

На правах рукописи



БАРИНОВ Антон Юрьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИТЬЯ
В КЕРАМИЧЕСКИЕ ФОРМЫ ЗА СЧЕТ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА
ВОСКО-ПОЛИМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ**

2.6.3 – Литейное производство
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (г. Самара)

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор Никитин Константин Владимирович

Официальные оппоненты:

**Дубровин Виталий
Константинович**

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры пирометаллургических и литейных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»;

**Батышев Константин
Александрович**

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры МТ13 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»;

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования. «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «14» апреля 2023 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.404.01 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfukras.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Лесив Елена Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Конкурентоспособность фасонного литья определяется оптимальным сочетанием следующих основных факторов: «качество-сроки производства-себестоимость продукции». Фасонные отливки ответственного назначения, получаемые специальными способами литья, находят широкое применение в основополагающих отраслях промышленности (машино-, судо-, авиа- и ракетостроение).

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) относится к высокоточным способам литья, обеспечивающим высокую размерную, геометрическую точность (до 4-5 класса) и чистоту поверхности (шероховатость по R_z до 10 и R_a до 1,25 мкм) отливок. Однако, высокая трудоемкость, материалоемкость и длительность традиционного технологического процесса обуславливает всего 1,5% отливок, получаемых ЛВМ, в общей доле отливок в машиностроении.

В связи с этим, *актуальными* становятся задачи по разработке комплекса технологических решений, направленных на интеграцию технологий аддитивного производства (АП) и традиционного процесса ЛВМ на подготовительных этапах. Данное направление в полной мере соответствует направлениям Стратегии научно-технологического развития РФ до 2035 г. (п. 20, п/п «а») и Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 г. (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 14.07.2021г. №1913-р).

Работа выполнена в рамках реализации проекта программы «Реализация мероприятий по развитию инжинирингового центра аэрокосмического кластера Самарской области» (2019 г.) и государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований на период 2020-2022 г.г. (проектная часть государственного задания Минобрнауки РФ № 0778-2020-0005).

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». Опытно-промышленная апробация проводилась в литейных производствах АО «Металлист-Самара» и Центре литейных технологий ФГБОУ ВО «СамГТУ» (г. Самара).

Целью работы является повышение эффективности литья по выплавляемым моделям за счет разработки и внедрения комплекса технологических решений, направленных на изготовление воско-полимерных моделей средствами аддитивных технологий на этапе подготовки производства.

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

1. Выполнить сравнительные исследования основных технологических свойств (свободная линейная усадка, тепловое линейное расширение, зольный остаток) наиболее распространенных восковых модельных составов и полимерных материалов (филаментов) для аддитивного производства (АП) разовых моделей.

2. Разработать технологию синтезирования воско-полимерного состава и получения из него пруткового филамента для использования в машинах АП.

3. Разработать технологические принципы проектирования комбинированных воско-полимерных моделей для их изготовления средствами АП.

4. Исследовать закономерности взаимодействия в системе «разовая модель — огнеупорная керамическая форма».

5. Разработать технологический процесс получения разовых воско-полимерных моделей средствами аддитивных технологий, провести опытно-промышленные испытания в производстве фасонных отливок ответственного назначения и оценить их эффективность.

Научная новизна.

1. *Выполнено сравнительное исследование* свободной линейной усадки (α_m) и стабильности линейных размеров образцов ΔL (%) из наполненных (Romocast 252, Romocast 352) и ненаполненных (Romocast 152, МВС-3Т) восковых составов, используемых для изготовления выплавляемых моделей. Минимальными значениями α_m ($\leq 0,8\%$) при затвердевании и ΔL в интервале температур $(-5)\div(+35)$ °С характеризуются образцы из наполненных восковых составов.

2. *Впервые проведено сравнительное исследование* зольного остатка A (%) и свободной линейной усадки $\alpha_{\text{пм}}$ (%) основных полимерных материалов PLA, HIPS, ABS, PMMA, используемых в АП моделей по FDM-технологии. Установлено, что минимальными значениями A и $\alpha_{\text{пм}}$ в рабочих диапазонах температур характеризуются полимеры PLA ($A\sim 0,19\div 0,25\%$; $\alpha_{\text{пм}}\sim 0,2\div 0,6\%$) и PMMA ($A<0,05\%$; $\alpha_{\text{пм}}\sim 0,4\div 0,8\%$).

3. *Установлено*, что технологическая усадка $\alpha_{\text{п}}$ модели при АП зависит от свободной линейной усадки полимерного материала $\alpha_{\text{пм}}$ (%), температуры экструзии при печати T_3 (°С) и плотности заполнения K_0 (%), что выражается функциональной зависимостью $\alpha_{\text{п}} = f(\alpha_{\text{пм}}; T_3; K_0)$.

4. *Исследовано влияние* доли полиэтиленового воска на температуру каплепадения ($T_{\text{ВПС}}$) наполненных восковых составов и технологические свойства ($\alpha_{\text{п}}$ и ΔL) образцов при АП. Установлена зависимость температуры экструзии $T_{\text{эф}}$

филаментов при 3D-печати от $T_{\text{ВПС}}$ синтезированных воско-полимерных составов: $T_{\text{эф}} \pm 5 = T_{\text{ВПС}} - (15 \div 25)$, °С.

5. *Обоснован механизм* ступенчатого нагрева огнеупорных керамических форм (ОКФ) за счет совмещения процессов удаления воско-полимерных моделей, полученных средствами АП, и прокалики.

Практическая значимость.

1. *Доказано*, что по совокупности значений зольного остатка A (%), технологической свободной линейной усадки $\alpha_{\text{п}}$ (%) и коэффициента теплового линейного расширения $\alpha_{\text{Л}}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) при исследованных значениях плотности заполнения внутренних структур K_0 (5, 15 и 30 %) для изготовления выжигаемых моделей средствами АП наиболее технологичным является полимер на основе PLA.

2. *Синтезированы* воско-полимерные составы (ВПС) для производства филаментов и моделей из них средствами АП. Выполнена модернизация экструзионной линии и определены температурные режимы, обеспечивающие получение филаментов требуемого качества.

