

На правах рукописи



ДЬЯЧКОВ Виктор Николаевич

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

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара)

Научный руководитель: доктор технических наук, **Никитин Константин Владимирович**

Официальные оппоненты:

Илларионов Илья Егорович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», кафедра «Материаловедение и металлургические процессы», профессор

Оборин Лев Александрович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», НИИ «Ракетно-космическая техника и технологии», директор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

Защита состоится 22 июня 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гильманшина Татьяна Ренатовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 ужесточающиеся требования по геометрической точности и надежности в эксплуатации. Наряду с повышающейся конкуренцией в производстве фасонного литья, важное значение приобретает себестоимость литейной продукции.

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 плавленного 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 машиностроительного 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 плавленного 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 плавленного кварца.
4. Разработать технологический процесс изготовления отливок ответственного назначения, получаемых литьем по выплавляемым моделям в огнеупорные керамические формы из плавленного кварца.
5. Оценить эффективность замены кристаллического кварца на плавленный 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 плавленного 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 P – 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: $\sigma_{BH} \leq \sigma_e$, где σ_e – 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; T - температура системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» перед выплавлением, °С.

5. Установлена закономерность взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» при использовании плавленного кварца в качестве огнеупорного наполнителя. На основании данной закономерности предложена физическая модель, объясняющая снижение давления модельного состава на огнеупорную керамическую форму из плавленного 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: $\Delta T = (T_{\phi 1} - T_{\phi 2}) \sim +(10 \div 15) ^\circ\text{C}$, где ΔT – требуемая величина охлаждения относительно текущей температуры системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» (°С); $T_{\phi 1}$ и $T_{\phi 2}$ – текущая и требуемая температуры ОКФ (°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) способствовало повышению эффективности производства отливок ответственного назначения из сталей марок 40ХЛ («Вал») и 35ХГСЛ («Корпус») по следующим показателям: устранение брака

огнеупорных керамических форм из плавленного кварца по растрескиванию при выплавлении модельного состава; сокращение расхода электроэнергии на операцию прокаливания в 6 раз; увеличение производительности операции прокаливания 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 плавленного 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 ли-

нейной 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 «STAT-GRAPHICS».

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 полученных 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 изобретение, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Состояние вопроса. Постановка целей и задач исследования. Приведен обзор литературных данных по современному состоянию и основным проблемам, существующим в литье по выплавляемым моделям (ЛВМ). Показаны основные преимущества (высокий коэффициент использования металла и размерная точность, чистота поверхности литых изделий) и недостатки (многооперационность, высокая себестоимость) способа ЛВМ.

Выполнен анализ современного состояния технологий получения огнеупорных керамических форм и совершенствования модельных составов.

Большой вклад в научные исследования и повышение эффективности процесса ЛВМ внесли работы В.Н. Иванова, Я.И. Шкленника, В.А. Озерова, С.И. Репяха, Л.Г. Знаменского, И.О. Леушина, В.К. Дубровина и др.

Показано, что управление качеством стальных отливок, получаемых ЛВМ, может эффективно осуществляться за счет использования явления структурной наследственности в сплавах (В.И. Никитин, К.В. Никитин). Существенный вклад в развитие явления наследственности для сплавов системы Fe-C внесли работы Б.А. Баума, В.И. Крестьянова, В.В. Анিকেева и др.

На основании анализа научной литературы сделаны выводы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Глава 2 Методика исследования. Для решения поставленных задач и достижения целей работы, исследования проводили по разработанной схеме, обеспечивающей разработку технологических решений на основных этапах литья по выплавляемым моделям. Объектами исследования являлись модельные составы различных видов и производителей: ненаполненные (Romocast 105 и Romocast 152 – Германия; МВС-3Т и ПС 50-50 - Россия) и наполненные (Romocast 252 и Romocast 325 – Германия). Образцы из модельных составов для определения свободной линейной усадки получали в пресс-форме конструкции ВНИИТМАШ. Исследовали влияние времени и температуры окружающей среды на изменение линейных размеров образцов.

Огнеупорные керамические формы (ОКФ) получали с использованием кристаллического и плавного кварца. В качестве связующего использовали «Сиалит-20С». Исследовали следующие основные свойства ОКФ: прочность на разрыв и изгиб, газопроницаемость, коэффициент теплового линейного расширения.

