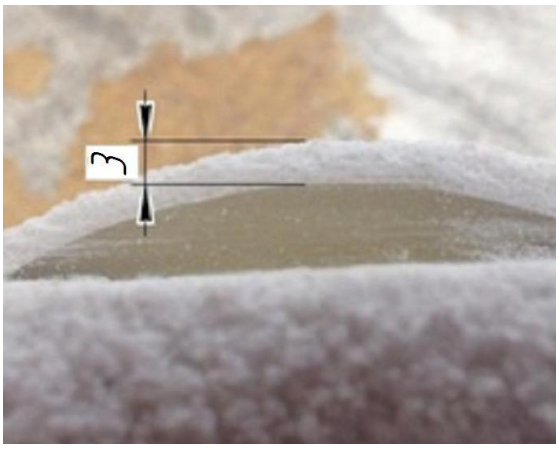
Из представленных результатов видно, что при температурах в интервале (-5)÷(+5) ^{0}С в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» обеспечивается зазор между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ величиной 0,10÷0,15 мм (рис. 3.8, *а*). Указанный зазор гарантированно обеспечивает целостность ОКФ до 100% при выплавлении модельного состава (рис. 3.8, *б*). При выплавлении модельных составов из ОКФ, не подвергнутых предварительному охлаждению (температура системы (+20)^{0}С доля треснувших ОКФ при выплавлении составляла 54÷100%.

Зависимость величины зазора в исследованном интервале температур системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» адекватно описывается выражением:

$$\Delta h = -0{,}0003T^3 - 0{,}0008T + 0{,}1322, \qquad (3.3)$$

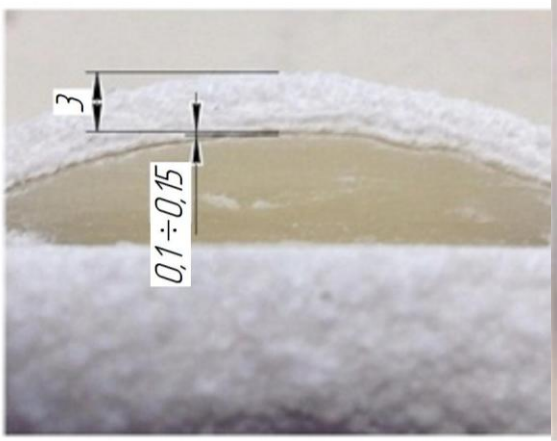
где Δh – зазор между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ, мм; Т - температура системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» перед выплавлением, ^{0}С.

На рис. 3.8 представлены зазоры и внешний вид ОКФ после выплавления модельного состава в зависимости от температуры системы перед выплавлением модельных составов.



а

б



в

г

а, в – зазор между восковой моделью и стенкой ОКФ; б, г – внешний вид ОКФ после выплавления модельных составов; а, б – без предварительного захолаживания системы перед выплавлением; в, г – предварительное захолаживание системы до (-5) ^{0}C

Рисунок 3.8 – Влияние температуры на формирование зазора в системе «выплавляемая модель - огнеупорная керамическая оболочка» и качество ОКФ после выплавления модельного состава

В зависимости от температуры установлены следующие закономерности взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» в процессе выплавления модельного состава из ОКФ на основе плавленого кварца:

1. При температуре системы перед выплавлением в интервале (+15)÷(+25) ^{0}C расширяющийся модельный состав оказывает давление на стенки ОКФ.
2. При температуре системы перед выплавлением в интервале (-5)÷(+10) ^{0}C формируется зазор величиной 0,10÷0,15 мм между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ.

Установленные закономерности взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» в зависимости от температуры системы схематично представлены на рис. 3.9.

Очевидно, что для описания процессов, протекающих в системе при выплавлении модельного состава из ОКФ, можно применить модифицированную формулу 3.2 в следующем виде:

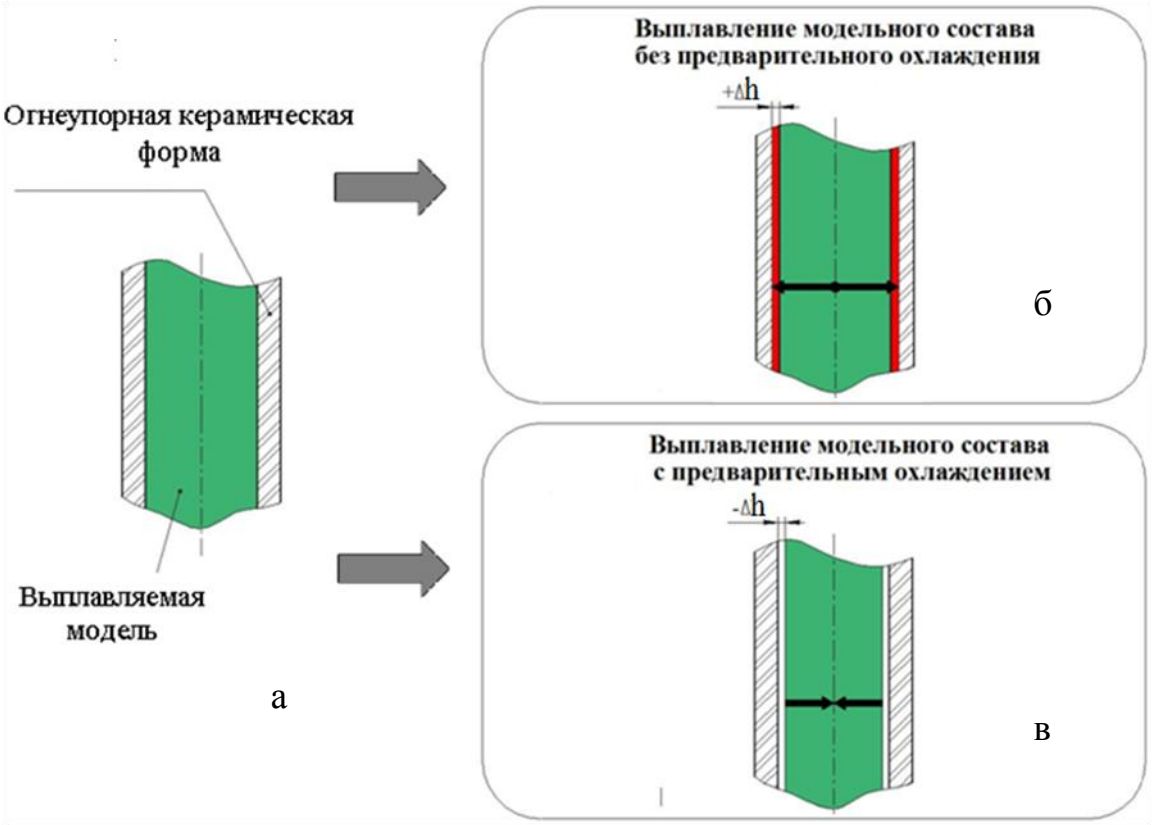
$$\sigma_{\text{ВН}} = \frac{k_{\text{КО}} \times \text{E}(\text{T}_1 - \text{T}_2)}{1-\mu} + \text{P}, \qquad (3.4)$$

где Р – давление, оказываемое на стенку ОКФ расширяющимся модельным составом при нагревании до температуры плавления.

Чем меньше коэффициент теплового температурного расширения материала ОКФ, тем более существенное влияние будет оказывать величина Р в выражении 3.3. Следовательно, растрескивание ОКФ при выплавлении модельного состава не будет происходить при соблюдении следующего условия:

$$\sigma_{\text{ВН}} \leq \sigma_{\text{в}}, \qquad (3.5)$$

где $\sigma_в$ – предел прочности ОКФ при растяжении



а – система в исходном состоянии; система при погружении в теплоноситель без предварительного охлаждения; в – система, погруженная в теплоноситель с предварительным охлаждением

Рисунок 3.9 – Взаимодействие модельного состава и стенок ОКФ на основе плавленого кварца при их нагреве до температуры выплавления модельного состава

С целью предотвращения растрескивания ОКФ на основе плавленого кварца на практике перед операцией выплавления модельного состава необходимо обеспечивать следующий температурный режим:

$$\Delta T=(T_{ф1} - T_{ф2}) \sim +(10 \div 15)\ ^0C, \qquad (3.6)$$

где ΔT – требуемая величина охлаждения системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» относительно текущей температуры (^0C); $T_{ф1}$ и $T_{ф2}$ – текущая и требуемая температуры ОКФ (^0C).

По результатам проведенных исследований получен патент на изобретение [98] и разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-06 «Изготовление оболочковых форм для ЛВМ с применением огнеупорного материала «Плавленый кварц» и связующего «Сиалит 20С»» (Приложения А, Б).

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Исследована свободная линейная усадка ($\alpha_м$) модельных составов различных видов. Установлено, что изменение линейных размеров образцов продолжается в течение длительного времени после затвердевания (до 24 ч).

2. Максимальной свободной линейной усадкой характеризуются ненаполненные модельные составы марок Romocast 105, 152 (Германия) и МВС 3-Т и ПС 50-50 (Россия). Величина $\alpha_м$ для указанных модельных составов имеет следующие значения:

- через 1 ч после затвердевание: 0,72÷1,22 %;

- через 24 ч после затвердевания: 0,87÷1,29%.

Свободная линейная усадка наполненных модельных составов Romocast 252 и 325 составила 0,59 и 0,73% через 1 и 24 ч после затвердевания, соответственно.

3. Впервые исследовано влияние температуры окружающей среды в интервале (-5)÷(+35) ^{0}C на изменение линейных размеров образцов из модельных составов. Установлено, что изменение длины образцов из ненаполненных модельных составов колеблется в интервале (-0,3)÷(+0,4)%; для наполненных составов - в интервале (-0,2)÷(+0,15)%.

4. Впервые исследована склонность модельных составов к сохранению стабильности размеров образцов при изменении температуры окружающей среды. Установлено, что у образцов из ненаполненных составов в процессе охлаждения до (-5) ^{0}C и последующего нагрева до (+20) ^{0}C исходная длина уменьшается, в среднем, на 0,2 мм. В процессе нагрева до (+35) ^{0}C и последующего охлаждения до (+20) ^{0}C исходная длина увеличивается, в среднем, на 0,2÷0,3 мм. При аналогичных процессах у образцов из наполненных модельных составов изменение длин составляет не более 0,1 мм.

5. На основании полученных результатов сделан вывод о необходимости учитывать указанные особенности при проектировании пресс-форм

для изготовления выплавляемых моделей, а также соблюдении определенного температурного режима при хранении готовых модельных блоков.

6. Впервые выполнено сравнительное исследование по влиянию вида огнеупорного материала на свойства огнеупорных керамических форм. Установлено, что прочность при изгибе ОКФ на основе плавленого кварца выше в 10 раз, а газопроницаемость в 2 раза по сравнению с ОКФ на основе кристаллического кварца. Коэффициент теплового линейного расширения в интервале температур 100÷350 ^{0}C у ОКФ на основе плавленого кварца изменяется в интервале (0,5÷1,0)×10^{-6} ^{0}C^{-1}; у ОКФ на основе кристаллического кварца – в интервале (1,0÷8,0)×10^{-6} ^{0}C^{-1}. Установленные особенности необходимо учитывать при последующей операции выплавления модельных составов из ОКФ.

7. Для объяснения причин растрескивания ОКФ из плавленого кварца при выплавлении модельного состава предложено модифицированное выражение У.Д. Кингери: $\sigma_{\text{ВН}} = \frac{k_{\text{КО}} \times \text{E}(\text{T}_1 - \text{T}_2)}{1-\mu} + \text{P}$, где P – давление оказываемое на стенку ОКФ расширяющимся модельным составом при нагревании до температуры плавления. Обосновано, что растрескивание ОКФ при выплавлении модельного состава не будет происходить при соблюдении следующего условия: $\sigma_{\text{ВН}} \leq \sigma_{\text{в}}$, где $\sigma_в$ – предел прочности ОКФ при растяжении.

8. Установлена закономерность взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» при использовании плавленого кварца в качестве огнеупорного материала. Для предотвращения растрескивания ОКФ при операции выплавления модельного состава необходимо наличие зазора между моделью и стенкой ОКФ. Зазор формируется в процессе охлаждения системы относительно температуры окружающей среды. Получено выражение, устанавливающее зависимость между величиной зазора и температурой: $\Delta\text{h} = -0{,}0003\text{T}^3 - 0{,}0008\text{T} + 0{,}1322$, где Δh – зазор между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ, мм;

Т - температура системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» перед выплавлением, ^{0}С).

9. Для формирования зазора на практике должно соблюдаться следующее условие: $\Delta T=(T_{ф1}–T_{ф2}) \sim +(10÷15)\ ^0$С, где ΔT – требуемая величина охлаждения системы относительно текущей температуры системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» (^{0}С); $T_{ф1}$ и $T_{ф2}$ – текущая и требуемая температуры ОКФ (^{0}С).

4.РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК СПОСОБОМ ЛВМ

4.1. Анализ технологии получения отливки «Вал» из стали 40ХЛ на ООО ПКФ «Вершина»

На ООО ПКФ «Вершина» из стали 40ХЛ литьем по выплавляемым моделям получали отливки «Вал» ответственного назначения [99]. Данные отливки предназначены для изготовления деталей, работающих в специальных электрошкафах в качестве эксцентриков для включения электроподстанций и в процессе эксплуатации подвергающихся циклическим знакопеременным нагрузками. Таким образом, детали должны характеризоваться высокой износостойкостью, прочностью и ударной вязкостью.

Чертеж отливки «Вал», а также расположение моделей отливок на модельном блоке по серийной технологии представлены на рис. 4.1 и 4.2, соответственно.