3. *Разработана технологическая инструкция* ТИ-ЛВТ-7 «Получение воско-полимерных моделей средствами аддитивного производства по FDM-технологии».

4. *Разработаны* принципы, проектирования воско-полимерных-комбинированных моделей, состоящих из внешней легкоплавкой оболочки ($T_{\text{к}} \sim 79 \div 82^{\circ}\text{C}$) и внутренней тугоплавкой части ($T_{\text{к}} \sim 90 \div 95^{\circ}\text{C}$). Разработаны режимы АП моделей из филаментов на основе синтезированных марок ВПС.

5. *Разработана технологическая инструкция* ТИ-ЛВТ-8 «Подготовка огнеупорных керамических форм к литью при использовании воско-полимерных моделей».

6. *Проведены* опытно-промышленные испытания, эффективность которых подтверждена актами использования и внедрения результатов работ.

Реализация результатов работы в промышленности. Комплекты крупногабаритных комбинированных воско-полимерных моделей, полученные по FDM-технологии, прошли успешную апробацию на АО «Металлист-Самара» (г. Самара) при получении фасонных отливок ответственного назначения из стали марки ВНЛ-3 литьем в огнеупорные керамические формы. В Центре литейных технологий ФГБОУ ВО «СамГТУ» организовано производство фасонных отливок единичной и мелкой серийности литьем по выплавляемым (выжигаемым) моделям. Результаты работы положены в основу создания участка по производству воско-полимерного филамента (индустриальный партнер – ООО «Полимет», г.Тольятти).

Положения, выносимые на защиту.

1. Составы воско-полимерных филаментов для аддитивного производства выплавляемых моделей по FDM-технологии.
2. Технологические решения по изготовлению полимерных, воско-полимерных и комбинированных воско-полимерных моделей средствами аддитивного производства для литья в огнеупорные керамические формы.
3. Результаты опытно-промышленных испытаний.

Методы исследования. Работа выполнена с использованием современных методик исследования и аналитического оборудования для определения технологических свойств воско-полимерных составов; моделирование гидродинамических и кристаллизационных процессов выполнялось с применением лицензионных систем автоматизированного моделирования литейных процессов (FLOW SIMULATION и CAM ЛП LVMFlow); изготовление воско-полимерных моделей осуществлялось на современных установках аддитивного производства по FDM-технологии; 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», Центральной заводской лаборатории АО «Металлист-Самара» (г. Самара); использовании лицензионных систем автоматизированного моделирования литейных процессов; применении современного оборудования для аддитивного производства; соответствии результатов исследований, полученных автором, результатам других исследователей в этой области; практической реализации полученных результатов, опытно-промышленных испытаниях и актах внедрения разработанных технологических решений.

Личный вклад автора заключается в формулировании целей и задач исследования, их теоретическом обосновании, проведении экспериментальных исследований, анализе полученных результатов и их обобщении, разработке технико-технологических решений и участии в опытно-промышленных испытаниях.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических мероприятиях: международная научно-практическая конференция «Современное состояние и перспективы развития литейного производства» (2015 г., Москва); XII-XIV Съезды литейщиков России

(2015 г., Нижний Новгород; 2017 г., Челябинск; 2019 г., Казань); 7-ой всероссийский научно-технический семинар «Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства» (2016 г., Самара); 2-я Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых (2017 г., Курск); 8-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Наследственность в литейно-металлургических процессах» (2018 г., Самара); международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в литейном производстве» (2019 г., Москва).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 22 научных статьи в журналах и сборниках трудов российских и международных научно-технических конференций, в том числе 8 статей в изданиях из перечня ведущих научных журналов, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования (WOS и SCOPUS).

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам направлений исследований из паспорта специальности 2.6.3-Литейное производство: **пункту 1:** «Исследование физических, химических, физико-химических, теплофизических, технологических, механических и эксплуатационных свойств материалов, как объектов и средств реализаций литейных технологий»; **пункту 5:** «Исследование литейных и аддитивных технологий для их обоснования и оптимизации при производстве литых заготовок, форм, стержней, моделей, литейной и вспомогательной оснастки»; **пункту 16.** «Аддитивные материалы и технологии в литейном производстве».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 5 глав, заключения и основных выводов, списка литературы и 4 приложений. Изложена на 144 страницах (включая приложения), содержит 56 рисунков, 22 таблицы, а также список литературы из 126 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 в литье по выплавляемым моделям (ЛВМ). Показаны основные преимущества и недостатки способа. Большой вклад в повышение эффективности 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.

Выполнен анализ основных технологий аддитивного производства (АП) с позиции их интеграции в традиционный процесс ЛВМ на этапах его подготовки. В данном направлении активно проводятся работы научными коллективами под руководством А.Ю. Коротченко (МГТУ им. Баумана, г. Москва), О.В. Панченко (СПбПУ им. Петра Великого, г. Санкт-Петербург), В.Г. Смелова (СГУ им. С.П. Королева, г. Самара), ФГУП ВИАМ (г. Москва) и др.

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

Глава 2. Методика исследования. Исследования проводили по схеме, обеспечивающей разработку технологических решений на основных этапах подготовки производства и получения отливок литьем по выплавляемым моделям. В работе использовали наполненные и ненаполненные восковые составы, применяемые для изготовления выплавляемых моделей; полимерные материалы, применяемые в технологиях аддитивного производства: полиметилметакрилат (PMMA), полилактид (PLA), акрилонитрил бутадиен стирол (ABS), ударопрочный полистирол (HIPS). Для определения зольного остатка в условиях прямого выжигания моделей из огнеупорной керамической формы разработали тестовый образец (рис 1.), имеющий следующие конструктивные особенности: наличие охватываемых и охватывающих поверхностей керамической оболочкой; наличие радиусов скруглений и острых углов на образце для оценки напряжений в керамической оболочке. Образцы изготавливаются на 3D-принтере модели «DesignerXL» (РФ) по FDM-технологии с варьируемой плотностью заполнения (K_0) внутренних структур (5-15-30 %) для анализа влияния K_0 на величину зольного остатка А. Эксперименты по получению опытного пруткового материала (филамента) для АП производились на экструзионной линии «Wellzoom» (КНР) с применением автоматических станций охлаждения и намотки прутковых материалов «St.2,3» (КНР). Модели из филаментов получали на 3D-принтере «Designer XL». Исследовали влияние основных параметров 3D-печати на качество опытных моделей. Огнеупорные керамические формы (ОКФ) получали с использованием плавного кварца. В качестве связующего использовали «Армосил АМ». Формирование слоев на модельных блоках осуществляли с помощью пескосыпа псевдокипящего слоя. Прокалку готовых ОКФ осуществляли в прокалочной печи ПК25. Приготовление алюминиевых сплавов в условиях ЦЛТ производили в тигельных печах сопротивления.