В работах, проводимых в Центре литейных технологий СамГТУ, использовали следующее основное оборудование. Формирование слоев на модельных блоках осуществляли с помощью пескосыпа псевдокипящего слоя или ручной обсыпкой. Выплавление модельных составов из ОКФ проводили в паровом котле модели КПЭМ 100/9, прокалку готовых ОКФ осуществляли в прокалочной печи ПС 51.41.52. Приготовление сплавов производили в индукционной плавильной печи модели ППИ-0,03 с набивной периклазово-шпинельной футеровкой.

Эксперименты в промышленных условиях выполняли на штатном оборудовании.

Отливки получали из сталей марок 40ХЛ и 35ХГСЛ.

Химический состав сплавов определяли спектральным методом (спектроанализатор ARL 3460). В процессе механических испытаний определяли: предел прочности при растяжении, относительное удлинение и сужение, а также ударную вязкость.

Для моделирования гидродинамических и кристаллизационных процессов использовали лицензионную систему автоматизированного моделирования литейных

процессов LVM Flow (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».

Глава 3 Исследование взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма». Исследована свободная модельная усадка модельных составов при постоянной температуре $(+20\pm 2)^\circ\text{C}$. Замеры длин образцов производили через 1 и 24 часа после их затвердевания и извлечения из пресс-формы. Установлено, что наибольшей свободной линейной усадкой обладал модельный состав марки МВС 3-Т (рис. 1). Минимальную линейную усадку имеют модельные составы марок Romocast 252 и 325, относящиеся к наполненным модельным составам. При этом, усадочные процессы протекают в образцах до 24 ч, что связано с длительностью процессов полимеризации и низкой теплопроводностью модельных составов. Полученные результаты согласуются с исследованиями, представленных в работах В.Н. Иванова и С.И. Репяха.

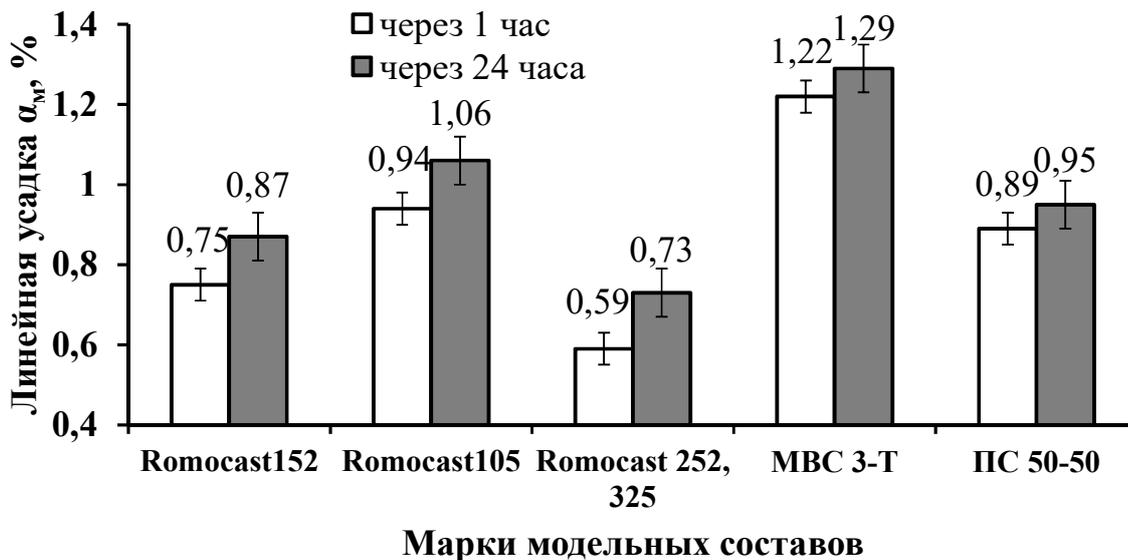


Рисунок 1 - Влияние времени выдержки модельных составов после затвердевания на свободную линейную усадку образцов