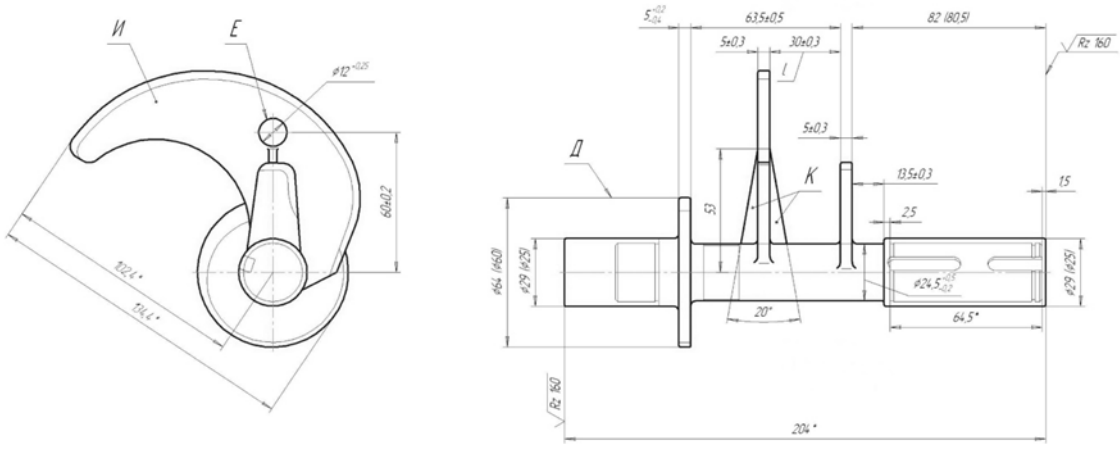
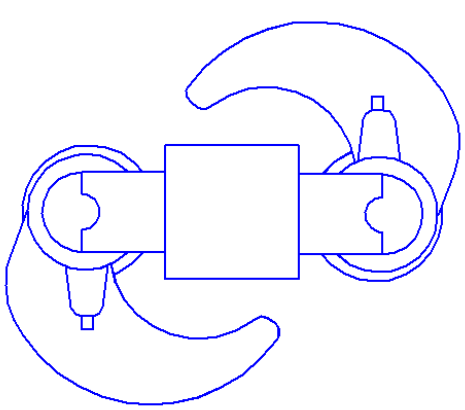
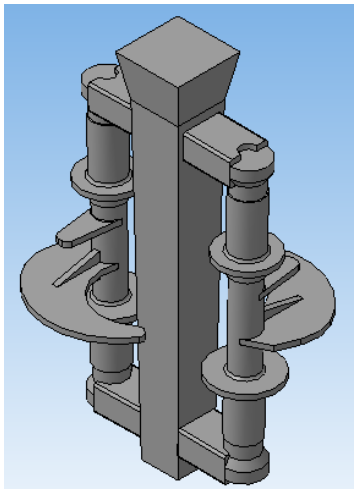


Рисунок 4.1 – Чертеж отливки «Вал»



а



б

а – расположение моделей отливок относительно стояка (вид сверху);

б – 3-D модель модельного блока

Рисунок 4.2 – Особенности модельного блока для получения отливки «Вал» по серийной технологии

На одном модельном блоке располагалось две модели отливки. Данный тип литниково-питающий системы можно охарактеризовать, как тип I с центральным стояком, который является одновременно литниковым ходом и коллективной прибылью [3]. Для изготовления моделей литниково-питающей системы и отливок использовали ненаполненный модельный состав марки ПС 50-50. Как установлено в главе 3, данный модельный состав характеризуется значительной свободной линейной усадкой и нестабильностью в сохранении размеров моделей при изменении температуры окружающей среды. Однако, данный состав обладает малой зольностью, низкой ценой, доступностью исходных материалов и простотой приготовления [3, 4].

Получение моделей осуществляли запрессовкой модельного состава в пресс-формы с помощью шприц-машины модели 659А (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Основные параметры и характеристики шприц-машины модели 659А

№, п/п	Наименование параметров и характеристик	Значения
1	Наибольшая производительность:	0,063 250,0
	по модельному составу, $м^3$/ч	
	по количеству запрессовок, шт/ч	
2	Габаритные размеры пресс-форм (д×ш×в), мм	350×350×300
3	Наименьшая высота пресс-форм, мм	160
4	Температура расплава модельного состава, °С	80
5	Наибольший объем запрессовки, л	4
6	Давление запрессовки, МПа	0,2 - 0,5
7	Давление допрессовки, МПа	0,4 - 1,26
8	Время выдержки под давлением допрессовки, с	0,5 - 15
9	Температура теплоносителя, подаваемая насосно-нагревательной станцией, °С	95
10	Температура модельной пасты на выходе из шестеренчатой мешалки (не более), °С	62

Готовые модели и модельные блоки хранили в помещении с широким интервалом температуры окружающей среды. Статистический анализ температуры в помещении выявил, что в зависимости от времени года данный параметр может меняться от 10÷12 ^{0}С (в зимнее время) до 28÷30 ^{0}С (в летнее время).

Изготовление огнеупорной керамической формы осуществляли погружением блока в раствор суспензии на основе готового связующего ГС-20П-А (табл. 4.2) с последующей послойной обсыпкой кристаллическим кварцем различной зернистости. Толщина ОКФ по серийной технологии составляла 5-7 мм. Сушка форм производилась в течение 30 мин. естественным путем, затем 45 мин. в парах аммиака.

Таблица 4.2 – Параметры связующего ГС-20П-А

№ п/п	Наименование параметра	Характеристика
1	Внешний вид	Жидкость от бесцветного до желто-коричневого цвета. Оттенок не нормируется.
2	Массовая доля диоксида кремния, %	17÷21
3	Продолжительность гелеобразования, мин	11÷20
4	Массовая доля азотной кислоты, %	0,01÷0,10

Выплавление модельного состава производится в горячей воде при температуре 90 – 95 ^{0}С в течение 15 мин.

Перед прокалкой ОКФ формовались в опоки с опорным наполнителем. Прокалка ОКФ осуществлялась в прокалочной печи СНО-165-1042 при температуре 850-1000 ^{0}С в течение 12 ч. Заливка производилась при температуре форм 800-850 ^{0}С.

Регламентируемая температура сплава по серийной технологии составляла 1580 ± 10^0С.

Наиболее типичными дефектами отливок «Вал» по серийной технологии являлись пористость, раковины и горячие трещины (рис. 4.3). Суммарный брак по указанным дефектам составлял 16%, выход годных отливок, при этом, не превышал 40%.

а

б

а – усадочные раковины; б – горячая трещина

Рисунок 4.3 – Типичные дефекты отливки «Вал» из стали 40ХЛ по серийной технологии

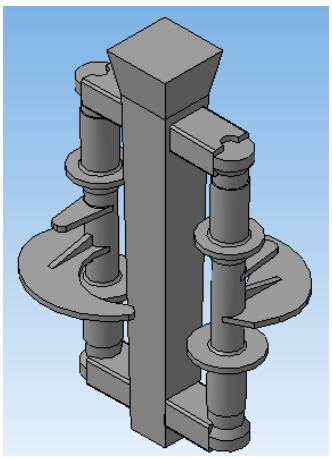
Таким образом, серийная технология не обеспечивала стабильной целостности ОКФ на основе кристаллического кварца при выплавлении модельного состава и гарантированного качества отливок ответственного назначения «Вал» из стали 40ХЛ.

4.2 Моделирование процессов формирования дефектов в отливке «Вал» при литье по выплавляемым моделям

Использование современных систем автоматизированного моделирования литейных процессов (CAM ЛП) с целью повышении эффективности литья серийных отливок способствует существенному снижению трудозатрат на проектирование литейной оснастки и проведение натурных испытаний. В настоящее время имеется большое количество программ для моделирования литейных процессов. Известны такие программы, как Magmasoft (Германия), ProCast (Франция), SolidCast, Flow-3D (США), а также две отечественные разработки – «Полигон» и LVMFlow. Система автоматизированного моделирования литейных процессов LVMFLow имеет следующие преимущества перед существующими аналогами: широкий спектр возможностей, простота в использовании; русский интерфейс и отечественная база данных; метод контрольных объемов, обеспечивающий высокую скорость расчетов и моделирования (от 5 мин на 1 расчет) [87]. С учетом вышесказанного, для решения поставленной задачи в работе использовали лицензионную CAM ЛП LVMFlow.

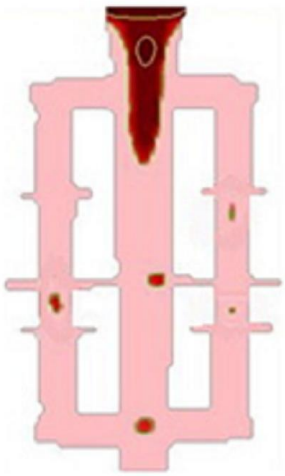
В связи с существующими проблемами при серийном производстве отливок «Вал» было принято решение усовершенствовать литниковую систему, которая будет отвечать следующим требованиям: соблюдение принципа направленного затвердевания; подвод тонкостенной части детали к тепловому узлу для равномерного затвердевания отливки [99, 100].

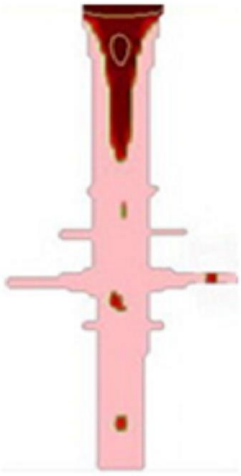
На первом этапе было выполнено моделирование по серийной технологии (рис. 4.4). Анализ результатов моделирования показал совпадение очагов дефектов реальных и виртуальных отливок (рис. 4.3, *а*; рис. 4.4, *в*, *г*). На основании полученных данных был сделан вывод об адекватности построенной модели.



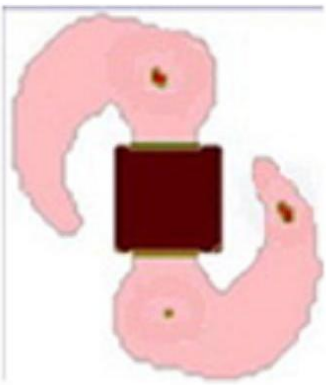
а

б





в



г

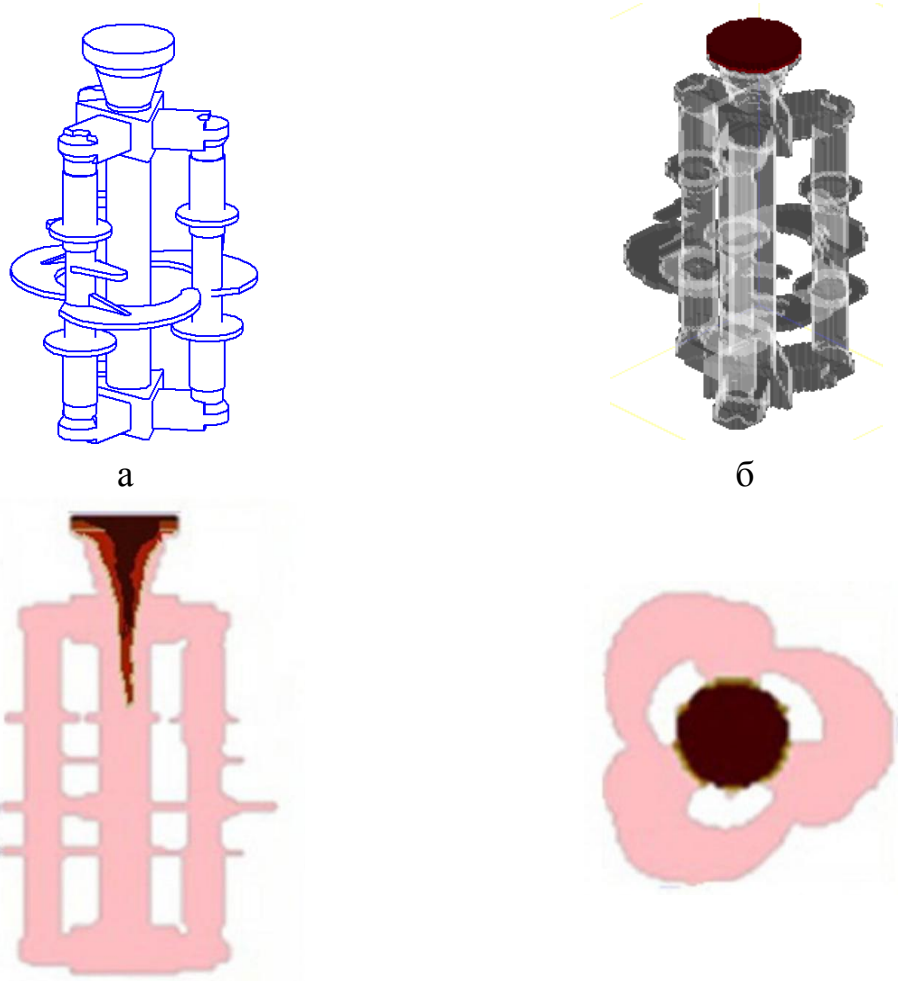
а – математическая модель отливки с элементами ЛПС; б – прозрачная модель с расположением областей, пораженных усадкой; в, г – расположение пористости в продольных и поперечном сечениях

Рисунок 4.4 – Моделирование процессов формирования усадочных дефектов в отливке «Вал» по существующей конструкции

При выборе варианта корректировки существующей конструкции ЛПС исходили из того, что наименее оптимальным является увеличение размеров элементов ЛПС, так как это приведет к повышению расхода металла и, как следствие, к снижению выхода годного. Повышение температуры заливаемого расплава также не является обоснованным, так как при этом увеличивается расход энергоресурсов и снижается производительность.

В существующую конструкцию были внесены следующие основные изменения: увеличение количества отливок с 2 до 3 шт. и изменение сече-

ния стояка с квадратного на круглое. Результаты моделирования с учетом предложенных изменений показаны на рис. 4.5.



а б в г

а – математическая модель отливки с элементами ЛПС; б – прозрачная модель с расположением областей, пораженных усадкой; в, г – результаты моделирования в продольном и поперечном сечениях

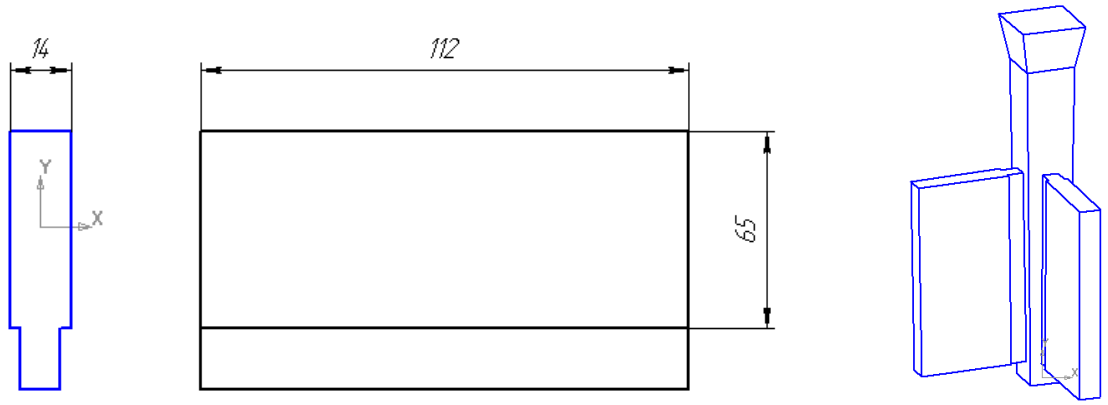
Рисунок 4.5 – Моделирование процессов формирования усадочных дефектов в отливке «Вал» по предложенному варианту

Полученные результаты показывают отсутствие усадочных дефектов в телах отливок.

На основании результатов моделирования разработаны и изготовлены конструкции пресс-форм для изготовления моделей ЛПС по предложенному варианту. Эффективность предложенного варианта в дальнейшем проверяли в опытно-промышленных условиях.