Для моделирования гидродинамических и кристаллизационных процессов получения отливок использовали лицензионную систему автоматизированного

моделирования литейных процессов (САМ ЛП) LVM Flow (версия 4.6r2). Эксперименты в промышленных условиях выполняли на штатном оборудовании конкретного предприятия.

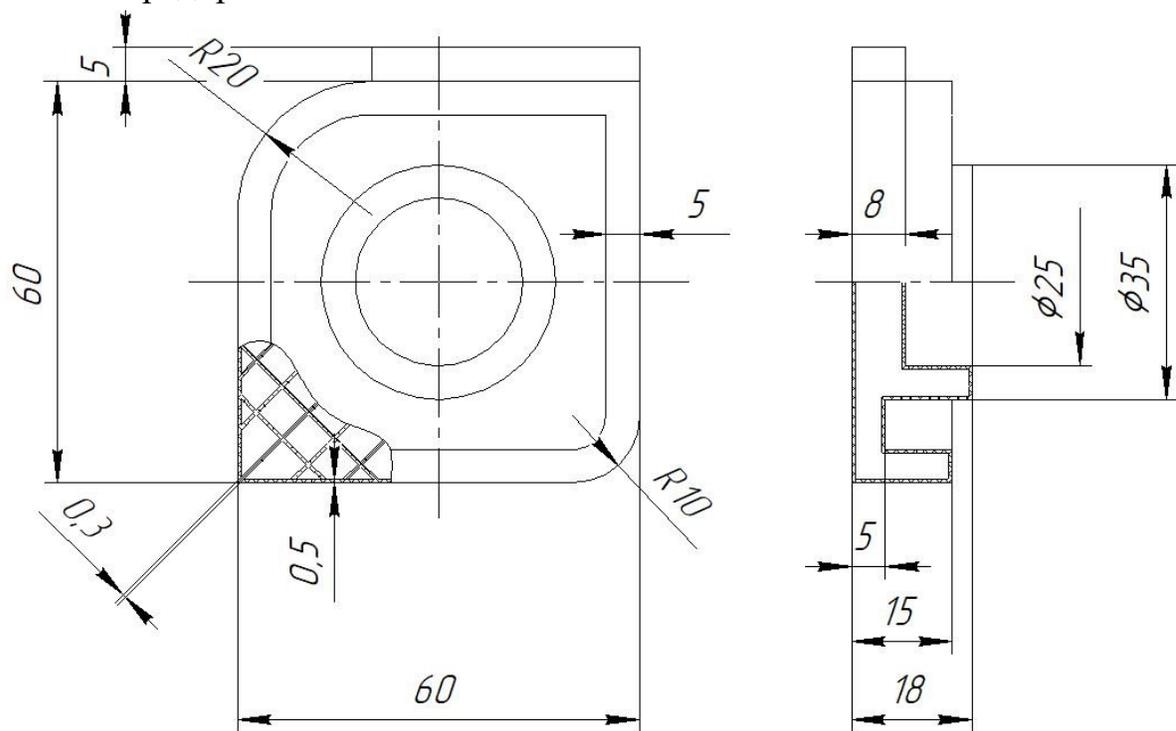


Рисунок 1 - Конструкция тестового образца, получаемого средствами АП, для определения зольного остатка в огнеупорной керамической форме в условиях прямого выжигания

Глава 3. Исследование технологических свойств воско-полимерных материалов для аддитивного производства. Исследовали свободную линейную усадку (α_m , %) при затвердевании восковых модельных составов, используемых для изготовления выплавляемых моделей традиционными методами. Установлено, что ненаполненные составы (Romocast152, MBC 3-T) имеют значения α_m в диапазоне $0,89 \div 1,22\%$. Наполненные составы (Romocast 252 и 325) характеризуются меньшей усадкой при затвердевании ($\alpha_m = 0,59 \div 0,75\%$). Процессы усадки протекают в течение длительного времени (до 24 ч), что обусловлено низкой теплопроводностью восковых составов и длительностью процессов их полимеризации при затвердевании. Пониженные значения α_m у наполненных составов являются положительным фактором, обеспечивающим геометрическую стабильность моделей. Наполненные составы характеризуются более высокими температурами каплепадения (T_k $78 \div 92^\circ\text{C}$) по сравнению с ненаполненными (T_k $67 \div 76^\circ\text{C}$). Это позволяет прогнозировать возможность применения наполненных составов в качестве основы для получения филаментов, т.к. диапазон рабочих температур в установках 3D-печати по FDM-технологии составляет $100 \div 245^\circ\text{C}$.

К полимерным составам, используемым для получения моделей средствами АП по FDM-технологии, предъявляется ряд требований, близких к восковым составам: низкая температура размягчения, сопоставимая с температурой каплепадения восковых составов; малый коэффициент теплового линейного расширения; низкая величина зольного остатка А в ОКФ после выжигания модельных блоков. Установлено, что с увеличением плотности заполнения K_0 (%) внутреннего объема моделей значения А после их выжигания увеличиваются (рис. 2). Высокие значения А могут обуславливать повышение брака за счет образования засоров в тонких сечениях рабочих полостей ОКФ и механического пригара на отливках. Таким образом, плотность опорных структур моделей необходимо выбирать в диапазоне $5 \div 15\%$, в зависимости от сложности геометрии формообразующей поверхности. Минимальными значениями А в исследуемом диапазоне K_0 характеризуется полимер РММА ($\leq 0,05\%$). Полимер PLA имеет зольный остаток в диапазоне $0,19 \div 0,39\%$. У полимерных материалов НПС и ABS значения А составляют $0,26 \div 0,55$ и $0,5 \div 1,28\%$, соответственно.