При изменении температуры окружающей среды в интервале от $(-5)^\circ\text{C}$ до $(+35)^\circ\text{C}$ наибольшее изменение линейных размеров образцов было характерно для ненаполненных модельных составов марок Romocast 105, Romocast 152, ПС 50-50 и МВС 3-Т. В диапазоне температур $(-5)\div(+5)^\circ\text{C}$ уменьшение длины образцов ΔL

вследствие усадки составляло $(-0,31) \div (-0,27)\%$. Увеличение длин образцов при температуре $(+35) ^\circ\text{C}$ вследствие теплового расширения составило до $0,4\%$. Интервал изменения длины ΔL образцов для наполненных модельных составов Romocast 252 и Romocast 325 в исследованном диапазоне температур составил $(-0,19) \div (+0,15)\%$. 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 $(-5) ^\circ\text{C}$ и нагревали до $(+35) ^\circ\text{C}$ относительно температуры $(+20) ^\circ\text{C}$, выдерживая при указанных температурах в течение 24 ч. Далее образцы снова приводили к исходной температуре $(+20) ^\circ\text{C}$, выдерживали в течение 24 ч и производили замеры их длин. 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 $(+20) ^\circ\text{C}$. Наибольшими отклонениями размеров от исходного состояния характеризовались образцы из ненаполненных модельных составов. На основании полученных результатов сделан обоснованный вывод о том, что указанные особенности необходимо учитывать при проектировании пресс-форм для получения моделей отливок, а также при длительном хранении готовых модельных блоков с соблюдением стабильных температурных режимов помещения. Для зарубежных составов результаты по измерению свободной линейной усадки в различных температурно-временных условиях получены впервые.

Исследование свойств огнеупорных керамических форм (ОКФ), полученных с использованием кристаллического и плавленного кварца в качестве огнеупорных материалов показало, что наибольшей прочностью при изгибе, лучшей газопроницаемостью и наименьшим коэффициентом теплового линейного расширения (в интервале $100 \div 350 ^\circ\text{C}$) характеризуются ОКФ, полученные из плавленного кварца (табл. 1).

Таблица 1 – Свойства огнеупорных керамических форм

Вид огнеупорного материала	Предел прочности, МПа	Газопроницаемость, ед.	КТЛР, $1/^\circ\text{C} \times 10^{-6}$ (при 350°C)
Кристаллический кварц	0,51	160	7,9
Плавленный кварц	6,01	325	0,8

Для оценки термоустойчивости ОКФ в ряде работ предложено использовать формулу У.Д. Кингери:

$$\sigma_{\text{ВН}} = \frac{k_{\text{КО}} \times E (T_1 - T_2)}{1 - \mu}, \quad (1)$$

где $\sigma_{вн}$ – величина внутренних напряжений в стенке ОКФ, МПа; $k_{кО}$ – коэффициент теплового линейного расширения, $1/^\circ\text{C} \times 10^{-6}$; E – модуль упругости материала ОКФ, МПа; T_1 и T_2 – температуры на внешней и внутренней стенках ОКФ, соответственно, $^\circ\text{C}$; μ – коэффициент Пуассона материала ОКФ. Анализ данной формулы показывает, что наименьшей склонностью к растрескиванию при прокатке будут характеризоваться тонкостенные ОКФ, изготовленные из материалов с низкими значениями КТЛР. Анализ результатов по испытанию свойств показывает, что наименьшей склонностью к трещинообразованию должны обладать ОКФ, изготовленные с применением плавленого кварца. Однако, выплавление модельных составов, как правило, производится в диапазоне температур $95 \div 200^\circ\text{C}$, при которых ОКФ из плавленого кварца не будет менять своих размеров. При нагреве ОКФ и модельного блока для выплавления, модельный состав начинает расширяться и оказывать давление на стенки формы. Данный фактор может служить причиной растрескивания форм. Особенно критичным это становится в местах перехода сечений от тонких к толстым.