4.3 Исследование влияния материала огнеупорного наполнителя и состава шихты на свойства стали 40ХЛ

На данном этапе исследовали влияние кристаллического и плавленого кварца, используемых в качестве огнеупорных наполнителей для изготовления огнеупорных керамических форм на свойства стали 40ХЛ. В процессе экспериментов варьировали составом шихты при получении опытных отливок типа «Пластина» (рис. 4.6).



а б

а – чертеж отливки; б – расположение отливок на стояке

Рисунок 4.6 – Опытная отливка типа «Пластина»

Эксперименты выполняли в производственных условиях ООО ПКФ «Вершина».

Модели для ЛПС и отливок изготавливали из модельного состава ПС 50-50. Формирование огнеупорных керамических форм на моделях производили по принятой технологии. Исходя из простоты конструкции модельного блока перед выплавлением моделей из ОКФ производили охлаждение системы «выплавляемая модель - ОКФ» с (+25)^{0}С до (+15) ^{0}С в ванне с холодной (+11) ^{0}С проточной водой из артезианской скважины. Выплавление модельного состава из ОКФ производили в ванне с горячей водой при температуре (+95) ^{0}С. В процессе выплавления растрескивания ОКФ отмечено не было.

Составы шихт опытных плавок представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3 – Составы шихт опытных плавок для приготовления стали 40ХЛ

Вариант состава шихты	Состав шихты	Доля, %	Характеристика шихтовых материалов
1	Сталь 40Х: пруток (ГОСТ 2590-88) ВСП*: литники (сталь 40ХЛ)	50	Деформированная шихта (Д-шихта)
		50	Мелкокристаллическая литая шихта
2	ВСП: облой от штамповки (сталь 40Х) ВСП: литники (сталь 40ХЛ)	60	Деформированная шихта (Д-шихта)
		40	Мелкокристаллическая литая шихта
3	Сталь 20: пруток (ГОСТ 2590-88) ВСП: литники (сталь 40ХЛ) Ферросплавы: ФХ75, FeSi, FeMn	75	Деформированная шихта (Д-шихта)
		20	Мелкокристаллическая литая шихта
		5	Первичные шихтовые материалы

ВСП – возврат собственного производства

Заливку ОКФ на основе кристаллического кварца производили в опорном наполнителе по серийной технологии. Огнеупорные керамические формы на основе плавленого кварца заливали без опорного наполнителя, при температуре форм 22-25ºС.

Опытные отливки после извлечения из ОКФ и отделения от ЛПС подвергались термообработке по режиму, который регламентируется для серийной отливки «Вал» (табл. 4.4).

Таблица 4.4 – Параметры термообработки опытных отливок

Наименование режима	Температура, ^{0}С	Время выдержки, мин	Охлаждающая среда
Закалка	860±10	30	масло
Отпуск	650±10	60	

Из опытных отливок вырезалось по 8 образцов для проведения механических испытаний.

Результаты исследований представлены на рис. 4.7.

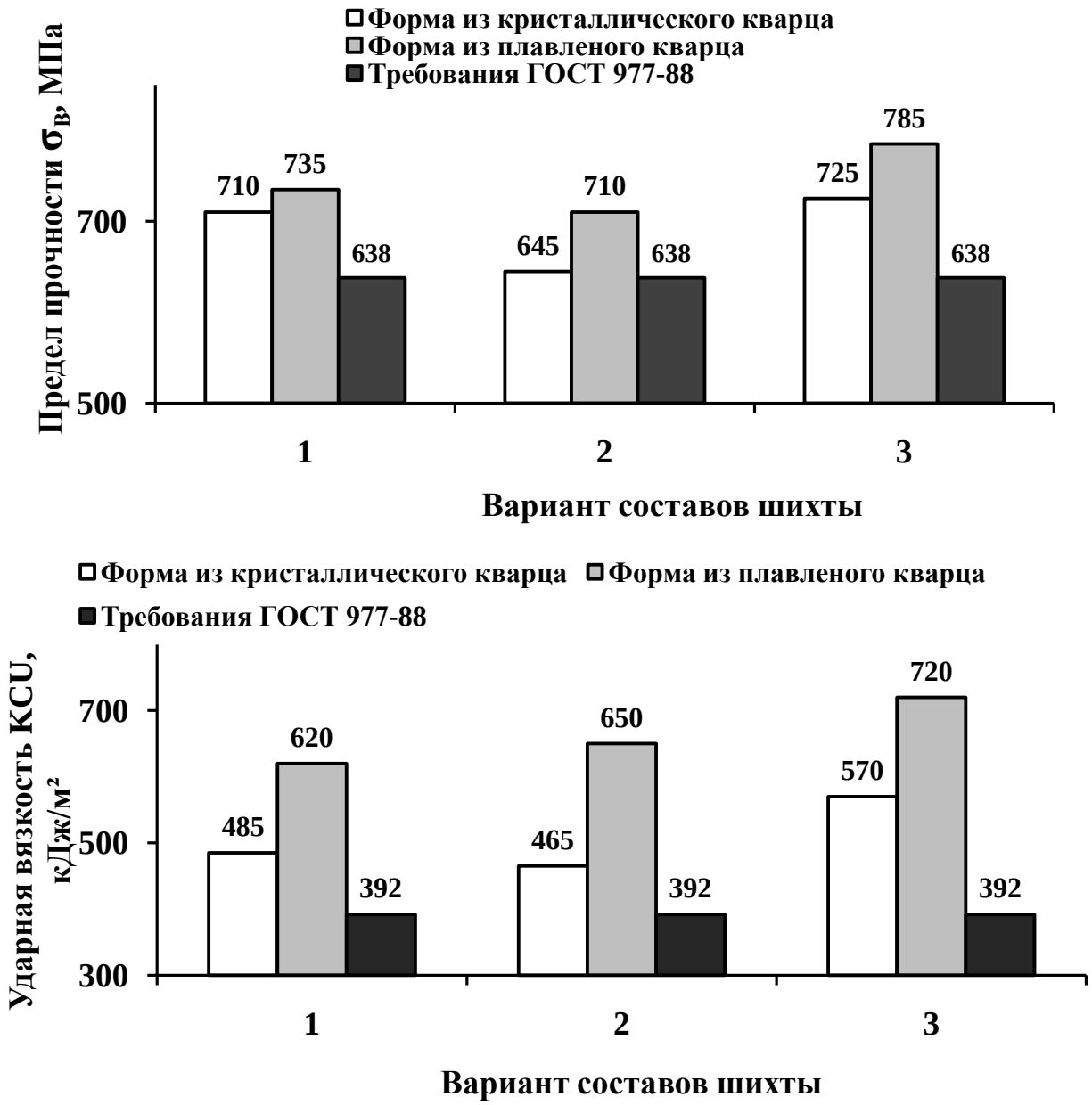


Рисунок 4.7 – Влияние вида огнеупорного наполнителя и состава шихты на механические свойства стали 40ХЛ

Анализ полученных результатов показывает, что для всех вариантов шихты повышенными прочностными свойствами характеризовались отливки, полученные в ОКФ на основе плавленого кварца. Это обусловлено тем, что заливка без опорного наполнителя способствует повышению ско-

рости охлаждения расплава. Как следствие, в литом изделии формируется однородная мелкокристаллическая структура.

Наиболее высокие свойства были получены при использовании в составе шихты 20% возврата собственного производства в виде литников (вариант 3, табл. 4.4). При этом, гарантированный запас свойств над требованиями ГОСТ 977-88 обеспечивает состав шихты с использованием 100% мелкокристаллического ВСП. Следовательно, структура возврата оказывает устойчивое наследственное влияние на свойства стали 40ХЛ.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что для обеспечения повышенного уровня прочностных свойств допускается использование до 100% ВСП с благоприятной мелкокристаллической структурой. Вовлечение в состав шихты такого возврата будет способствовать снижению себестоимости литых изделий с гарантированным обеспечением требуемых свойств отливок из стали 40ХЛ.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Выполнен анализ серийной технологии получения отливки «Вал» из стали 40ХЛ на ООО ПКФ «Вершина». Установлено, что брак отливок по литейным дефектам достигал 16%, а выход годного не превышал 40%. Наиболее типичными дефектами отливок являлись пористость и раковины усадочного происхождения, а также горячие трещины.

2. Выполнено моделирование процессов формирования усадочных дефектов в отливке «Вал» по серийной конструкции модельного блока (количество отливок в блоке – 2 шт.). Результаты моделирования совпали с местами расположения дефектов усадочного происхождения в реальных отливках.

3. Предложена новая конструкция модельного блока с увеличением количества отливок в блоке до 3-х шт. По результатам моделирования дефекты в отливке отсутствуют. Разработаны и изготовлены пресс-формы для получения моделей ЛПС по предложенному варианту для последующих опытно-промышленных испытаний в условиях ООО ПКФ «Вершина».

4. Установлено, что заливка ОКФ на основе кристаллического кварца с применением опорного наполнителя не обеспечивает гарантированного запаса прочностных свойств стали 40ХЛ по сравнению с заливкой в ОКФ на основе плавленого кварца без опорного наполнителя. Это связано с тем, что нагретый при прокалке опорный наполнитель снижает интенсивность теплоотвода. Данный фактор обуславливает формирование в отливках неоднородной кристаллической структуры.

5. Использование в составе шихты от 20 до 100% мелкокристаллического возврата собственного производства в случае заливки стали 40ХЛ в ОКФ на основе плавленого кварца без опорного наполнителя обеспечивает гарантированный запас предела прочности и ударной вязкости по сравнению с требованиями ГОСТ 977-88. При этом предел прочности по-

вышается на 15-23%, а ударная вязкость до 84% по сравнению с регламентируемыми уровнями указанных свойств.

5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1. Внедрение технологии получения отливок «Вал» из стали 40ХЛ в огнеупорные керамические формы на основе плавленого кварца

В производственных условиях ООО ПКФ «Вершина» проводили опытно-промышленные испытания разработанных технологических решений с целью повышения качества отливок «Вал» из стали 40 ХЛ литьем по выплавляемым моделям в огнеупорные керамические формы на основе плавленого кварца.

По результатам моделирования изготавливали модели ЛПС и отливок из модельного состава ПС 50-50 по следующей технологии. Модельный состав расплавлялся в металлической емкости на «водяной бане».

Запрессовка состава проводилась при температуре $75\pm5\ ^0$С в разработанные пресс-формы из сплава Д16 с помощью шприц-машины мод. 659А. Сборку, разборку и извлечение восковых моделей из пресс-форм осуществляли вручную.

Далее модели охлаждали в ванне с проточной водой при температуре $18\text{-}20^0$С. После этого на моделях зачищали швы, образовавшиеся по линиям разъема пресс-форм. Сборку моделей ЛПС и отливок в единый блок производили ручной напайкой по представленной схеме (рис. 5.1).

Хранение готовых модельных блоков осуществлялось в помещении с контролируемой температурой в интервале $18\div25^0$С.

Для изготовления ОКФ использовали плавленый кварц торговой марки «Кефрон». Для приготовления суспензии использовали готовое связующее марки ГС-20П-А.

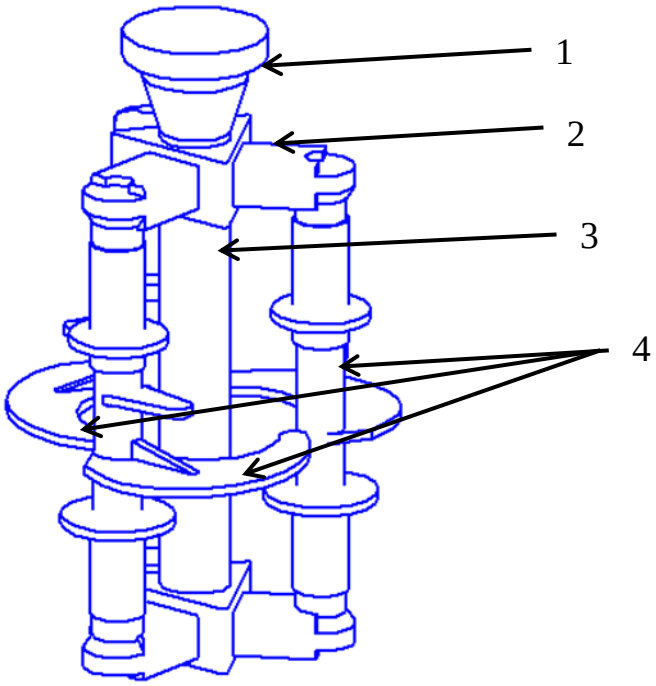


Рисунок 5.1 – Схема модельного блока для опытно-промышленных испытаний:
1 – литейная чаша; 2 – питатели; 3 – стояк; 4 - отливки

Сушку форм осуществляли в аммиачных камерах в установке мод. 2155А. Сушка оболочек производилась в течение 30 мин естественным путем, затем 45 мин. в парах аммиака.

Готовые ОКФ с модельными составами охлаждали на 10-15^{0}С относительно температуры окружающей их среды. Охлаждение осуществляли в ванне с проточной водой из артезианской скважины.

Выплавление модельного состава из ОКФ производили в горячей воде при температуре воды 90-95^{0}С в течение 15 мин. После выплавления модельного состава опытные ОКФ в количестве 100 шт. были подвергнуты контролю на целостность. По результатам контроля опытные ОКФ были признаны годными к дальнейшим операциям подготовки к литью.

Далее ОКФ направляли на прокалку, которую производили в прокалочной печи модели СНО6-16,5-1042 в течение 3 ч. при температуре 950^{0}С (рис. 5.2).

Рисунок 5.2 – Огнеупорные керамические формы, установленные на прокалку

Прокаленные ОКФ направляли на заливочный плац без формовки в опорный наполнитель (рис. 5.3). Температура ОКФ перед заливкой находилась в интервале 25÷60 ^{0}C.

Сталь 40ХЛ готовили с использованием 100% ВСП (вариант 2, табл. 4.3) в печи ИСТ-0,16/0,32. Заливку осуществляли с помощью ручного чайникового ковша (рис. 5.4). Температура стали в процессе литья составляла 1580÷1600 ^{0}C.

В процессе заливки разрушение опытных форм отсутствовало. После заливки форму охлаждали естественным путем на воздухе в течение 5ч (рис. 5.5).

После выбивки производили отделение отливок от литниковой системы на маятниковых пилах.