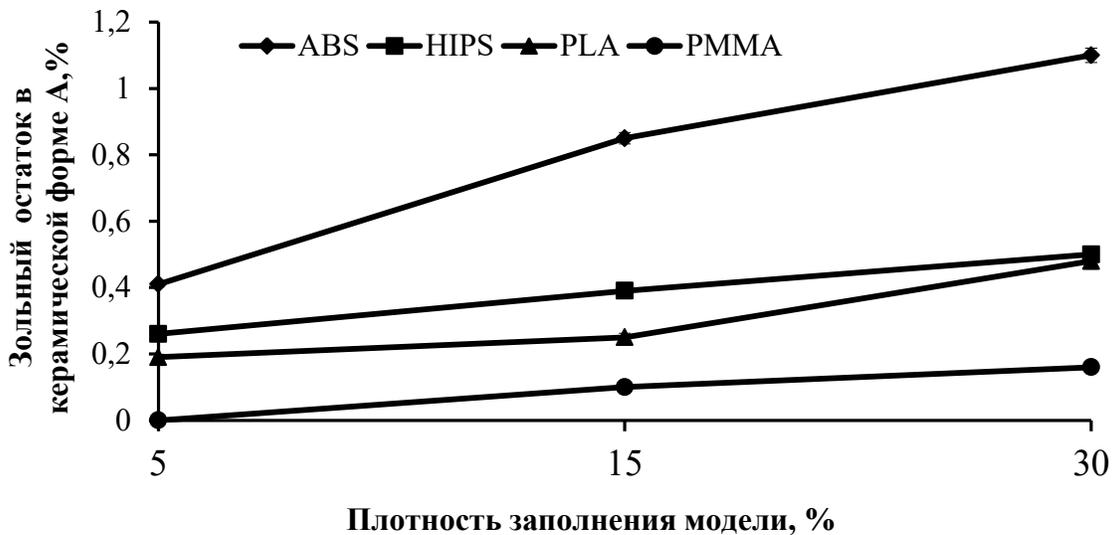


Рисунок 2 – Влияние вида полимерного материала и плотности заполнения модели, полученной средствами АП, на величину зольного остатка в ОКФ

Исследовано влияние температуры экструзии при печати на величину технологической усадки полимеров α_n (%) при $K_0=100\%$. Наименьшую α_n в диапазоне рабочих температур ($200 \div 220^\circ\text{C}$) имеет полимер PLA – $0,2 \div 0,6\%$. По совокупности положительных технологических факторов (α_n , А) наиболее предпочтительными для получения моделей средствами АП являются полимеры на основе PLA и РММА. Усадочные процессы в образцах протекают в течение 1 ч после окончания печати. Для PLA и РММА установлена следующая тенденция: при K_0 5 и 15% α_n имеет большие

значения по сравнению с образцами с K_0 30%. Это связано с тем, что при увеличении K_0 внутренние опорные структуры оказывают тормозящее действие на усадочные процессы. Технологическая усадка $\alpha_{\text{п}}$ модели при АП зависит, в основном, от свободной линейной усадки $\alpha_{\text{пм}}$ (%) полимерного материала, температуры экструзии T_3 ($^{\circ}\text{C}$) и плотности заполнения K_0 (%), что выражается следующей функциональной зависимостью: $\alpha_{\text{п}} = f(\alpha_{\text{пм}}; T_3; K_0)$.

Исследовали влияние K_0 на коэффициент теплового линейного расширения α_L моделей из PLA и PMMA в диапазонах температур $50 \div 65^{\circ}\text{C}$ (для PLA) и $70 \div 100^{\circ}\text{C}$ (для PMMA). Полимер PLA во всем исследованном диапазоне характеризуется низкими значениями α_L по сравнению с PMMA. С увеличением K_0 значения α_L уменьшаются для обоих полимеров (табл. 1). По совокупности значений A (%), $\alpha_{\text{п}}$ (%) и α_L ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) в диапазоне исследованных плотностей заполнения для изготовления выжигаемых моделей средствами АП наиболее технологичным является филамент на основе PLA.

Таблица 1 - Влияние плотности заполнения на КТЛР образцов из полимеров PLA и PMMA

ПМ	$K_0, \%$	$\alpha_L \times 10^{-5}, ^{\circ}\text{C}^{-1}$				$\alpha_L \times 10^{-5}, ^{\circ}\text{C}^{-1}$			
		Температура, $^{\circ}\text{C}$				Температура, $^{\circ}\text{C}$			
		50	55	60	65	70	80	90	100
PLA	5	6,74	6,86	6,97	7,16	-	-	-	-
	15	6,54	6,74	6,89	7,01	-	-	-	-
	30	5,02	5,57	6,03	6,67	-	-	-	-
PMMA	5	-	-	-	-	8,50	8,81	9,31	10,40
	15	-	-	-	-	8,22	8,68	9,08	9,77
	30	-	-	-	-	7,97	8,18	8,24	8,54

Глава 4. Разработка комплекса технологических решений для получения моделей средствами аддитивного производства при литье в огнеупорные керамические формы. На основе наполненных восков Romocast252 и Romocast325 исследовали влияние добавок полиэтиленового воска (ПВ) марки ПЛВО-272 на свойства синтезируемых воско-полимерных составов (ВПС). Для определения оптимальных концентраций ПВ за основной фактор брали температуры каплепадения, регламентируемые для восковых модельных составов категории В при литье по выплавляемым моделям ($54 < T_{\text{ВПС}} < 100$). В связи с тем, что воска и ПВ не образуют между собой соединений, определение объемной доли ПВ производили на основе принципа аддитивности: $T_{\text{впс}} = T_{\text{к}}^{(\text{MC})} \times k_{\text{MC}} + T_{\text{к}}^{(\text{ПВ})} \times k_{\text{ПВ}}$, где: $T_{\text{к}}^{(\text{MC})}$ – температура каплепадения воскового состава, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{к}}^{(\text{ПВ})}$ – температура каплепадения

ПВ, °С; $k_{МС}$ и $k_{ПВ}$ - доли соответствующего компонента в составе, принятого за 1. Расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными значениями $T_{ВПС}$ (рис. 3). Для исследований выбрали ВПС с долей ПВ 10, 25 и 50%.