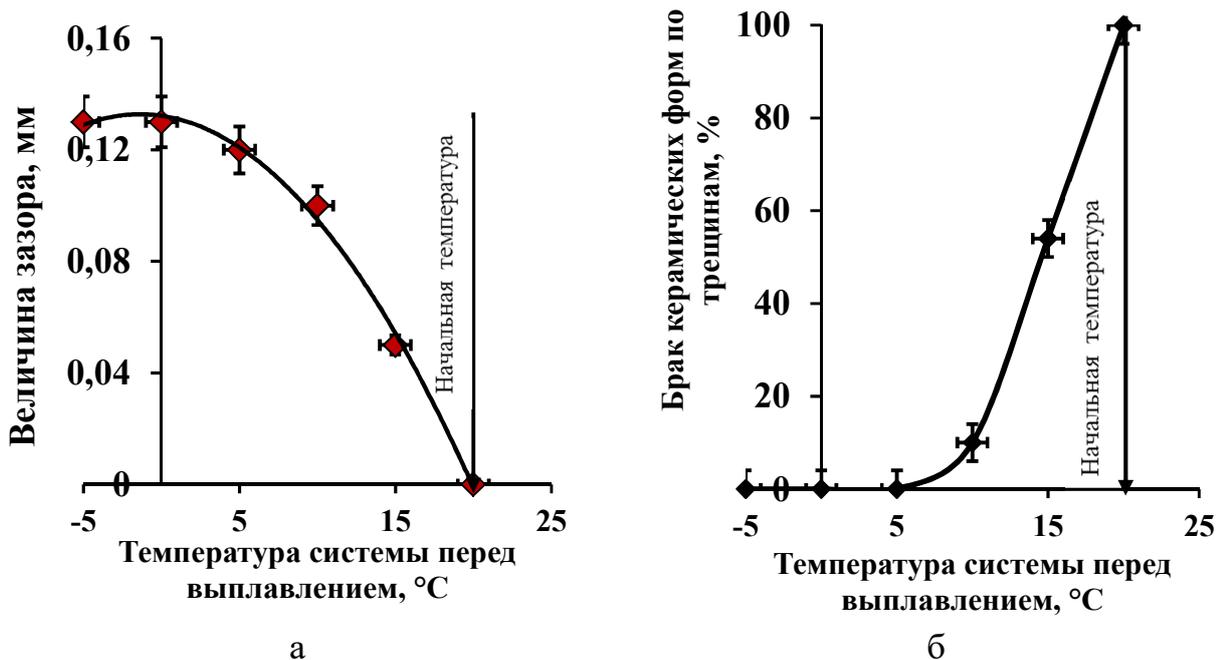
Во избежание этого на практике, как правило, увеличивают количество слоев (толщину стенки керамической оболочки). Дополнительным технологическим приемом, предотвращающим растрескивание ОКФ при выплавлении модельных составов, является проведение операции выплавления в среде перегретого пара при избыточном давлении, что обеспечивается использованием специального оборудования – бойлерклава. Существенными недостатками указанного способа является высокая стоимость оборудования, дополнительный расход электроэнергии для выработки пара с необходимым давлением и температурой ($P=0,8\text{МПа}$, $T=170^\circ\text{C}$), а также необходимость регенерации модельных составов для повторного использования из-за их насыщения влагой. Данные факторы снижают производительность, повышают энергоемкость и, как следствие, себестоимость процесса ЛВМ.

Исследовали влияние температуры системы «выплавляемая модель-огнеупорная керамическая форма» непосредственно перед операцией выплавления модельного состава. Модели получали из модельного состава ПС 50-50. Огнеупорные керамические оболочки изготавливали по принятой методике. Температуру системы «выплавляемая модель-огнеупорная керамическая форма» варьировали в диапазоне $(-5) \div (+20)^\circ\text{C}$. Охлаждение системы осуществляли в морозильной камере, нагрев – в сушильном шкафу. Оценивали величину зазора между модельным блоком и количество треснувших ОКФ при выплавлении модельных составов в воде при

температуре (+95) °С. Установлено, что при охлаждении системы до температур в интервале (-5)÷(+5) °С в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» обеспечивается зазор между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ величиной 0,10÷0,15 мм (рис. 2, а). Указанный зазор гарантированно обеспечивает целостность ОКФ до 100% при выплавлении модельного состава (рис. 3, б). При выплавлении модельных составов из ОКФ, не подвергнутых предварительному охлаждению (температура системы (+15)÷(+20) °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:

$$\Delta h = -0,0003T^3 - 0,0008T + 0,1322, \quad (2)$$

где Δh – зазор между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ, мм; T - температура системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» перед выплавлением, °С.