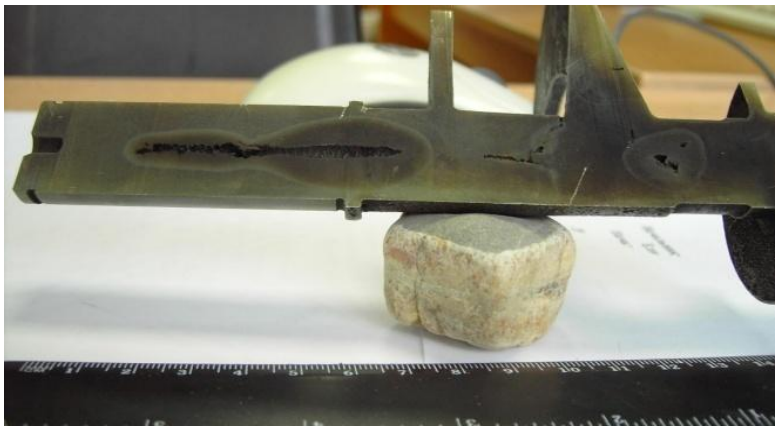
Рисунок 5.3 – Огнеупорные керамические формы на основе плавленого кварца, установленные на плацу под заливку без опорного наполнителя

Рисунок 5.4 – Заливка стали 40ХЛ в огнеупорные керамические формы на основе плавленого кварца без опорного наполнителя

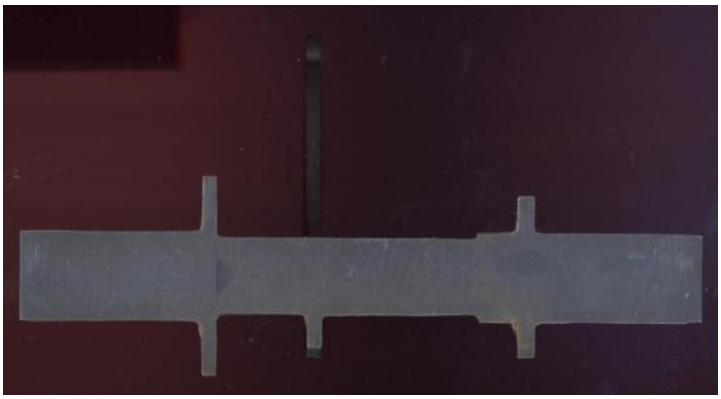
Далее был произведен выборочной контроль качества опытных отливок на наличие дефектов усадочного характера. В процессе контроля дефектов усадочного происхождения выявлено не было (рис. 5.6).

Опытная партия отливок «Вал» была отправлена заказчику. По результатам входного контроля все отливки были признаны годными.

Рисунок 5.5 – Охлаждение залитых опытных форм на основе плавленого кварца



а



б

а – по серийной технологии в ОКФ на основе кристаллического кварца;

б – по опытной технологии в ОКФ на основе плавленого кварца

Рисунок 5.6 – Макроструктура отливок «Вал» из стали 45ХЛ

По результатам опытно-промышленных испытаний разработанная технология получения отливок «Вал» из стали 40ХЛ в огнеупорные кера-

мические формы на основе плавленого кварца была внедрена в производственный процесс ООО ПКФ «Вершина» (Приложение В).

Выполняли статистический анализ эффективности внедрения разработанной технологии.

Расчет технологичности производили по следующим основным показателям [3].

Расчетный выход годного (ВГ):

$$ВГ = \frac{G_0 \cdot N_0}{G_m} = \frac{V_0 \cdot N_0}{(V_0 \cdot N_0 + V_Л)}, \quad (5.1)$$

где G_o – масса единичной отливки, кг; G_m – масса шихты, кг; N_o – число отливок в форме; V_o *и* $V_Л$ – объемы единичной отливки и ЛПС, дм^3, определяется по чертежу без учета коэффициента объемной усадки β или по результатам взвешивания.

Относительный расход залитого в форму металла, приходящегося на одну отливку $M_{зал.о.}$, кг/отл:

$$M_{зал.о.} = \frac{G_o}{ВГ}, \quad (5.2)$$

Коэффициент выхода отливок (КВО):

$$КВО = \frac{N_Г}{N_О}, \quad (5.3)$$

где $N_Г$ – количество годных отливок; $N_О$ – количество залитых отливок.

Коэффициент использования залитого в форму расплава (КИР):

$$КИР = \frac{G_Д \cdot N_О \cdot КВО}{G_О \cdot N_О + G_Л}, \quad (5.4)$$

где $G_Д$ – масса единичной детали, кг; $N_О$ – число отливок в блоке; *КВО* – коэффициент выхода отливок; $G_О$ – масса единичной отливки, кг; $G_Л$ – масса ЛПС, кг.

Расход металла, залитого в форму, на деталь $M_{зал.д.}$, кг/деталь:

$$M_{зал.д.} = \frac{G_Д}{КИР} \quad (5.5)$$

Коэффициент использования площадей (КИП), кг/м^2:

$$КИП = \frac{G_O \cdot N_O \cdot КВО}{S_Б}, \qquad (5.6)$$

где G_O – масса единичной отливки, кг; N_O – количество отливок в блоке; $КВО$ – коэффициент выхода отливок; $S_Б$ – площадь блока отливок с ЛПС в плане, считая по габаритным размерам, м^2.

В табл. 5.1 представлены результаты, достигнутые за счет изменения конструкции модельного блока и замены кристаллического кварца на плавленый при изготовлении ОКФ. Видно, что снизились расходы жидкого металла на одну отливку. Данные показатели свидетельствует о повышении эффективности используемого расплава и площадей литейной формы.

Таблица 5.1 - Результаты сравнения показателей технологичности серийной и разработанной конструкций модельных блоков

Показатель	Технология		Эффект
	Серийная	Разработанная	
Число отливок в блоке	2	3	+1
Выход годного (ВГ)	0,49	0,6	+0,11
Относительный расход залитого в форму металла, приходящегося на одну отливку $M_{зал.о.}$, кг/отл	3,98	3,25	-0,75
КВО	0,75	1	+0,25
КИР	0,24	0,4	+0,16
Расход металла, залитого в форму, на деталь $M_{зал.д.}$, *кг/деталь*	5,41	3,25	-2,16
КИП	81,94	154	+72,06

В табл. 5.2 представлены положительные результаты разработанной технологии за счет сокращения технологических операций по подготовке огнеупорных материалов, а также времени на прокалку ОКФ и снижения температур ОКФ при подготовке к литью.

Таблица 5.2 - Основные различия в технологических операциях по серийной и разработанной технологиям

Вид огнеупорного материала	Операции по подготовке огнеупорного материала		Время прокалки ОКФ, ч	Наличие опорного наполнителя во время заливки форм	Температура форм при заливке, ^{0}C
	Просев	Прокалка			
Кристаллический кварц	+	+	12	+	850÷900
Плавленый кварц	-	-	3	-	25÷60

В целом, при внедрении разработанной технологии были достигнуты следующие показатели:

- снижение брака ОКФ по растрескиванию в 5,5 раза;

- сокращение времени прокалки ОКФ после выплавления модельного состава в 4 раза;

- повышение производительности прокалочных печей в 6 раз;

- устранение операции нагрева ОКФ под заливку;

Достижение вышеперечисленных показателей обеспечили снижение стоимости одной огнеупорной керамической формы на основе плавленого кварца на 7% по сравнению с ОКФ на основе кристаллического кварца (табл. 5.3).

Таблица 5.3 – Стоимость ОКФ по серийной и разработанной технологиям

Технология	Стоимость огнеупорного материала, руб./отливка	Суммарная зарплата основных рабочих по операциям, руб./отливка	Затраты на электроэнергию при прокалке ОКФ, руб./отливка	Коэффициент потерь от брака ОКФ	Стоимость ОКФ, руб.
Серийная	7,0	93,0	9,0	1,27	138,0
Разработанная	53,0	68,0	1,5	1,05	129,0

За период 2012-2015 г.г. по внедренной технологии было произведено 20000 шт. отливок «Вал». При этом, было обеспечено снижение суммарного брака отливок «Вал» в 4 раза и повышение выхода годного с 40 до 65%.

5.2 Опытно-промышленные испытания технологии получения отливок «Корпус» из стали 35ХГСЛ

Отливка «Корпус» из стали 35ХГСЛ (ОСТ 1 90093-82) является отливкой ответственного назначения, используемой для изготовления крепежных деталей в авиационной технике. Чертеж детали представлен на рис. 5.7.

По серийной технологии отливки «Корпус» получали литьем по выплавляемым моделям в огнеупорные керамические формы на основе кристаллического кварца.

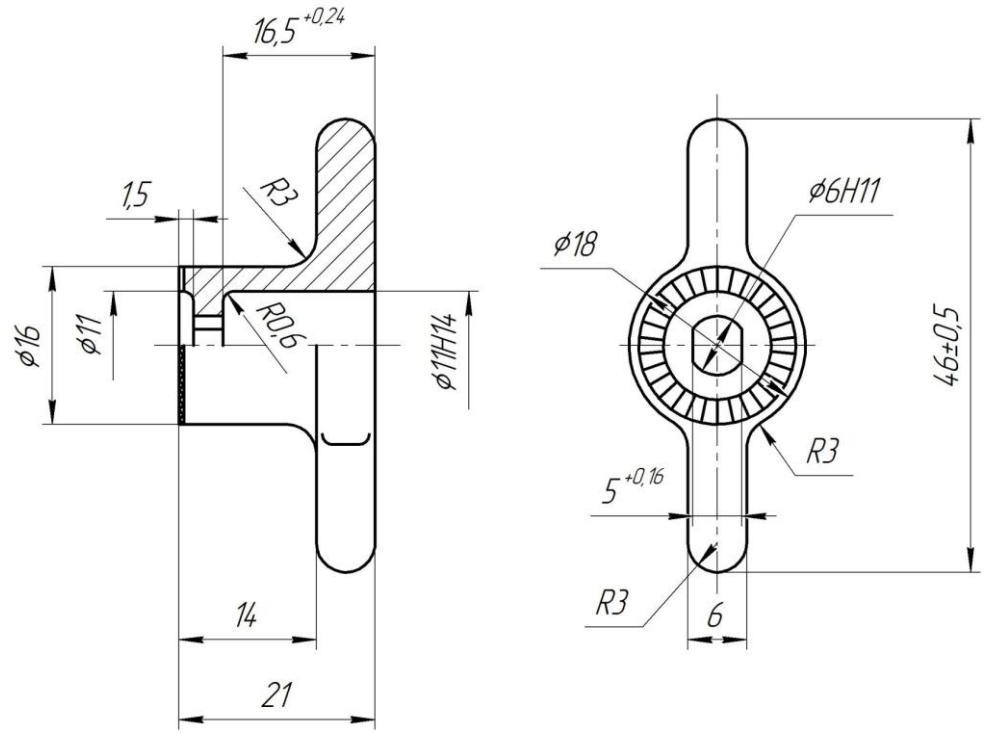


Рисунок 5.7 – Чертеж детали «Корпус»

Время цикла прокалки форм для ЛВМ, изготовленных из кристаллического кварца составляет 12 ч. Это обусловлено высоким коэффициентом линейного термического расширения кристаллического кварца и его кристаллическими превращениями, которые могут вызывать растрескивание форм при ее быстром нагреве. Для предотвращения растрескивания заливку форм расплавом производят при температуре форм около 800^0С в опорном наполнителе, что при затвердевании отливок обусловливает низкие скорости охлаждения (менее 1-5 ^{0}С/с). При низких скоростях охлаждения отливки из стали 35ХГСЛ склонны к хладноломкости, которая характеризуется повышенной хрупкостью сплава при комнатных температурах и сопровождается наличием камневидного излома [101].

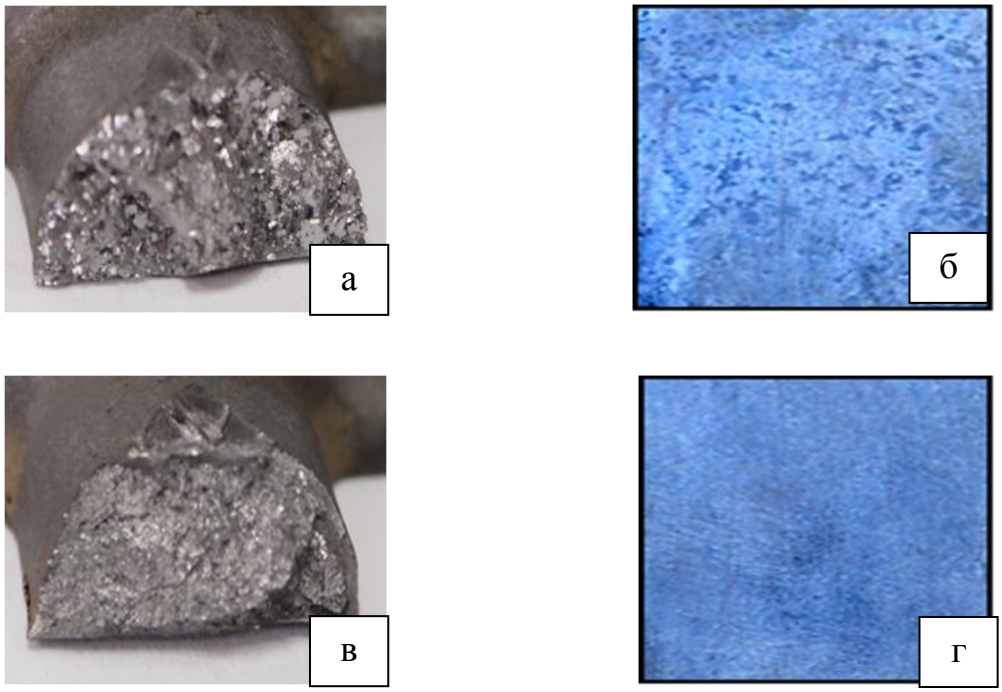
Данный дефект существенно снижал показатели ударной вязкости в термообработанном состоянии. Кроме того, отмечались частые несоответствия по относительному удлинению на отдельно отлитых образцах. В связи с низким выходом годного отливок (57-63%) по многочисленным литейным дефектам была произведена замена кристаллического кварца на плавленый кварц при изготовлении огнеупорных керамических форм. С учетом отличий в физических свойствах плавленого кварца, были внесены изменения в существующий технологический процесс: уточнены размеры формообразующих полостей пресс-формы для получения восковых моделей; изменены параметры подготовки ОКФ к выплавлению модельного состава и заливке расплавом [102].

Использование плавленого кварца позволило сократить время прокалки ОКФ в 4 раза, существенно снизить температуру нагрева керамических форм перед заливкой и устранить операцию их формовки в опорный наполнитель. Это способствовало снижению энергозатрат на подготовку форм к заливке и, как следствие, увеличению производительности труда. Внедрение технологии изготовления огнеупорных керамических форм с применением плавленого кварца и вышеперечисленные корректировки

технологического процесса оказали положительное влияние на макроструктуру стальных отливок (рис. 5.8).

Устранение дефекта типа «камневидный излом» способствовало существенному повышению таких свойств отливок в термообработанном состоянии, как относительное удлинение, относительное сужение и ударная вязкость (рис. 5.9).