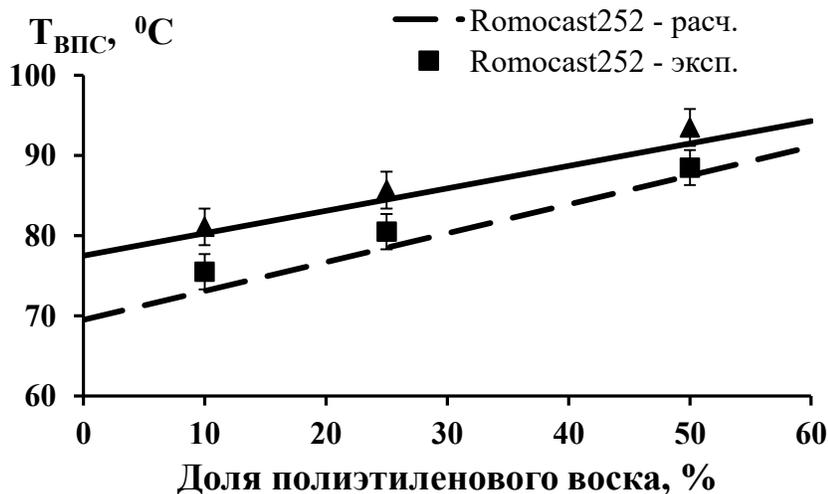


Рисунок 3 – Расчетные и экспериментальные значения $T_{ВПС}$ в зависимости от доли ПВ

С целью обеспечения стабильного процесса при получении филаментов выполнили модернизацию экструзионной линии для увеличения теплоотвода в блоке экструдирования. Образцы для исследований получали по FDM-технологии. Исследовали влияние времени выдержки после печати (1, 30, 60 мин)

на $\alpha_{п}$ и температуры (30, 40, 50, 60° С) на ΔL (%) образцов из синтезированных ВПС. Установлены следующие закономерности: с увеличением времени выдержки и температуры значения $\alpha_{п}$ и ΔL увеличиваются для обоих видов; ВПС P252ПЭ10, 25, 50 характеризуются повышенными значениями $\alpha_{п}$ и ΔL по сравнению с P325ПЭ10, 25, 50; с увеличением доли ПВ в составе ВПС значения $\alpha_{п}$ и ΔL снижаются (табл. 2). Синтезированные ВПС по показателям, обеспечивающим геометрическую точность модели ($\alpha_{п}$, ΔL), имеют лучшие характеристики по сравнению с исходными восковыми составами Romocast 252 и Romocast 325, применяемыми в стандартных процессах ЛВМ, и филаментом на основе PLA, применяемом для 3D-печати по FDM-технологии. Разработаны принципы проектирования воско-полимерных моделей, состоящих из внешней легкоплавкой оболочки с $T_{к} \sim 79 \div 82^{\circ}C$ и внутренней тугоплавкой части с $T_{к} \sim 90 \div 95^{\circ}C$.

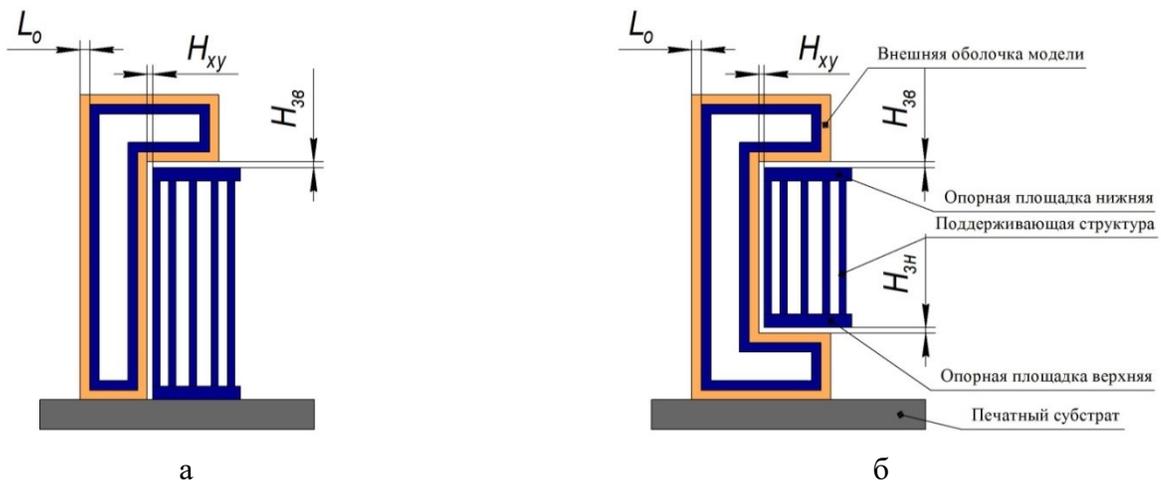
Таблица 2 – Влияние доли ПВ на $\alpha_{п}$ и ΔL , синтезированных ВПС

Марка ВПС	Основа	Доля ПВ, %	$\alpha_{п}$, %	ΔL , %
P252ПЭ25	Romocast252	25	0,47	0,21
P252ПЭ50		50	0,43	0,13
P325ПЭ10	Romocast325	10	0,45	0,19
P325ПЭ25		25	0,43	0,08
P325ПЭ50		50	0,40	0,074