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

Рисунок 3 – Закономерность взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма»

В зависимости от температуры установлены следующие закономерности взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» в процессе выплавления модельного состава из ОКФ на основе плавленного кварца: при температуре системы перед выплавлением в интервале (+15)÷(+25) °С расширя-

ющийся модельный состав оказывает давление на стенки ОКФ; при температуре системы перед выплавлением в интервале $(-5) \div (+10)$ °С формируется зазор величиной $0,10 \div 0,15$ мм между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ. Для описания процессов, протекающих в системе при выплавлении модельного состава из ОКФ, можно применить модифицированную формулу (1) в следующем виде:

$$\sigma_{\text{ВН}} = \frac{k_{\text{КО}} \times E(T_1 - T_2)}{1 - \mu} + P, \quad (3)$$

где P – 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 P в выражении 3. Растрескивание ОКФ при выплавлении модельного состава не будет происходить при соблюдении следующего условия: $\sigma_{\text{ВН}} < \sigma_{\text{в}}$, (4)

где $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности ОКФ при растяжении.

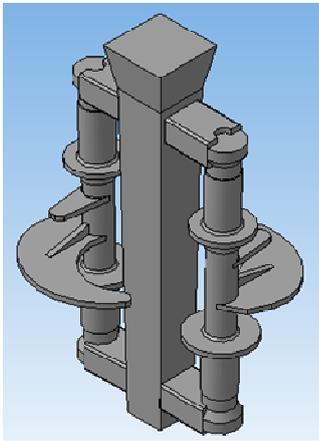
С целью предотвращения растрескивания ОКФ на основе плавленного кварца на практике перед операцией выплавления модельного состава необходимо обеспечивать следующий температурный режим: $\Delta T = (T_{\text{ф1}} - T_{\text{ф2}}) \sim +(10 \div 15)$, (5)

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

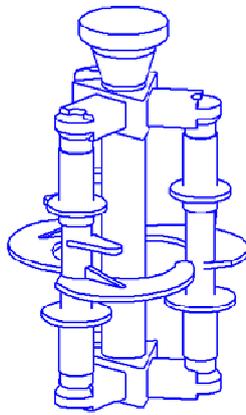
По результатам проведенных исследований получен патент на изобретение (патент РФ № 2509622) и разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-06 «Изготовление оболочковых форм для ЛВМ с применением огнеупорного материала «Плавленный кварц» и связующего «Сиалит 20С»».

Глава 4. Разработка комплекса технологических решений с целью повышения качества стальных отливок способом ЛВМ. Выполнен анализ технологии получения отливки «Вал» из стали марки 40ХЛ. Данные отливки предназначены для изготовления деталей, работающих в специальных электрошкафах в качестве эксцентриков для включения электроподстанций и в процессе эксплуатации подвергающихся циклическим знакопеременным нагрузкам. Таким образом, детали должны характеризоваться высокой износостойкостью, прочностью и ударной вязкостью. На одном модельном блоке располагалось две модели отливки. Данный тип литниково-питающей системы можно охарактеризовать как тип I с центральным стояком, который является одновременно литниковым ходом и коллективной прибылью. 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,



а



б

а- действующая конструкция;
б – усовершенствованная конструкция
Рисунок 4 – Модельные блоки для получения отливки «Вал»

доступностью исходных материалов и простотой приготовления. Готовые модели и модельные блоки по существующему технологическому процессу 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 $10 \div 12$ °C (в зимнее время) до $28 \div 30$ °C (в летнее время). По действующей технологии ОКФ получали с использованием кристаллического кварца. Выплавление модельного состава производили в горячей воде при температуре $90 - 95$ °C