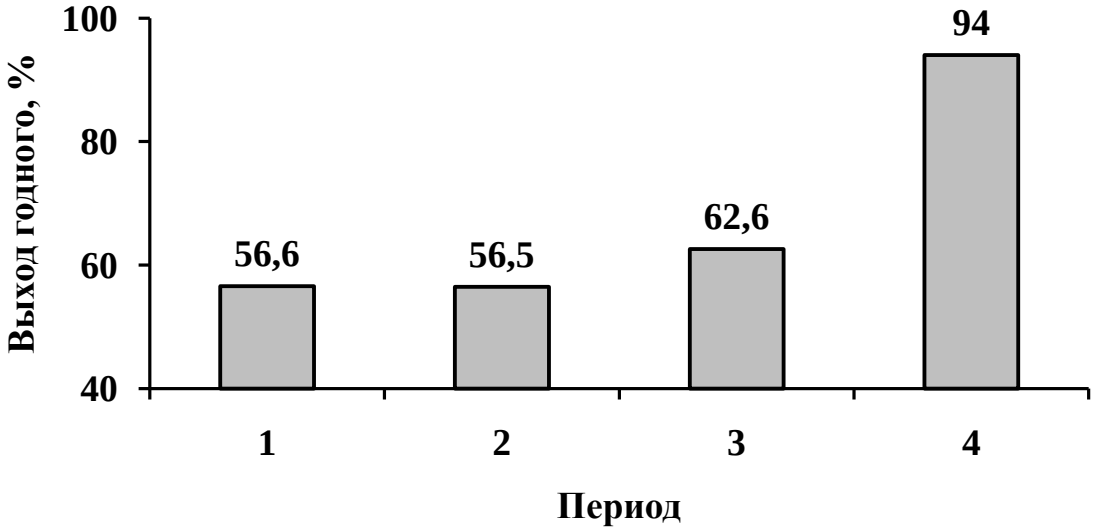
Внедрение разработанной технологии способствовало существенному сокращению уровня брака по трещинам, рыхлоте и пористости, выявляемых при визуальном контроле (рис. 5.10). Анализ результатов показывает, что замена кристаллического кварца на плавленый кварц способствует увеличению выхода годного в 1,6 раза.



а, б – по серийной технологии (формы с кристаллическим кварцем);
в, г – по разработанной технологии (формы с плавленым кварцем)

Рисунок 5.8 - Влияние вида технологии на излом и макроструктуру отливок из стали 35ХГСЛ (термообработанное состояние) при литье по выплавляемым моделям

Рисунок 5.9 – Влияние вида огнеупорного наполнителя на механические свойства стали 35ХГСЛ



1 – 3 – серийная технология (2010 г.-2012 г., I-е полугодие);
4 – разработанная технология (2012 г., II-е полугодие -2013 г.)
Рисунок 5.10 – Влияние разработанной технологии на выход годного

Экономический расчет (табл. 5.4) показал, что за счет сокращения времени прокалки форм (с 8 до 2 часов) и сокращения брака при литье, внедрение разработанной технологии обеспечивает снижение себестоимости отливки на 32%.

Таблица 5.4 – Влияние вида технологии на себестоимость отливок из стали 35ХГСЛ

Технология	Стоимость огнеупорного материала, руб./отливка	Затраты на электроэнергию при прокалке ОКФ, руб./отливка	Коэффициент потерь от брака ОКФ	Стоимость ОКФ, руб.
Серийная	0,4	1,3	1,59	31,4
Разработанная	4,0	0,3	1,06	23,7

* Сдельная зарплата основных рабочих по обеим технологиям – 18,02 руб./шт.

Таким образом, внедрение разработанной технологии для получения отливок «Корпус» из стали 35ХГСЛ позволило существенно повысить выход годного (с 63 до 94%), увеличить ударную вязкость (на 28%), относительное удлинение (на 20%) и относительное сужение (на 12%). Снижение трудоемкости и расхода электроэнергии на всех этапах подготовки огнеупорных керамических форм к заливке, а также повышение качества отливок способствовало снижению их себестоимости по предварительным расчетам на 7,7 руб./шт.

Эффективность технологии подтверждена актом оценки (Приложение Г) качества отливок «Корпус» из стали 35ХГСЛ на ОАО «Гидроавтоматика» (г. Самара).

5.3 Получение отливок литьем по выплавляемым моделям с применением реверс-инжиниринга и аддитивных технологий

Аддитивные технологии нашли широкое применение в промышленности, начиная с первой коммерциализации стереолитографии в 1987 г. В течение последующих лет техника и технологии 3D- печати непрерывно развивались и внедрялись в различные сферы машиностроения, в т.ч. и в литейное производство [103].

Для изготовления отливок в единичных и мелкосерийных экземплярах требуется провести весь спектр литейных работ, от проектирования и

изготовления литейной оснастки до заливки и финишной обработки отливок. Часто эти работы имеет смысл делать для деталей, которые трудно или невозможно получить механической обработкой.

Именно в этих случаях аддитивные технологии открывают широкие возможности в быстром решении поставленных задач с соблюдением всех технологических требований, предъявляемым к конечному изделию.

В настоящее время в современном литейном производстве наиболее широкое применение нашли следующие технологии быстрого прототипирования [104]:

FDM (Fused Deposition Modeling) – процесс послойного наплавления экструдируемого расплава полимера на поверхность модели. Области применения: создание элементов модельной оснастки для литья в песчано-глинистые формы (ПГФ) и холоднотвердеющие смеси (ХТС); создание выжигаемых моделей для литья в оболочковые формы; создание восковых моделей для литья по выплавляемым моделям.

SLA (Stereo LithographyApparatus) – процесс послойной полимеризации фоточувствительного материала под действием источника света с определенной длинной волны. К областям применения данной технологии в литейном производстве можно отнести создание выжигаемых и выплавляемых моделей для литья в оболочковые формы, обладающие высокой размерной точностью и чистотой поверхности.

3DP (3D-Printing) –процесс создания объемных физических моделей путем отверждения слоев порошкового материала при помощи жидкого связующего вещества. Наиболее широко данная технология в литейном производстве используется при создании литейных форм и стержней выполненных с использованием ХТС-процесса, а также выжигаемых моделей на основе полиметилметакрилата.

Реверс-инжиниринг (обратное проектирование) — это способ получения трехмерных данных об объекте в компьютеризированной форме из физических моделей или продуктов. Он имеет явные преимущества в

смысле сокращения времени прохождения продукта от стадии проектирования до выхода на рынок, а также эффективного использования вкупе с другими технологиями экономии времени, такими как быстрое прототипирование и тиражирование. Процесс реверс-инжиниринга состоит из комплекса технологий, аппаратных и программных средств, предназначенных для воспроизведения существующего объекта с целью его копирования или внесения изменений.

С применением реверс-инжиниринга и аддитивных технологий в Центре литейных технологий СамГТУ получали отливки «Рычаг тормозной» из стали 40ХЛ литьем по выплавляемым моделям. Отливки требовалось получать в кратчайшие сроки и малой серийностью – 8 шт.

Для сокращения временных и материальных затрат на подготовку производства требуемых отливок был выполнен следующий комплекс технологических решений:

- сканирование единичной отливки с помощью 3D сканера RengeVision Spectrum (рис. 5.11). Данный сканер позволяет сканировать с высокой точностью (не менее 72 мкм) объекты с минимальным объемом от 1300 $см^3$.

- изготовление оснастки (пресс-формы для получения восковых моделей) из высокопрочного медицинского гипса.

- изготовление промодели (рис. 5.12) из полимерного пластика с помощью 3D-печати на отечественном принтере Hercules (рис. 5.13).

В качестве материала для печати 3-d модели был выбран полимер на основе полиалктида (PLA). Обладая низкой усадкой и высокой прочностью, данный материал обеспечивает получение моделей с оптимальными свойствами для применения в литейном производстве. Сравнительные характеристики полимеров, наиболее широко применяемые в FDM-технологии приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5 - Сравнительные характеристики полимеров

Наименование	Плотность, г/см³	Температура экструзии, °С	Усадка, %	Зольность, %
ABS	1,02-1,08	235-260	0,4-0,7	~0,021
PLA	1,23-1,25	173-178	менее 0,01	~0,015
HIPS	1,05-1,10	230-240	0,5-0,8	~0,250

Мастер - модель отливки «Рычаг тормозной» была напечатана с учетом значений коэффициентов линейных усадок используемого воскового модельного состава и стали 40ХЛ. Полученную мастер - модель использовали в качестве формообразующей при изготовлении гипсовой пресс-формы.

Рисунок 5.11 - 3D-сканер RengeVision Spectrum

Рисунок 5.12 - Промодель «Рычаг тормозной», полученная с помощью аддитивных технологий

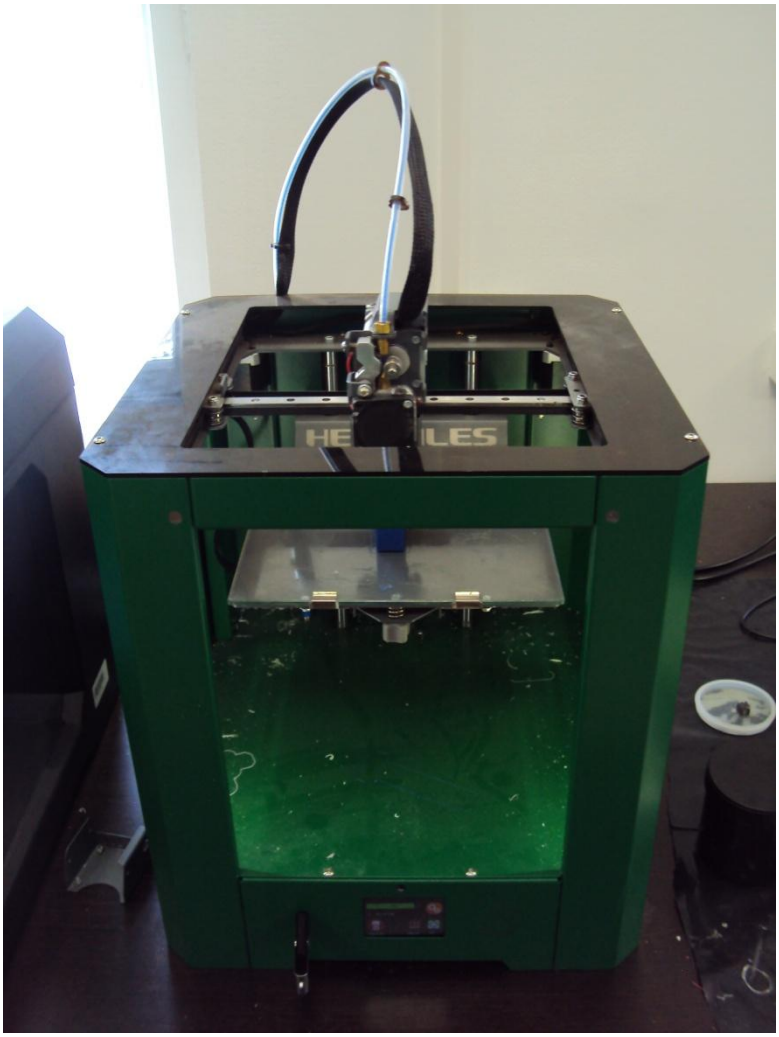


Рисунок 5.13 - 3D-принтер Hercules

Восковые модели получали запрессовкой пастообразного модельного состава ПС 50-50 в рабочую полость пресс-формы с помощью ручного воскового шприца.

Далее восковые модели собирали напайкой в модельный блок. На основании анализа конструкции отливки выбрали литниково-питающую систему I типа (рис. 5.14). Согласно [3] данный тип ЛПС является наиболее оптимальным для получения отливок из стали массой до 1 кг. типа «Рычаг». ЛПС I-го типа характеризуется центральным стояком компактного сечения (для квадратного сечения – в пределах 20÷50 мм) к которому посредством двух индивидуальных питателей крепится модель отливки. Согласно классификации, центральный стояк одновременно выполняет роли литникового хода и коллективной прибыли. Питатели, таким образом, дополнительно являются шейками прибыли. Центральное расположение стояка обуславливает его замедленное охлаждение после заливки формы расплавом и направленное затвердевание периферийно расположенных отливок.

По разработанному технологическому процессу послойным нанесением формировали огнеупорную керамическую форму с использованием плавленого кварца.

После формирования требуемой толщины стенки и сушки ОКФ для предотвращения ее растрескивания производили охлаждение системы на 15^0С, формируя необходимый воздушный зазор между модельным блоком и внутренней стенкой формы. Выплавление модельного состава осуществляли в паровом котле. При выплавении растрескивание ОКФ не происходило.

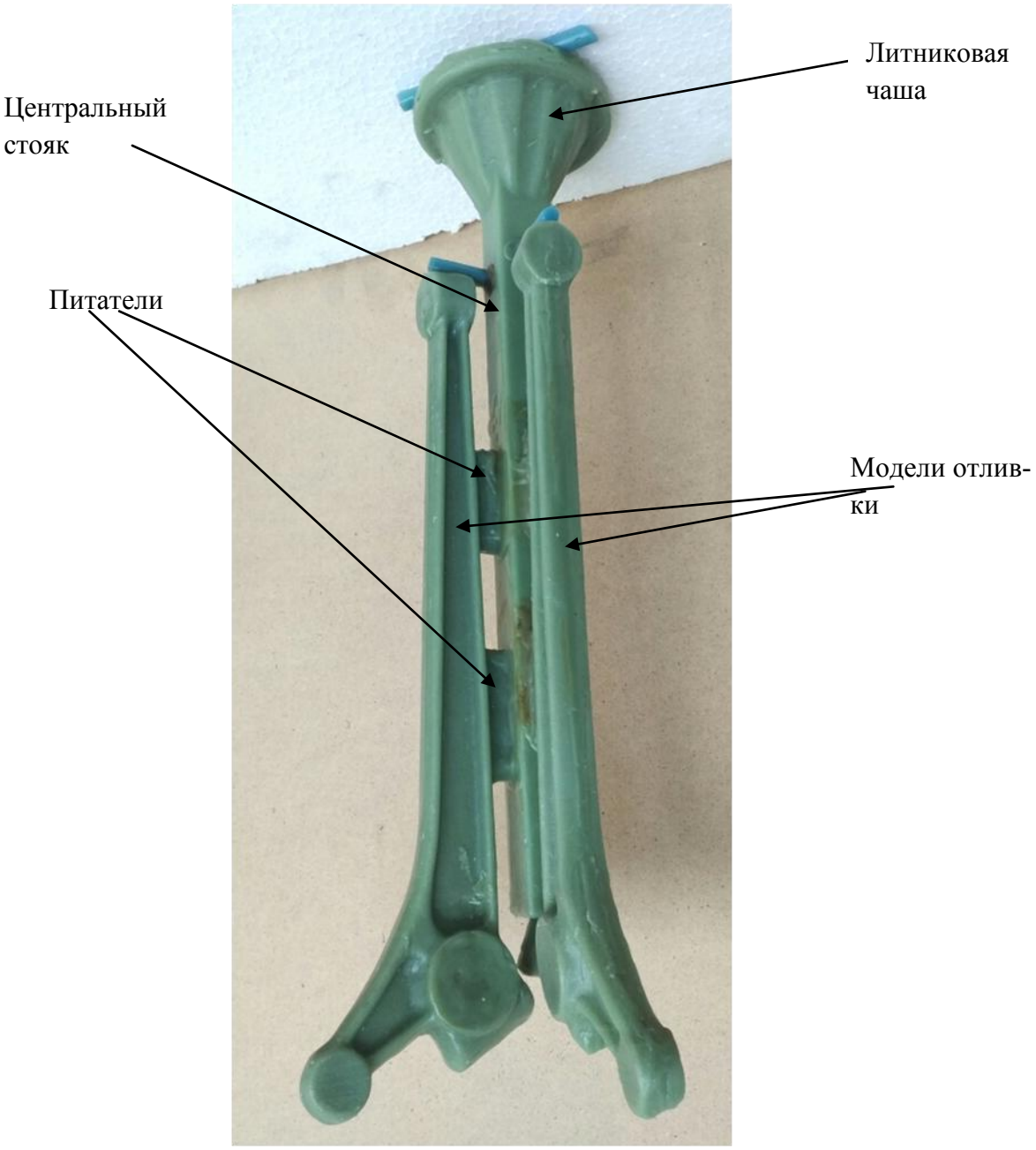


Рисунок 5.14 - Модельный блок для получения отливки «Рычаг тормозной»

После удаления модельного состава осуществляли прокалку ОКФ в электрической печи сопротивления при температуре 850^0С в течение 2 ч. Сталь 45ХЛ готовили в индукционной плавильной ППИ-0,33.