$\alpha_{п}$ – через 60 мин после окончания печати; ΔL – при 60° С

Основным требованием на этапе подготовки управляющей программы является сохранение условия толщины внешней оболочки: $L_o \geq 2D_{ф}$, где L_o – толщина внеш-

ней оболочки модели, мм; D_{ϕ} – диаметр сопла печатающего узла 3D-принтера, мм. Данное условие обеспечивает получение равномерного внешнего слоя модели и необходимую адгезию экструдированного материала с поверхностью каркаса модели. При АП моделей требуется расстановка поддерживающих (опорных) структур под нависающими частями модели в процессе печати. От правильного выбора критериев расстановки поддерживающих структур во многом зависит качество внешнего слоя и трудоемкость постобработки модели. Для удаления поддерживающих структур без формирования дефектов на лицевой поверхности модели необходимо соблюдать следующие условия (рис. 4). Для нижней опорной поверхности: $H_{3н} \geq 2H_c$, где $H_{3н}$ – величина зазора опорной площадки поддерживающей структуры, мм; H_c – высота слоя экструдированного материала на поверхность модели, мм. Для верхней опорной поверхности: $H_{3в} \leq H_c$, где $H_{3в}$ – величина зазора опорной площадки поддерживающей структуры, мм; H_c – высота слоя экструдированного материала на поверхности модели, мм. На рис. 5 представлена структура модели, спроектированной в автоматизированной системе подготовки управляющих программ «PolygonX». Внутренний каркас вместе с опорной структурой модели спроектирован из тугоплавкой воскополимерной, а внешняя оболочка – из легкоплавкой композиции.



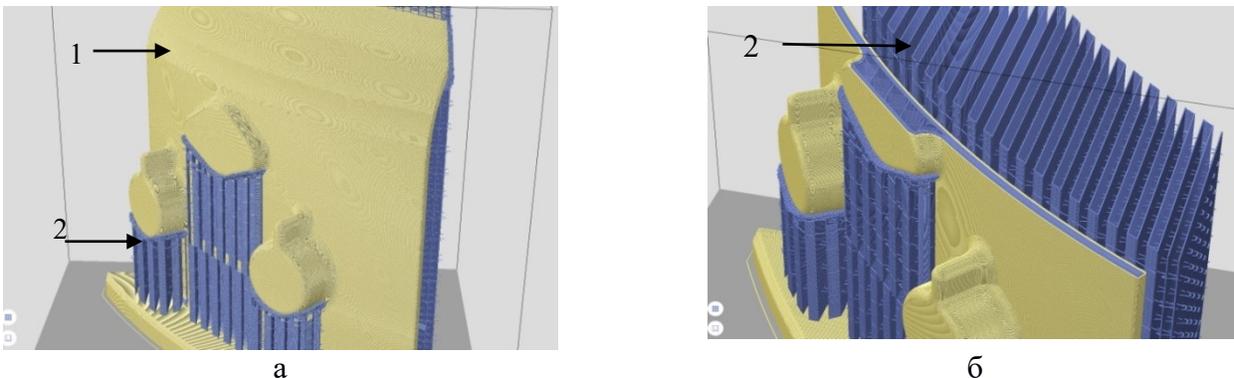
а – при расстановке поддерживающих структур от печатного субстрата;

б – при расстановке поддерживающих структур от поверхности модели

Рисунок 4 - Схематическое изображение расположения поддерживающих и опорных структур

Разработаны режимы аддитивного производства комбинированных моделей габаритными размерами до 500 мм на 3D-принтере DesignerXL с использованием автоматизированной системы подготовки управляющих программ «PolygonX» (табл. 3). При использовании филаментов из ВПС с высоким содержанием пластификатора (например, P252ПЭ50, P325ПЭ50) целесообразно применять более высокие значения следующих параметров, задаваемых в управляющей программе: диаметр сопла 0,5

мм; $T_{\text{сопла}} \sim 80 \div 92^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{стола}} \sim 90 \div 95^{\circ}\text{C}$; скорость печати ~ 60 мм/с. На основании проведенных исследований была разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-7 «Получение воско-полимерных моделей средствами аддитивного производства по FDM-технологии».



а - внешняя оболочка (1) модели с элементами поддерживающих структур (2);
б - внутренняя структура (2) модели

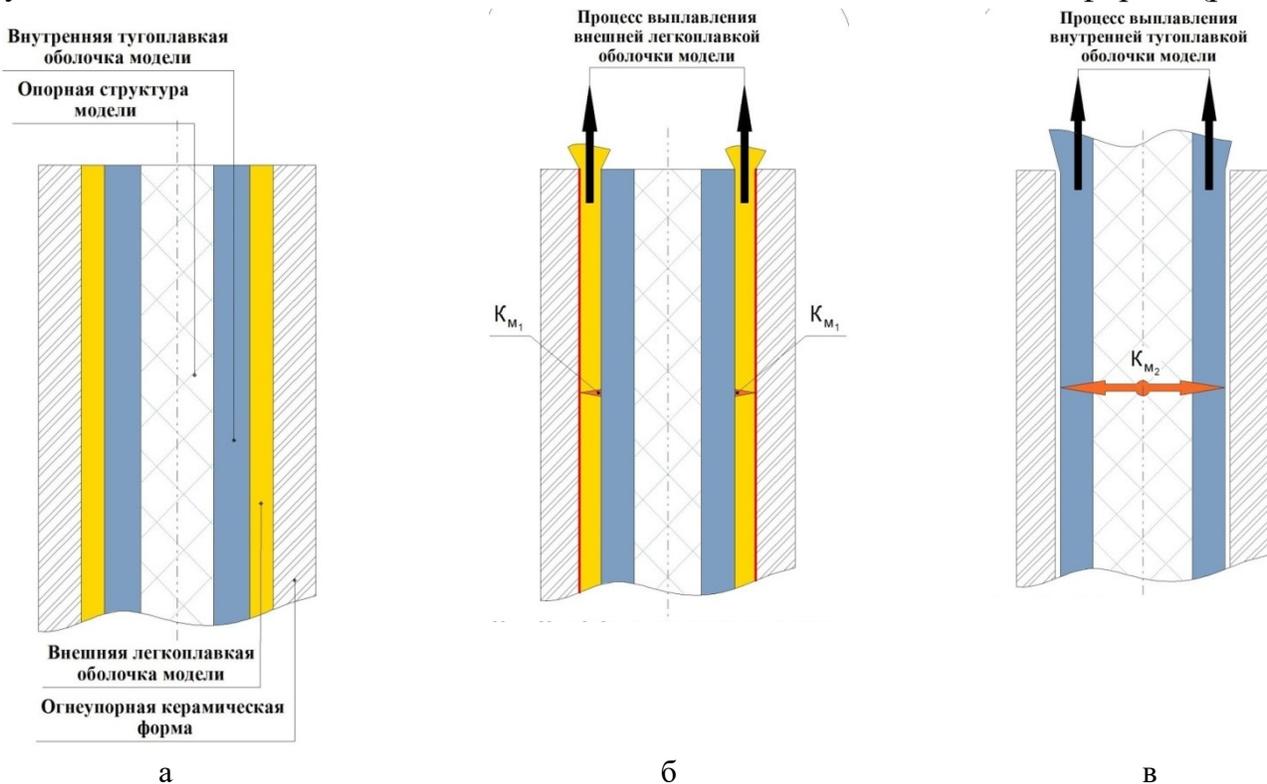
Рисунок 5 - Структура комбинированной модели в программной среде PolygonX (фрагмент)