в течение 15 минут. Наиболее типичными дефектами отливок «Вал» по серийной технологии являлись пористость, раковины и горячие трещины. Суммарный брак по указанным дефектам составлял 16%. Выход годных отливок не превышал 40%. Моделирование с использованием САМ ЛП LVMFlow по серийной технологии показало совпадение очагов поражения реальных и виртуальных отливок. На основании полученных данных был сделан вывод об адекватности построенной модели. В связи с существующими проблемами при серийном производстве отливок «Вал» на первом этапе изменили конфигурацию литниковой системы и заменили материал ОКФ на плавленный кварц для обеспечения следующих требований: соблюдение принципа направленного затвердевания; подвод тонкостенной части детали к тепловому узлу для более равномерного охлаждения отливки. Это дополнительно позволило увеличить количество моделей отливок с 2 до 3 на одном модельном блоке (рис. 4). По результатам моделирования в отливках с усовершенствованной конструкцией литниково-питающей системы дефекты отсутствовали. На основании результатов моделирования разработаны и изготовлены конструкции пресс-форм для изготовления элементов ЛПС по предложенному варианту. Эффективность предложенного варианта в дальнейшем проверяли в опытно-промышленных условиях.

Исследовали влияние состава шихты и огнеупорного материала ОКФ на механические свойства стали 40ХЛ. Установлено, что для всех вариантов шихты повышенными прочностными свойствами характеризовались отливки, полученные в ОКФ на основе плавленного кварца. Это обусловлено тем, что заливка без опорного наполнителя способствует повышенному теплоотводу через стенку формы. 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. При этом, гарантированный запас свойств над требованиями ГОСТ 977-88 обеспечивает состав шихты с использованием до 100% возврата (ВСП). Предел прочности повышается на 15-23%, а ударная вязкость до 84% по сравнению с регламентируемыми уровнями указанных свойств. Следовательно, структура возврата оказывает устойчивое наследственное влияние на свойства стали 40ХЛ.

Глава 5. Опытнo-промышленная апробация результатов исследования. Опытнo-промышленные испытания разработанных технологических решений с целью повышения качества отливок «Вал» из стали 40ХЛ литьем по выплавляемым моделям в огнеупорные керамические формы на основе плавленного кварца проводили в производственных условиях ООО ПКФ «Вершина». Модельные блоки по усовершенствованной конструкции получали из модельного состава ПС 50-50. Хранение готовых модельных блоков осуществлялось в помещении с контролируемой температурой в интервале $18 \div 25^{\circ}\text{C}$. Для изготовления ОКФ использовали плавленный кварц торговой марки «Кефрон». Для приготовления суспензии использовали готовое связующее марки ГС-20П-А. Подготовленные к выплавлению модели формы охлаждали на $10-15^{\circ}\text{C}$ относительно температуры окружающей их среды. Охлаждение осуществляли в ванне с проточной водой из артезианской скважины. Выплавление модельного состава из ОКФ производили в водяных ваннах при температуре воды $80-95^{\circ}\text{C}$ в течение 15 мин. После выплавления модельного состава опытные ОКФ в количестве 100 шт. были подвергнуты контролю на целостность. По результатам контроля все ОКФ были признаны годными к дальнейшим операциям подготовки к литью. Сталь 40ХЛ готовили с использованием 100% ВСП в печи ИСТ-0,16/0,32. Заливку прокаленных ОКФ осуществляли на плацу без опорного наполнителя с помощью ручного чайникового ковша. Температура ОКФ при заливке составляла $30-60^{\circ}\text{C}$. Температура стали в процессе литья составляла $1580 \div 1600^{\circ}\text{C}$. В процессе заливки разрушения опытных форм отсутствовало. После заливки форму охлаждали естественным путем на воздухе в течение 5ч. Далее был произведен контроль качества опытных отливок на наличие дефектов усадочного характера. В процессе кон-

троля дефектов усадочного происхождения выявлено не было. Опытная партия отливок «Вал» была отправлена заказчику. По результатам входного контроля все отливки были признаны годными. Анализ эффективности усовершенствованной литниково-питающей системы показал, что снизились расходы заливаемого металла на одну отливку (табл. 2). Данные показатели свидетельствуют о повышении эффективности используемого расплава и площадей литейной формы.

Таблица 2 - 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
Коэффициент выхода отливок	0,75	1	+0,25
Коэффициент использования залитого в форму расплава	0,24	0,4	+0,16
Расход металла, залитого в форму, на деталь $M_{зал.д.}$, кг/деталь	5,41	3,25	-2,16
Коэффициент использования площадей формы	81,94	154	+72,06

В целом, при внедрении разработанной технологии были достигнуты следующие показатели: снижение брака ОКФ по растрескиванию в 5,5 раза; сокращение времени прокали ОКФ после выплавления модельного состава в 4 раза; повышение производительности прокалочных печей в 6 раз; устранение операции нагрева ОКФ под заливку. Достижение вышеперечисленных показателей при получении отливки «Вал» из стали 40ХЛ обеспечили снижение стоимости одной огнеупорной керамической формы на основе плавленного кварца на 7% по сравнению с ОКФ на основе кристаллического кварца.