Формы перед заливкой имели комнатную температуру. Отливки остывали вместе с формами на воздухе. Далее производили выбивку отливок и финишные операции по отделению элементов ЛПС и зачистке.

По результатам сдачи заказчику все отливки были признаны годными. Внешний вид детали «Рычаг тормозной», полученной из отливки представлен на рис. 5.15.

Рисунок 5.15 - Деталь «Рычаг тормозной»

С целью расширения возможностей аддитивных технологий и реверс-инжиниринга в литье по выплавляемым моделям в Центре литейных технологий СамГТУ получали отливки «Ключ» (рис. 5.16) из сплава ЦАМ 4-1 ГОСТ 19424-97, годовая потребность, которых составляет 20 шт./год [105]. Данная литая деталь предназначена для фиксации металлических колб фильтрационных установок. В числе основных требований, предъявляемым к отливке, являлось отсутствие механической обработки рабочих частей и низкая стоимость изделия. С целью сокращения времени и себестоимости изготовления отливок было принято решение использовать модели, полученные методами аддитивных технологий, в качестве выжигаемых объектов из огнеупорных керамических форм. Немаловажную роль в процессе изготовления полимерной выжигаемой модели играют такие показатели, как высота наплавляемого слоя модели (шаг печати, который опреде-

ляет шероховатость получаемой модели и будущей отливки) и процент внутреннего заполнения (определяет массовую долю выжигаемого материала). Для полученных моделей данные показатели составили 0,1 мм и 5%, соответственно. Высота в 0,1 мм позволила добиться относительной чистоты поверхности, а низкий процент заполнения уменьшил расход выжигаемого материала, при сохранении необходимой жесткости модели. В качестве материала для изготовления моделей был выбран полимер на основе полилактида (PLA). Модели получали с помощью 3D-печати на отечественном принтере Hercules. В связи с простотой конструкции отливки и сокращения расхода полимера печать осуществляли вместе с литейной чащей, являющейся прототипом верхней литниково-питающей системой (рис. 5.17).

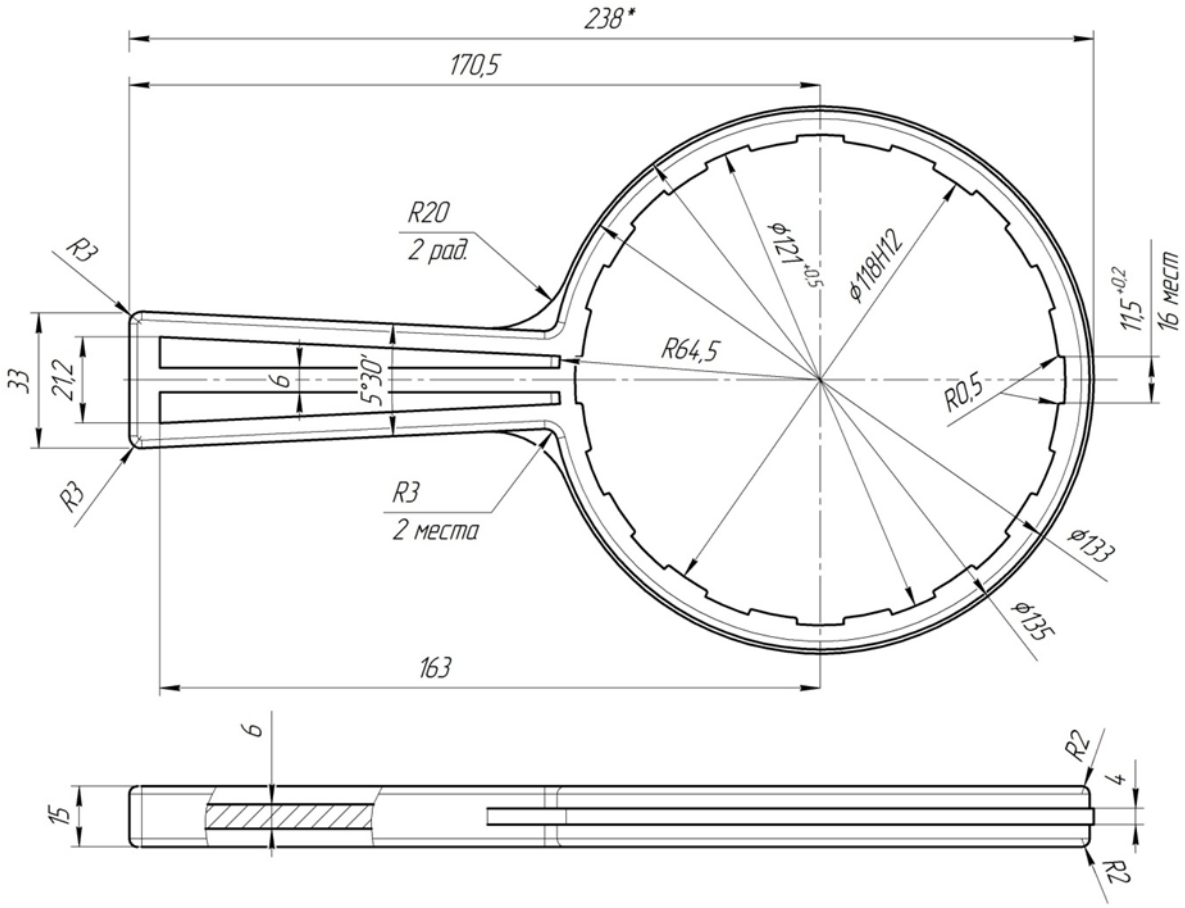


Рисунок 5.16 - Чертеж отливки «Ключ»

При изготовлении моделей с элементами ЛПС была учтена величина линейной усадки. Так как усадка PLA полимера составляет не более 0,01%, а линейное расширение при прокалке огнеупорной керамической формы на основе плавленого кварца отсутствует, то изменениями размеров в системе «модель - огнеупорная керамическая форма» можно пренебречь, и учитывать только величину усадки сплава (для ЦАМ 4-1: 0,6-0,8%).

Рисунок 5.17 - 3D-модель отливки «Ключ» с элементами ЛПС

При изготовлении огнеупорных керамических форм из плавленого кварца в качестве связующего использовался «Сиалит-20С». На рис. 5.18, *а* представлена полимерная модель с нанесенным огнеупорным покрытием. Процесс выжигания полимерных моделей был совмещен с прокалкой керамических форм. Общая длительность процесса составила 2 ч. На рис. 5.18, *б* представлена керамическая форма после выжигания полимерной модели и прокалки. Заливка расплава производилась при температуре керамических форм 20°С.

На рис. 5.19 показана готовая отливка «Ключ». Проведенные испытания в условиях заказчика, показали, что дополнительной механической

обработки на рабочий контур отливок не требуется, все отливки были признаны годными.

а б

а - полимерная модель с нанесенным огнеупорным покрытием;
б – огнеупорная керамическая форма после выжигания модели и прокалки
Рисунок 5.18 - Подготовка форм к заливке

Рисунок 5.19 - Отливка «Ключ»

По результатам выполненных работ были сделаны следующие выводы:

- современные средства аддитивного производства бюджетного класса позволяют в кратчайшие сроки и с минимальной себестоимостью получать модели пригодные для использования в литейном производстве;

- для производства единичных и мелкосерийных отливок литьем по выплавляемым и выжигаемым моделям, полученных средствами аддитивных технологий, отсутствует необходимость в изготовлении дорогостоящей литейной оснастки.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Внедрение разработанной технологии для получения отливок «Вал» из стали 40ХЛ способствовало обеспечению следующих показателей:

- снижение брака ОКФ по растрескиванию в 5,5 раза;

- сокращение времени прокалки ОКФ после выплавления модельного состава в 4 раза;

- повышение производительности прокалочных печей в 6 раз;

- устранение операции нагрева ОКФ под заливку;

- снижение себестоимости ОКФ на 7%;

- повышение выхода годных отливок с 40 до 65%.

2. Внедрение разработанной технологии для получения отливок «Корпус» из стали 35ХГСЛ обеспечило:

- снижение себестоимости ОКФ на 30%;

- увеличение выхода годных отливок в 1,6 раза;

- повышение относительного удлинения и ударной вязкости стали на 20 и 28%, соответственно;

- снижение себестоимости получения отливок на 22%.

3. Впервые показана эффективность получения отливок единичной и мелкой серии литьем по выплавляемым моделям с использованием реверс-инжиниринга и аддитивных технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Разработан комплекс технологических решений, обеспечивающий повышение эффективности производства стальных отливок ответственного назначения литьем по выплавляемым моделям.

Получены новые научно-практические знания о свободной линейной усадке в процессе затвердевания модельных составов различных видов, влиянии температуры окружающей среды на стабильность размеров выплавляемых моделей.

Исследованы закономерности взаимодействия в системе «выплавляемая модель-огнеупорная керамическая форма», на основании которых разработана эффективная технология выплавления модельных составов из огнеупорных керамических форм на основе плавленого кварца.

Разработана технология получения отливок единичной и мелкой серии литьем по выплавляемым моделям с использованием реверс-инжиниринга и аддитивных технологий.

На основании выполненных исследований сделаны следующие основные выводы.

1. Впервые *проведены сравнительные исследования свободной линейной усадки* в процессе затвердевания модельных составов различных видов. Установлено, что усадочные процессы модельных составов протекают в течение до 24 ч. Сделано обоснованное предположение, что это обусловлено длительностью процессов полимеризации, протекающих в модельных составах.
2. Впервые *исследовано изменение линейных размеров восковых моделей* в зависимости от температуры окружающей среды в диапазоне от (-5) до (+35) °С. Установлено, что с понижением температуры происходит уменьшение, а с повышением температуры - увеличение линейных размеров образцов из модельных составов. Диапазон изменения линейных размеров зависит от вида модельного состава:

- ненаполненные модельные составы (Romocast 105, Romocast 152, МВС-3Т, ПС 50-50): от (-0,35) до (+0,44)%;

- наполненные модельные составы (Romocast 252, Romocast 325): от (-0,15) до (+0,4)%.

3. *Установлена закономерность взаимодействия* в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» при использовании плавленого кварца в качестве огнеупорного наполнителя.

4. Для объяснения причин растрескивания огнеупорных керамических форм из плавленого кварца при выплавлении модельного состава *предложено модифицированное выражение* У.Д. Кингери: $\sigma_{\text{ВН}} = \frac{k_{\text{КО}} \times \text{E}(\text{T}_1 - \text{T}_2)}{1-\mu} + \text{P}$, где P – давление оказываемое на стенку ОКФ расширяющимся модельным составом при нагревании до температуры плавления. Обосновано, что растрескивание ОКФ при выплавлении модельного состава не будет при соблюдении следующего условия: $\sigma_{\text{ВН}} \leq \sigma_{\text{в}}$, где $\sigma_в$ – предел прочности ОКФ при растяжении.

5. *Получена зависимость величины зазора в исследованном интервале температур* системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма»: $\Delta\text{h} = -0{,}0003\text{T}^3 - 0{,}0008\text{T} + 0{,}1322$, где Δh – зазор между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ, мм; Т - температура системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» перед выплавлением, ^{0}С.

6. *Предложена физическая модель*, объясняющая снижение давления модельного состава на огнеупорную керамическую форму из плавленого кварца при проведении операции выплавления за счет охлаждения системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» на 10÷15°С относительно ее текущей температуры.

7. Для формирования зазора в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» на практике *предложено*

условие: $\Delta T=(T_{ф1}–T_{ф2}) \sim +(10÷15)\ ^0C$, где ΔT – требуемая величина охлаждения системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» относительно текущей температуры (^0C); $T_{ф1}$ и $T_{ф2}$ – текущая и требуемая температуры ОКФ (^0C).

8. *Разработана и запатентована технология* получения огнеупорных оболочковых форм (**патент РФ № 2509622**).

9. Внедрение разработанного комплекса технологических решений в литейном производстве ООО ПКФ «Вершина» (г. Самара) *способствовало повышению эффективности* производства отливок ответственного назначения из сталей марок 40ХЛ («Вал») и 35ХГСЛ («Корпус») по следующим показателям: устранение брака по растрескиванию огнеупорных керамических форм из плавленого кварца при выплавлении модельных составов; сокращение расхода электроэнергии на операцию прокаливания в 6 раз; увеличение производительности операции прокалки огнеупорных керамических форм в 5-7 раз; сокращение общего брака стальных отливок в 3 раза. Эффективность разработки подтверждена актом оценки качества отливок на ОАО «Гидроавтоматика (г. Самара).

10. Реализована *программа модернизации участка ЛВМ* для получения отливок «Вал» из стали 40ХЛ. Эффективность результатов исследования подтверждены актом внедрения в литейном производстве ООО ПКФ «Вершина» (г. Самара).

11. Спроектирована и организована действующая лаборатория, для литья по выплавляемым моделям в центре литейных технологий СамГТУ, в которой применяется разработанная технология.

12. Впервые *показана эффективность* получения единичных и мелкосерийных партий отливок литьем по выплавляемым моделям с использованием реверс-инжиниринга и аддитивных технологий.