Таблица 3 - Режимы аддитивного производства комбинированных моделей

Марка	Диаметр сопла, мм	$T_{\text{сопла}}, ^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{стола}},$ на 1-ом слое $^{\circ}\text{C}$	$H_c, \text{ мм}$	$H_{\text{ху}},$ мм	$H_{\text{зн}},$ мм	$K_o, \%$	Скорость печати, мм/с
P252ПЭ50	0,5	80÷86	90	0,2 ÷ 0,25	0,35	0,4÷0,5	5÷15	60
P325ПЭ50	0,5	85÷92	95	0,2 ÷ 0,25	0,35	0,4÷0,5	5÷15	60
P325ПЭ10	0,3	70÷78	80	0,1 ÷ 0,25	-	-	15÷30	40

Исследовали взаимодействие в системах «разовая модель - огнеупорная керамическая форма». Для системы «восковая модель - огнеупорная керамическая форма» было предложено перед выплавлением воскового состава производить захлаживание системы для формирования воздушного зазора между рабочими поверхностями ОКФ и восковым составом (за счет его усадки). Воздушный зазор, при нагревании системы до температур выплавления ($90 \div 100^{\circ}\text{C}$) служит компенсатором теплового расширения воскового состава и снижает его давление на стенки ОКФ. Для предотвращения растрескивания ОКФ на основе плавленного кварца, на практике перед операцией выплавления воскового состава необходимо обеспечивать следующее условие: $\Delta T = (T_{\text{ф1}} - T_{\text{ф2}})$: $\Delta T \sim 10 \div 15^{\circ}\text{C}$ – для наполненных восков; $\Delta T \sim 15 \div 20^{\circ}\text{C}$ – для ненаполненных восков, где ΔT – требуемая величина охлаждения системы «восковая модель – огнеупорная керамическая форма» относительно текущей температуры ($20 \div 25^{\circ}\text{C}$); $T_{\text{ф1}}$ и $T_{\text{ф2}}$ – текущая и требуемая температуры ОКФ ($^{\circ}\text{C}$).

Предложен механизм взаимодействия в системе «воско-полимерная модель – огнеупорная керамическая оболочка» для моделей, полученных средствами АП. При погружении в теплоноситель в первую очередь начинает расплавляться легкоплавкий воско-полимерный состав, образующий внешнюю геометрию. Снижение давления на внутреннюю полость ОКФ происходит за счет его выдавливания из ОКФ расширяющимся тугоплавким ВПС центральной части модели. После удаления легкоплавкого внешнего слоя между тугоплавким слоем и ОКФ образуется воздушный зазор, обеспечивающий свободное удаление тугоплавкой части модели без дополнительного давления на стенки формы (рис. 6).



а – система при комнатной температуре; б – при погружении в теплоноситель;
в – выдержка в теплоносителе

(K_{M1} , K_{M2} – давление легкоплавкого и тугоплавкого модельных составов, соответственно)

Рисунок 6 – Взаимодействие в системе «воско-полимерная модель – огнеупорная керамическая оболочка»

Разработан совмещенный ступенчатый режим выплавления модельного блока и прокатки ОКФ, состоящий из 3-х этапов (табл. 4).

Таблица 4 – Температурные режимы совмещенного процесса удаления моделей и прокатки ОКФ

Этап	Температурный интервал, °C	Процесс
I	40-100	Выплавление легкоплавкой составляющей
II	100-150	Выплавление тугоплавкой составляющей
III	150-600 600-950	Выжигание остатков тугоплавкой составляющей Прокатка ОКФ

Эксперименты по ступенчатому режиму подготовки ОКФ к литью показали, что оптимальные температурно-временные интервалы обеспечивают 100% целостность ОКФ. Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-8 «Подготовка огнеупорных керамических форм к литью при использовании воско-полимерных моделей».

Глава 5. Опытно-промышленная апробация результатов исследования. Для штучного и мелкосерийного производства, реализуемого в условиях Центра литейных технологий ФГБОУ ВО «СамГТУ», разработан технологический процесс получения отливок из сплава АК9ч литьем с использованием моделей из ВПС, изготовленных средствами АП. Получали отливки «Корпус» и «Крышка малая». На этапе подготовки производства выполнили следующий комплекс технологических решений: разработка конструкции литниково-питающих систем с применением САМ ЛП LVMFlow; изготовление воско-полимерных моделей по FDM-технологии; контроль размеров полученных моделей с помощью 3D-сканера RengeVision Spectrum; сборка комбинированных модельных блоков и создание ОКФ; подготовка ОКФ к литью и получение опытных отливок. С целью обеспечения требуемого уровня технологических и механических свойств в состав шихты рабочего сплава были включены деформируемые отходы; модифицирование сплава перед заливкой осуществляли микрористаллической лигатурой AlSr10. Все отливки прошли входной контроль у заказчиков и были признаны годными. Разработанные технологические решения позволили сократить срок производства отливок мелкой серийности из алюминиевых сплавов способом ЛВМ в условиях ЦЛТ СамГТУ на 80% по сравнению с традиционным технологическим процессом, а также полностью устранить брак по растрескиванию ОКФ при подготовке к литью.