Отливка «Корпус» из стали 35ХГСЛ (ОСТ 1 90093-82) является отливкой ответственного назначения, используемой для изготовления крепежных деталей в аэрокосмической технике. Внедрение разработанных технологических решений для получения указанной отливки обеспечило: сокращение времени прокали ОКФ в 4 раза, существенное снижение температуры нагрева форм перед заливкой и устранение операции их формовки в опорный наполнитель. Внедрение технологии изготовления огнеупорных керамических форм с применением плавленного кварца и вышпе-

речисленные корректировки технологического процесса способствовало устранению дефекта типа «камневидный излом» в макроструктуре стальных отливок «Корпус» и сокращение уровня брака по трещинам, рыхлоте и пористости, выявляемых при визуальном контроле, по сравнению с ОКФ на основе кристаллического кварца. Комплекс внедренных технологических решений позволил 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 качества отливок «Корпус» из стали 35ХГСЛ на ОАО «Гидроавтоматика» (г. Самара).

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. 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. 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; изготовление оснастки (пресс-формы для получения восковых моделей) из высокопрочного медицинского гипса; изготовление промодели из полимерного пластика с помощью 3D-печати на отечественном принтере Hercules. Промодель основе полиалктида (PLA) была напечатана с учетом значений коэффициентов линейных усадок используемого воскового модельного состава и стали 40ХЛ. Промодель использовали в качестве формообразующей при изготовлении гипсовой пресс-формы. Восковые модели получали запрессовкой пастообразного модельного состава ПС 50-50 в рабочую полость пресс-формы с помощью ручного воскового шприца. Восковые модели собирали напайкой в модельный блок. По разработанному технологическому процессу огнеупорную керамическую форму изготавливали с использованием плавного кварца. Для предотвращения ее растрескивания при выплавлении, производили

охлаждение системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» с 25⁰С до 15⁰С, формируя воздушный зазор между модельным блоком и внутренней стенкой формы. Выплавление модельного состава осуществляли в паровом котле. При выплавлении растрескивание ОКФ не происходило. После удаления модельного состава осуществляли прокалку ОКФ в электрической печи сопротивления при температуре 850⁰С в течение 2 ч. Сталь 40ХЛ готовили в индукционной плавильной ППИ-0,03.

Перед началом заливки формы имели температуру окружающей среды. Температура заливаемого расплава - 1620⁰С. Полученные отливки остывали на воздухе. После охлаждения производили выбивку отливок и финишные операции по отделению элементов ЛПС и зачистке. По результатам сдачи заказчику все отливки были признаны годными.

Общие выводы по работе.

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 плавленного кварца в качестве огнеупорного наполнителя.
4. Для объяснения причин растрескивания огнеупорных керамических форм из плавленного кварца при выплавлении модельного состава *предложено модифицированное выражение* У.Д. Кингери: $\sigma_{ВН} = \frac{k_{КО} \times E(T_1 - T_2)}{1 - \mu} + P$, где P – давление оказываемое на стенку ОКФ расширяющимся модельным составом при нагре-

вании до температуры плавления. Обосновано, что растрескивание ОКФ при выплавлении модельного состава не будет при соблюдении следующего условия: $\sigma_{ВН} \leq \sigma_{в}$, где $\sigma_{в}$ – предел прочности ОКФ при растяжении.

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

6. Предложена физическая модель, объясняющая снижение давления модельного состава на огнеупорную керамическую форму из плавленного кварца при проведении операции выплавления за счет охлаждения системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» на $10 \div 15^\circ\text{C}$ относительно ее текущей температуры.

7. Для формирования зазора в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» на практике предложено условие: $\Delta T = (T_{\phi 1} - T_{\phi 2}) \sim +(10 \div 15)^\circ\text{C}$, где ΔT – требуемая величина охлаждения системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма» относительно текущей температуры (°С); $T_{\phi 1}$ и $T_{\phi 2}$ – текущая и требуемая температуры ОКФ (°С).