13. Результаты исследований *используются в учебном процессе* кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ в курсе учебных дисциплин «Специальные способы литья», «Производство отливок из сталей и чугуна» и «Технология литейного производства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Специальные способы литья: Справочник [текст] / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич и др.; под общ. ред. В.А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
2. Pattnaik, S., Karunakar, D. B., Jha, P.K. Developments in investment casting process—A review [текст] / S. Pattnaik, D. B. Karunakar, P.K. Jha // Journal of Materials Processing Technology – 2012. - № 212. – С. 2332– 2348.
3. Иванов, В Н. Литье по выплавляемым моделям [текст] / В.Н. Иванов, С.А. Казеннов, Б.С. Курчман и др.; под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. – 3 изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
4. Репях, С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям [текст] / С.И. Репях. Днепропетровск: Лира, 2006. – 1056 с.
5. Братухин, А.Г. Расширение производства точных отливок литьем по выплавляемым моделям [текст] / А.Г.Братухин, Н.Л.Кривов, Е.Б.Качанов // ВИАМ/1993-201267. http://viam.ru/public/files/1993/1993-201267.pdf.
6. Знаменский, Л.Г. Применение алюмоборфосфатного концентрата в литье по выплавляемым моделям [текст] / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, С.С. Верцюх, А.С. Варламов // Литейное производство. – 2012. - №3. – С.29-32.
7. Емельянов, В.О. Технологические характеристики водных связующих для ЛВМ [текст] / В.О. Емельянов, К.В. Мартынов, А.К. Наумова, Е.С. Екимова // Литейное производство. – 2013. - №6. – С.23-25.
8. Емельянов, В.О. Водный раствор кремнезоля как альтернатива этилсиликату в ЛВМ [текст] // В.О. Емельянов, К.В. Мартынов, В.Н. Мутилов, А.В. Соколов, В.П. Суханова // Литейное производство. – 2013. - №3. – С.27-28.

9. Леушин, И.О. О спекании керамических оболочковых форм для литья по выплавляемым моделям [текст] / И.О. Леушин, В.А. Ульянов, Л.И. Леушина // Литейное производство. – 2014. - №1. – С.25-26.

10. Муркина, А.С. Исследование процессов сушки оболочковых форм [текст] / А.С. Муркина, О.Г. Оспенникова, В.Е. Хайченко // Литейное производство. – 2003. - №1. – С.14-16.

11. Селиванова, Е.А. Оптимизация прокаливания оболочковых форм для литья по выплавляемым моделям [текст] / Е.А. Селиванова, В.П. Чернов // Литейщик России. – 2010. - №1. – С.37-39.

12. Соболевский, В.М. Состав растворов, полученных при гидролизе ЭТС-32, ЭТС-40 и ЭТС-50 [текст] / В.М. Соболевский, С.И. Клещевникова, Г.А. Дубровская и др. // Литейное производство. – 1974. - №9. – С.27-29.

13. Гуляева, Т.Б. Этилсиликатные суспензии для керамических форм [текст] / Т.Б. Гуляева, М.А. Иоффе, В.Н. Максимков, Г.И. Вечерская // Литейное производство. – 1992. - №6. – С.18.

14. Фирсов, В.Г. Живучесть этилсиликатных связующих [текст] / В.Г. Фирсов, В.Ф. Гаранин, В.А. Озеров // В сб. Повышение качества и эффективности литья по выплавляемым моделям. М.:МДНТП. – 1989. – С.36-42.

15. Трандофилова, В.А. Физико-химические явления при изготовлении и применении огнеупорных покрытий [текст] / В.А. Трандофилова // В сб. Современная технология точного литья по выплавляемым моделям. М.: МАШГИЗ. – 1954. – С.44-53.

16. Лоханкин, А.В. Новое готовое связующее для точного литья [текст] / А.В. Лоханкин // Литейщик России. – 2012. - №5. – С.42-44.

17. Кулаков, Б.А. Пути снижения дефектности отливок из никелевых сплавов при ЛВМ [текст] / Б.А. Кулаков, В.К. Дубровин, А.Б. Кулаков // Литейное производство. – 1995. - №10. – С.24-25.

18. Королев, В.М. Технология крупногабаритного литья стали по выплавляемым моделям в формах на жидком стекле [текст] / В.М. Королев, В.М. Степанов // Материалы научно-технического совещания «Точное литье жаропрочных сплавов и сталей». М.: ОНТИ ВИАМ. – 1959. – С.92-98.

19. Березина, В.И. Опыт освоения жидкого стекла взамен этилсиликата в точном литье по выплавляемым моделям [текст] / В.И. Березина // Материалы научно-технического совещания «Точное литье жаропрочных сплавов и сталей». М.: ОНТИ ВИАМ. – 1959. – С.188-192.

20. Музафарова, Г.С. Применение жидкого стекла при литье по выплавляемым моделям [текст] / Г.С. Музафарова // Материалы научно-технического совещания «Точное литье жаропрочных сплавов и сталей». М.: ОНТИ ВИАМ. – 1959. – С. 193-196.

21. Савельев, Ю.Н. Применение связующего «Сиалит-20» в крупногабаритном литье по выплавляемым моделям [текст] / Ю.Н. Савельев, А.С. Грибанов, В.С. Кучеренко // Литейщик России. – 2006. - №5. – С.26-28.

22. Иванов, В.Н. Перспективы использования кремнезольного связующего [текст] / В.Н. Иванов, И.Н. Гагин // Литейное производство. – 2000. - №7. – С.42-43.

23. Никифоров, С.А. Отечественные кремнезоли для литейного производства [текст] / С.А. Никифоров, П.А. Никифоров, Ф.А. Закиров // Литейное производство. – 2001. - №1. – С.27-28.

24. Верцюх, С.С. Ресурсосберегающая технология формирования с применением алюмоборфосфатного концентрата в литье по выплавляемым моделям [текст] / С.С. Верцюх // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Челябинск. – 2014. – 20 с.

25. Знаменский, Л.Г. Применение алюмоборфосфатного концентрата в литье по выплавляемым моделям [текст] / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, С.С. Верцюх, А.С. Варламов // Литейное производство. – 2012. - №3. – С.29-32.

26. Ивочкина, О.В. Ресурсосберегающая технология формообразования в точном литье [текст] / О.В. Ивочкина, С.С. Верцюх, А.С. Варламов, Л.Г. Знаменский // Литейное производство. – 2012. - №5. – С.25-26.

27. Способ подготовки зернистых материалов для изготовления керамических форм и стержней [текст]: пат. №2404011 РФ: МПК B22C 1/00 / автор и заявитель Знаменский Л.Г. [и др.]; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет», опубл. 20.11.2010.

28. Способ приготовления бескремнеземного связующего для литья по выплавляемым моделям химически активных сплавов [текст]: пат. №2499650 РФ: МПК B22C 1/00 / автор и заявитель Знаменский Л.Г. [и др.]; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), опубл. 27.11.2013.

29. Способ подготовки зернистых материалов для изготовления форм и стержней в литье по выплавляемым моделям [текст]: пат. №2443499 РФ: МПК B22C 1/00 / автор и заявитель Знаменский Л.Г. [и др.]; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет», опубл. 27.02.2012.

30. Моисеев, В.С. Повышение качества литых лопаток ГТД [текст] / В.С. Моисеев, М.С. Варфоломеев, А.С. Муркина, Г.И. Щербакова // Литейщик России. – 2012. - №5. – С.36-38.

31. http:// www.remet.com/ru/range/производство-керамических-форм/специальное-связующее/ (дата обращения 5.09.2014).

32. Болдин, А.Н. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: Справочник [текст] / А.Н. Болдин, Н.И. Давыдов, С.С. Жуковский и др. М.: Машиностроение, 2006. – 507 с.

33. Рассказов, В.Д. Плавленый кварц в точном литье [текст] / В.Д. Рассказов, Н.М. Андреев // Литейное производство. – 1971. - №2. – С.39.

34. Матусевич, И.С. Плавленый кварц – термостабильный огнеупор для точного литья [текст] / И.С. Матусевич // В сб. Повышение качества и эффективности литья по выплавляемым моделям. М.:МДНТП. – 1989. – С.56-59.

35. Голанов, С.П. Керамические формы из плавленого кварца для литья крупногабаритных кольцевых заготовок [текст] / С.П. Голанов, Л.И. Ефимова // Литейщик России. – 2006. - №9. – С.36-37.

36. Голанов, С.П. Внедрение прогрессивных литых заготовок в газотурбинных двигателях наземного применения [текст] / С.П. Голанов // Литейщик России. – 2007. - №6. – С.11-13.

37. Савельев, Ю.Н. Опыт применения плавленого кварца при литье по выплавляемым моделям [текст] / Ю.Н. Савельев, А.С. Грибанов, В.С. Кучеренко // Литейщик России. – 2005. - №5. – С.31-33.

38. Санин, В.Н. Прочность керамических форм на основе связующего ЭТС-40 для литья по выплавляемым моделям [текст] / В.Н. Санин, Ю.Н. Савельев, В.С. Кучеренко, А.С. Грибанов // Литейщик России. – 2006. - №8. – С.25-27.

39. Лесников, А.К. Повышение эффективности производства в литье по выплавляемым моделям при использовании материала «Эко-сил-мелур» [текст] / А.К. Лесников, Ю.И. Фоломейкин // Литейщик России. – 2005. - №4. – С.43-45.

40. Грибанов, А.С. Опыт изготовления отливок высоконагруженных деталей сложной конфигурации методом направленного затвердевания [текст] / А.С. Грибанов, Ю.Н. Савельев, В.С. Кучеренко, В.Н. Сенин // Литейщик России. – 2006. - №3. – С.40-44.

41. Грибанов, А.С. Опыт использования плавленого кварца для изготовления огнеупорных оболочек в литье по выплавляемым моделям на Воронежском механическом заводе (ВМЗ) [текст] / А.С. Грибанов, Ю.Н. Савельев, В.С. Кучеренко // Литейщик России. – 2005. - №7. – С.29-31.

42. Горшков, В.С. Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений: Учеб. для вузов по спец. «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных тматериалов» [текст] / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, Н.Ф. Федоров. М.: Высшая школа. – 1988. – 400 с.

43. Каблов, Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) [текст] / Е.Н. Каблов. М.: МИСИС, 2001. – 632 с.

44. Чернов, Н.М. Технологические основы процессов изготовления тонкостенных стальных деталей транспорта [текст] / Н.М. Чернов, В.А. Аксенов. Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2001. – 156 с.

45. Способ изготовления отливок по выплавляемым моделям [текст]: пат. №2532750 РФ: МПК B22C9/04 / автор и заявитель Леушин И.О. [и др.]; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», опубл. 10.11.2014.

46. Обсыпочный материал для изготовления оболочковых форм по выплавляемым моделям [текст]: пат. №2532765 РФ: МПК B22C9/04 / автор и заявитель Леушин И.О. [и др.]; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высше-

го профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», опубл. 10.11.2014.

47. Способ изготовления многослойных оболочковых литейных форм по выплавляемым моделям [текст]: пат. №2532753 РФ: МПК B22C9/04 / автор и заявитель Леушин И.О. [и др.]; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», опубл. 10.11.2014.

48. Способ изготовления многослойных оболочковых литейных форм по выплавляемым моделям [текст]: пат. №2532764 РФ: МПК B22C9/04 / автор и заявитель Леушин И.О. [и др.]; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», опубл. 10.11.2014.

49. http:// www/mktechnology.ru/?eid=79 (дата обращения 6.09.2014)

50. Редькин, И.А. Разработка и исследование процесса сушки керамических оболочковых форм в условиях объемно-напряженного состояния [текст] / И.А. Редькин // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. – 2010. – 16 с.

51. Методы получения отливок повышенной точности под ред. А.С. Евсеева [текст] / М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. – 1958. – 144 с.

52. Гини, Э.Ч. Технология литейного производства: Специальные виды литья: Учебник для студ. высш. учеб. заведений [текст] / Э.Ч. Гини, А.М. Зарубин, В.А. Рыбин, под.ред. В.А. Рыбина . М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 352 с.

53. Захватов, Ю.К. Высокочастотный способ выплавления модельных составов [текст] / Ю.К. Захватов, А.Н. Подымов // Литейное производство. – 1983. - №7. – С.20-21.

54. Перевощиков, Э.П. Прокаливание керамических форм с заменой электрического нагрева на газовый [текст] / Э.П. Перевощиков, Н.Е. Баженова // Литейное производство. – 1980. - №6. – С.18-19.

55. Леушина, Л.И. О низкотемпературном прокаливании оболочковых форм [текст] / Л.И. Леушина, Р.Н. Палавин // Литейное производство. – 2012. – №12. – С.26-27.

56. Леушина, Л.И. Разработка технологий стального литья по выплавляемым моделям с применением низкотемпературного прокаливания оболочковых форм и использованием техногенных отходов [текст] / Л.И. Леушина // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Нижний Новгород. – 2014. – 19 с.

57. Singh, R. Investigations for Dimensional Accuracy of Investment Casting Process after Cycle Time Reduction by Advancements in Shell Moulding [текст]/ R.Singh, S.Singh, V. Mahajan // Procedia Materials Science. - 2014. - № 6. – p.p. 859 – 865.

58. Yahaya, B. Effects of activated charcoal on physical and mechanical properties of microwave dewaxed investment casting moulds [текст] /B. Yahaya, S. Izman, M.H. Idris, M.S. Dambatta // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. - 2016. - №13. – p.p. 97–103.

59. Способ изготовления керамических оболочковых форм для литья по выплавляемым моделям [текст]: пат. №2302311 РФ: МПК B22C9/04 / автор и заявитель Дубровин В.К. [и др.]; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет», опубл. 10.07.2007.

60. Усенко, Р.В. Научные и технологические основы изготовления керамических оболочковых форм с использованием импортозамещающего и техногенного сырья для литья по выплавляемым моделям [текст] / Р.В. Усенко // диссерт. На соиск. уч. степени канд. техн. наук. Днепропетровск. - 2015. – 122 с.

61. Оспенникова, О.Г. Модельные композиции на основе синтетических материалов для литья лопаток ГТД [текст] / О.Г. Оспенникова, А.Н. Шутов, Л.В. Пикулина, А.М. Душкин // Литейное производство. – 2003. - №1. С. 21-23.

62. Соколов, А.В. Особенности применения модельных составов на основе синтетических материалов при получении моделей лопаток газотурбинных двигателей при ЛВМ [Текст] / А.В. Соколов, К.В. Никитин //Литейное производство сегодня и завтра: труды международной научно-практической конференции. СПб.: Культ-информ-пресс, 2014, С.331-334.

63. Репях, С.И. Требования к модельным составам отливок ответственного назначения [текст] /С.И. Репях // Металл и литье Украины. – 2010. - №11. С. 10-16.

64. Tascioglu, S. A novel alternative to the additives in investment casting pattern wax compositions [текст] / S. Tascioglu, N.Akar. Materials & Design. - 2003. - № 24. P.p. 693–698.

65. Lee, K., Blackburn, S., Welch, Stewart T. Adhesion tension force between mould and pattern wax in investment castings [текст] / K. Lee, S. Blackburn, Stewart T. Welch // Journal of Materials Processing Technology. - 2015. - № 225. P.p. 369–374.

66. Lia, H. Crack prediction using nonlinear finite element analysis during pattern removal in investment casting process [текст] / H. Lia, K. Chandrashekharaa, S. Komaragirib, S.N. Lekakhb, V.L. Richards // Journal of Materials Processing Technology. - 2014. - № 214. – p.p. 1418–1426.

67. Никитин, В.И. Наследственность в литых сплавах [текст] / В.И. Никитин, К.В. Никитин. Изд.2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение – 1, 2005. – 476 с.
68. Дубровский, С.А. Гипотеза кластерной природы наследственности шихтовых материалов в металлургии черных сплавов [текст] / С.А. Дубровский, А.А. Шипельников, А.Н. Роготовский // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2008. - №1. – С. 89-96.
69. Баум, Б.А. О связи свойств сталей и сплавов в твердом и жидком состояниях [текст] / Б.А. Баум, Г.В. Тягунов //Изв. АН СССР. Металлы. - 1969. - №1. - С. 229-223.
70. Баум, Б.А. Металлические жидкости – проблемы и гипотезы [текст] / Б.А. Баум. - М.: Наука, - 1979. - 120 с.
71. Баум, Б.А. Жидкая сталь: монография [текст] / Б.А. Баум, Г.А. Хасин, Г.В. Тягунов и др. - М.: Металлургия, 1984. - 208 с.
72. Гельд, П.В. Связь свойств металлов в жидком и твердом состоянии [текст] / П.В. Гельд, Б.А. Баум, Г.В. Тягунов и др. // Свойства расплавленных металлов. - М.: Наука, 1974. - С. 7-10.
73. Замятин, В.М. К вопросу о металлургической наследственности и формировании свойств металлопродукции [Электронный ресурс] / В.М. Замятин, Б.А. Баум // Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства. Труды 3-й всеросс. научно-практ. конф. Самара: СамГТУ. 2010. – 1 электрон. опт диск (CD-ROM).
74. Третьякова, Е.Е. Влияние исходной структуры чугунов на поверхностное натяжение расплавов/ [текст] / Е.Е. Третьякова, М.В. Ровбо, О.П. Хакимов, В.С. Чуркин, // Литейное производство. - 1991. - №4. - С.11-12.
75. Крестьянов, В.И.Основные проблемы получения высококачественных чугунов для машиностроения [текст] / В.И. Крестьянов // Литейное производство. - 1997. - №5. - С.9-11.
76. Крестьянов, В.И. Роль наследственных факторов при получении ЧШГ с высокими свойствам в литом состоянии [текст] / В.И. Крестья-

нов // Генная инженерия в сплавах: Тез. докл. VI-й Междунар. науч.-практ. конф. - Самара: СамГТУ. - 1998. - С. 47-48.

77. Крестьянов, В.И. Структурная наследственность при получении отливок из ЧШГ [текст] / В.И. Крестьянов // Литейное производство. - 1999. - №1. - С. 18-20.

78. Аникеев, В.В. Изменение наследственных свойств стали при полунепрерывном литье [текст] / В.В. Аникеев // Труды 5-го съезда литейщиков России. М.: Радуница. – 2001. С. 185-186.

79. Аникеев, В.В. Явление структурной наследственности специальных сталей в системе «электрод-слиток-прокат» [текст] / В.В. Аникеев // Генезис, теория и технология литых материалов: матер. 1-й междунар. науч.-техн. конф. Владимир: ВГУ. – 2002. – С. 92-96.

80. Аникеев, В.В. Наследственное влияние шихтовых материалов на структуру и свойства отливок из низколегированной стали [текст] / В.В. Аникеев, В.М. Гришин, О.В. Баракина, Л.Н. Елаева // Литейное производство. – 2002. - №10. – С. 22-23.

81. Шуб, Л.Г. Влияние состава металлошихты на качество стали 25Л [текст] / Л.Г. Шуб, Р.Г. Усманов, В.В. Макаров, О.П. Лялин // Литейное производство. – 2004. - № 6. С. 6-7.

82. Кондратюк, С.Е. Наследственность структуры и свойств стали [текст] / С.Е. Кондратюк // Литейное производство. – 2008. - №9. – С. 6-10.

83. Голубцов, В.А. О внепечной обработке стали в литейном производстве [текст] / В.А. Голубцов, И.В. Рябчиков // Металлургия машиностроения. – 2015. - №2. – С. 6-10.

84. Кондратюк, С.Е. Наследственное модифицирование литых сталей [текст] / С.Е. Кондратюк, Е.Н. Стоянов, В.М. Щеглов, И.Н. Примак, Ж.В. Пархомчук // Литейное производство. – 2013. - №6. – С. 8-10.

85. Колокольцев, В.М. Применение высокотемпературной обработки расплава (ВТОР) для улучшения структуры и свойств литейной инст-

рументальной стали [текст] / В.М. Колокольцев, С. В. Березова, П.В. Кощеев // Прогрессивные литейные технологии: Труды 7-й междунар. науч.-практ. конф. М.: Лаборатория рекламы и печати. – 2013. – С. 239-243.

86. Миненко, Г.Н. Влияние обработки электрическим полем на процессы модифицирования Fe-C-сплавов [текст] / Г.Н. Миненко // Литейщик России. – 2014. - №8. – С. 21-23.

87. Турищев, В.В. LVMFlow CV – точный и самый быстрый инструмент технолога-литейщика [текст] / В.В. Турищев // Литейщик России. – 2010. – № 5. – С. 14 – 16.

88. Илларионов, И.Е. Применение автоматизированной системы моделирования литейных процессов при проектировании литниково-питающих систем [текст] / И.Е. Илларионов , А.В. Мотков , С.В. Иванов , Е.С.Соколов , Ю.Ю. Агатеев // Литейщик России. – 2016. – № 3. – С. 21 – 25.

89. Дьячков, В.Н. Исследование технологических свойств модельных составов для литья по выплавляемым моделям [текст] // В.Н. Дьячков, А.В., Соколов, К.В. Никитин, А.Ю. Баринов, Е.А. Шабалова // Литейщик России. – 2015. - №10. - С. 25-27.

90. Соколов, А.В. Исследование влияния состава керамических оболочек на их свойства при литье по выплавляемым моделям [Текст] / А.В. Соколов, В.Н. Дьячков, К.В. Никитин // Материалы международной науч.-практ. конф. «Современное состояние и перспективы развития литейного производства». М: 2015 г. - С. 333-340.

91. Дьячков, В.Н. Влияние состава керамических оболочек на их свойства при литье по выплавляемым моделям [текст] / В.Н. Дьячков, А.В. Соколов, К.В. Никитин, А.Ю. Баринов // Труды 12 съезда литейщиков России. Н. Новгород. - 2015. – С. 420-426.

92. Танкелевич, Б.Ш. Факторы заполняемости оболочковых форм из плавленого кварца [текст] / Б.Ш. Танкелевич, А.А. Демидова, А.В. Абадаев // Литейное производство. – 1979. - №4. – С.17-18.

93. Кингери, У. Д. Введение в керамику [текст] / У. Д. Кингери – М.: Стройиздат, 1969. – 456 с.

94. Репях, С.И. Усовершенствование технологии производства крупногабаритных тонкостенных отливок специального назначения, изготавливаемых по выплавляемым моделям: дис. … канд. техн. наук: 05.16.04 [текст] / Репях Сергей Иванович. – Днепропетровск: 2007. – 151 с.

95. Никитин, К.В. Инновации в литье по выплавляемым моделям [текст] / К.В. Никитин, А.В. Соколов, В.И. Никитин, В.Н. Дьячков. Самара: СамНЦ РАН. 2017. – 144 с.

96. Дьячков, В.Н. Технология подготовки керамических форм к заливке при литье по выплавляемым моделям [текст] /В.Н. Дьячков, К.В. Никитин, А.Ю. Баринов // Литейщик России. – 2015. - №10. - С. 27-30.

97. Дьячков, В.Н. Совершенствование технологии изготовления огнеупорных оболочковых форм при ЛВМ с целью предотвращения их растрескивания [текст] / В.Н. Дьячков, К.В. Никитин, А.Ю. Баринов // Современное состояние и перспективы развития литейного производства: Материалы междунар. науч.-практ. конф. М.: Университет машиностроения. – 2015. - С. 149-153.

98. Пат. № 2509622 РФ Российская федерация, МПК B22C9/04. Способ изготовления оболочковой огнеупорной формы [текст] / Дьячков В.Н., Парамонов А.М.; заявитель и патентообладатель Дьячков В.Н.. - заявл. 18.10.12; опубл. 20.03.14.

99. Дьячков, В.Н. Комплексный подход для повышения качества отливок из стали 40ХЛ, получаемых способом ЛВМ [текст] / В.Н. Дьячков, К.В. Никитин // Литейное производство сегодня и завтра:

Труды междунар. науч.-техн. конф. СПб: Культ-информ-пресс. 2014. С. 324-330.

100. Дьячков, В.Н. Исследование влияния технологических факторов на качество отливок из стали 40ХЛ, получаемых способом ЛВМ [текст] / В.Н. Дьячков, А.М., Парамонов, К.В. Никитин // Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства: Материалы 6-го регионального науч.-техн. совещания. Самара: СамГТУ. – 2014. С. 153-157.

101. Герасимов, Л.П. Изломы конструкционных сталей: справочник [текст]/ Л.П. Герасимов, А. А. Ежов, М. И. Маресев. – М.: Металлургия, 1987. – 272 с.

102. Дьячков, В.Н. Совершенствование технологии получения стальных отливок ответственного назначения литьем по выплавляемым моделям с целью повышения их качества [текст] /В.Н. Дьячков, А.М. Парамонов, К.В. Никитин, Г.С. Нуждин // Литейщик России. – 2013. - №10. – С. 36-38.

103. Wohlers, T. History of additive manufacturing [текст] / T. Wohlers, T. Gornet Wohlers Report 2014: WOHLERS ASSOCIATES, INC., 2014. – 34 с.

104. Khurram, Altaf. Application of additive manufacturing / 3D printing technologies and investment casting for prototype development of polycrystalline diamond compact (PDC) drill bit body [текст] / Khurram Altaf, Ahmad Majdi Abdul Rani, Dereje E. Woldemichael, Tamiru A. Lemma, Chou Zhi // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. - Vol. 11. - № 10. - Pp. 6514-6518.

105. Баринов, А.Ю. Применение быстрого прототипирования для получения единичных и мелкосерийных отливок литьем по выплавляемым моделям [текст] / А.Ю. Баринов, В.Н. Дьячков, К.В. Никитин // Материалы III-ей Всеросс. науч.-практ. конф. «Проектирование и пер-

спективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение». Чебоксары: ЧГУ. – 2017. – С. 123-127.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2509622

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБОЛОЧКОВОЙ ОГНЕУПОРНОЙ ФОРМЫ

Патентообладатель(ли): *Дьячков Виктор Николаевич (RU)*

Автор(ы): *Дьячков Виктор Николаевич (RU), Парамонов Анатолий Михайлович (RU)*

Заявка № 2012144472

Приоритет изобретения 18 октября 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации *20 марта 2014 г.*

Срок действия патента истекает 18 октября 2032 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

САМАРСКИЙ ПОЛИТЕХ
Опорный университет

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Самарский государственный технический университет
(ФГБОУ ВО СамГТУ)

УТВЕРЖДАЮ:
Первый проректор-проректор по НР
ФГБОУ ВО СамГТУ
_____ Ненашев М.В.
«__» _____ 2017 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ТИ-ЛВТ-06

Изготовление оболочковых форм для ЛВМ с применением огнеупорного материала «Плавленый кварц» и связующего «Сиалит 20С».

Разработали:
Директор ЦЛТ, д.т.н., профессор _____ Никитин В.И.
Зам. директора ЦЛТ, доцент _____ Дьячков В.Н.

19.12.17

Самара 2017

ПРИЛОЖЕНИЕ В

огласовано:
ехнический директор
ОО ПКФ «Вершина»
.М. Парамонов

29» мая 2014г.

Утверждаю:
директор
ООО ПКФ «Вершина»
С.В. Климов

«29» мая 2014г.

Акт внедрения

в производство способа изготовления огнеупорных оболочковых форм (патент на изобретение № 2509622 «СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБОЛОЧКОВОЙ ОГНЕУПОРНОЙ ФОРМЫ»).

Комиссия, в составе нижеподписавшихся представителей от ООО ПКФ «Вершина», и патентообладателя Дьячкова В.Н., на основании положительных результатов проведенных опытно-экспериментальных работ, решила:
Произвести внедрение в производственный процесс изготовления огнеупорных оболочковых форм на ООО ПКФ «Вершина» г. Самара способ, изложенныйнный в описании изобретения № 2509622 «СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБОЛОЧКОВОЙ ОГНЕУПОРНОЙ ФОРМЫ». В связи с этим, внести соответствующие изменения в технологические инструкции предприятия.

Председатель комиссии:

Начальник производства ООО ПКФ «Вершина» Ткаченко С.В. _____

Члены комиссии:

Гл. металлург ООО ПКФ «Вершина» Дьячков В.Н. _____

Начальник КТО ООО ПКФ «Вершина» Борисов С.В. _____

Начальник БТК ООО ПКФ «Вершина» Максимов Ю.П. _____

Патентообладатель Дьячков В.Н. _____

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

УТВЕРЖДАЮ
Главный металлург
ОАО «Гидроавтоматика»
_____ Г.С.Нуждин

АКТ
входного контроля качества опытной партии отливок корпус из стали 35ХГСЛ

составлен «20» сентября 2013 г.

Комиссия в составе зам. главного металлурга Гордеева Г.А. и инженера-технолога I категории Журавлевой Л.В. в присутствии представителя поставщика главного металлурга ООО ПКФ «Вершина» Дьячкова В.Н. выполнила оценку качества опытной партии отливок корпус из стали 35ХГСЛ, полученных литьем по выплавляемым моделям на ООО ПКФ «Вершина».

На основании оценки сделано следующее заключение:

1. Выборочный контроль отливок на макродефекты показал отсутствие дефекта типа «камневидный излом».
2. Испытания по механическим свойствам показали гарантированный запас по относительному удлинению, относительному сужению и ударной вязкости по сравнению с требованиями ОСТ 1 90093-82.

На основании заключения принято решение о запуске партии отливок в производственный процесс ОАО «Гидроавтоматика».

От Организации-поставщика

Гл. металлург
ООО ПКФ «Вершина»

_____ Дьячков В.Н.

От ОАО Гидроавтоматика

Зам. гл. металлурга
_____ Гордеев Г.А.

Инженер-технолог 1 кат.
_____ Журавлева Л.В.