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 плавленного кварца при выплавлении модельных составов; сокращение расхода электроэнергии на операцию прокаливания в 6 раз; увеличение производительности операции прокаливания 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».

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих научных изданиях:

Отдельные издания:

1. 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. (РИНЦ).

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

2. **Дьячков, В.Н.** Совершенствование технологии получения отливок способом ЛВМ [текст] / В.Н. Дьячков, А.М. Парамонов, К.В.Никитин // Литейщик России. - №5. - 2012. - С. 32-33.
3. **Дьячков, В.Н.** Совершенствование технологии литья по выплавляемым моделям [текст] / В.Н. Дьячков, А.М.Парамонов, К.В.Никитин // Литейное производство. - №7. - 2012. - С. 33-34.
4. **Дьячков, В.Н.** Совершенствование технологии получения стальных отливок ответственного назначения литьем по выплавляемым моделям с целью повышения их качества [текст] / В.Н. Дьячков, К.В.Никитин, А.М. Парамонов, Г.С.Нуждин // Литейщик России. - 2013. - №10. - С. 36-38.
5. **Дьячков, В.Н.** Влияние технологических факторов на качество стальных отливок, получаемых ЛВМ [текст] / В.Н. Дьячков, К.В.Никитин, А.М.Парамонов // Литейное производство. - 2014. - №6. - С. 25-27.
6. **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.
7. **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.

8. Соколов, А.В. Влияние состава керамических оболочек на их свойства при литье по выплавляемым моделям [текст] / А.В. Соколов, **В.Н.Дьячков**, К.В.Никитин // Литейщик России. - 2016. - №4. – С. 21-24.
9. **Дьячков, В.Н.** Применение аддитивных технологий в производстве литых изделий [текст] / Дьячков В.Н., К.В.Никитин, А.Ю.Баринов // Литейное производство. – 2016. - №5. – С. 30-32.

Патент:

10. Пат. № 2509622 РФ. Способ изготовления оболочковой огнеупорной формы [текст] / **Дьячков В.Н.**, Парамонов А.М.; заявитель и патентообладатель Дьячков В.Н. - № 2012144472; приоритет 18.10.2012; опубл. 20.03.2014.

Статьи в других изданиях:

11. **Дьячков, В.Н.** Совершенствование технологии получения отливок литьем по выплавляемым моделям [текст] // Дьячков В.Н., А.М. Парамонов, К.В. Никитин // Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства: материалы 4-й всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Самара: СамГТУ. - 2012. - С. 173-175.
12. **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.
13. **Дьячков, В.Н.** Исследование влияния технологических факторов на качество отливок из стали 40хл, получаемых способом ЛВМ [текст] / В.Н. Дьячков, К.В.Никитин, А.М.Парамонов // Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства: материалы 6-го регионального науч.-техн. совещания. Самара: СамГТУ. - 2014. - С. 153-157.
14. **Дьячков, В.Н.** Применение керамических стержней для получения пустотелых отливок декоративно-художественного назначения [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. 147-148.
15. **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.
16. **Дьячков, В.Н.** Особенности получения пустотелых отливок декоративно-художественного назначения литьем по выплавляемым моделям [текст] / В.Н.

Дьячков, К.В.Никитин, А.Ю.Баринов // Труды 12 съезда литейщиков России. Н. Новгород: - 2015. – С. 417-420.

17. **Дьячков, В.Н.** Особенности подготовки керамических форм к заливке [текст] / В.Н. Дьячков, К.В.Никитин, А.Ю.Баринов // Труды 12 съезда литейщиков России. Н. Новгород: - 2015. – С. 426-431.
18. **Дьячков, В.Н.** Эффективная технология изготовления керамических форм на основе плавленного кварца для литья по выплавляемым моделям [текст] / В.Н. Дьячков, К.В. Никитин, А.Ю.Баринов // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2016. -№5. С. 99-102. (РИНЦ)
19. 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 // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение: Материалы III-ей Всеросс. науч.-практ. конф. Чебоксары: -2017. С. 123-127. (РИНЦ).