Для АО «Металлист-Самара» (г. Самара) разрабатывали технологию изготовления моделей отливок «Корпус диффузора» и «Корпус камеры сгорания», получаемых литьем по выплавляемым моделям из стали ВНЛ-3. Отливки характеризовались следующими основными конструктивными особенностями: максимальный диаметр – 760 мм; максимальная высота – 450 мм; приведенная толщина стенки – 4 мм. Модели были изготовлены по FDM-технологии из филамента на основе PLA. Остальной производственный цикл был реализован в производственных условиях по разработанным технологическим решениям, интегрированным в стандартный технологический процесс предприятия. Модели элементов литниково-питающих систем были изготовлены из восковых модельных составов марок МВС-3Т и ПС50-50 в связи с тем, что применение данных составов регламентировано технологическими инструкциями предприятия. Удаление восковых моделей ЛПС из ОКФ производили в водяных ваннах при температуре теплоносителя 90-95°C в течение 2,5-3 ч. Выжига-

ние полимерной модели и прокатку ОКФ проводили по разработанному ступенчатому режиму для комбинированных модельных блоков в прокаточной печи с выкатным подом. Финишная прокатка проводилась по стандартному технологическому режиму предприятия: температура $1100^{±20}$ °С, выдержка в течение 6 ч. После данного этапа растрескивания ОКФ не произошло. Заливку стали ВНЛ-3 (1570^{+10} °С) в ОКФ ($850^{±50}$ °С) осуществляли на установке ВИАМ-24. Далее формы охлаждали естественным путем на воздухе в течение 12 ч. Контроль качества опытных отливок не выявил поверхностных и внутренних дефектов (рис. 7).



а



б

а - отливка с элементами ЛПС; б – отливка

Рисунок 7 - Отливка «Корпус камеры сгорания» на этапе финишных операций

Интеграция АП на этапе получения моделей отливок и применение ступенчатого режима подготовки ОКФ к литью обеспечили сокращение времени подготовки производства в 2 раза; устранение брака ОКФ по растрескиванию; сокращение времени прокатки ОКФ после выплавления модельного состава в 1,5 раза; устранение отдельной операции нагрева ОКФ под заливку. Указанные показатели обеспечили снижение стоимости одной отливки из стали ВНЛ-3 на 45% по сравнению со стандартным технологическим процессом предприятия.

Общие выводы по работе.

1. Проведены сравнительные исследования свободной линейной усадки (α_m) и стабильности линейных размеров образцов (ΔL) из наполненных и ненаполненных восковых составов, используемых для изготовления выплавляемых моделей. Установлено, что минимальными значениями α_m ($\leq 0,8\%$) при затвердевании и значениями ΔL (%) в интервале температур $(-5) \div (+35)$ °С обладают наполненные восковые составы (Romocast 252, Romocast 352) по сравнению с образцами из ненаполненных восковых составов (Romocast 152, МВС-3Т).

2. Впервые проведено сравнительное исследование зольного остатка А (%) и свободной линейной усадки $\alpha_{\text{пм}}$ (%) основных полимерных материалов PLA, HIPS, ABS,

PMMA, используемых в АП моделей по FDM-технологии. Установлено, что минимальными значениями A и $\alpha_{\text{ПМ}}$ в рабочих диапазонах температур характеризуются полимеры PLA ($A \sim 0,19 \div 0,25\%$; $\alpha_{\text{ПМ}} \sim 0,2 \div 0,6\%$) и PMMA ($A < 0,05\%$; $\alpha_{\text{ПМ}} \sim 0,4 \div 0,8\%$).

3. Установлено, что технологическая усадка $\alpha_{\text{П}}$ модели при АП зависит от свободной линейной усадки полимерного материала $\alpha_{\text{ПМ}}$ (%), температуры экструзии при печати T_3 ($^{\circ}\text{C}$) и плотности заполнения K_0 (%), что выражается функциональной зависимостью $\alpha_{\text{П}} = f(\alpha_{\text{ПМ}}; T_3; K_0)$. По совокупности указанных значений при $K_0 = 5 \div 30$ наиболее технологичным для производства моделей средствами АП является полимер на основе PLA.

4. Впервые исследовано влияние плотности заполнения K_0 на коэффициент теплового линейного расширения α_L образцов из PLA и PMMA. Установлено, что при нагреве от 23°C до температур близких к температурам стеклования T_c (65°C для PLA и 100°C для PMMA) значения α_L увеличиваются; в интервале рабочих температур ($50 \div 65^{\circ}\text{C}$ для PLA и $70 \div 100^{\circ}\text{C}$ для PMMA) с увеличением K_0 значения α_L уменьшаются.

5. Обосновано, что по совокупности значений зольного остатка A (%), технологической свободной линейной усадки $\alpha_{\text{П}}$ (%) и коэффициента теплового линейного расширения α_L ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) при исследованных значениях K_0 для изготовления выжигаемых моделей средствами АП наиболее технологичным является полимер на основе PLA.

6. Установлено влияние доли полиэтиленового воска на технологические свойства наполненных восковых составов Romocast 252, Romocast 352: с увеличением доли полиэтиленового воска с 10 до 50% увеличивается температура каплепадения $T_{\text{ВПС}}$ ($^{\circ}\text{C}$), снижается технологическая усадка $\alpha_{\text{П}}$ (%) и склонность к изменению линейных размеров ΔL (%) образцов. Наиболее технологичными ВПС для производства филаментов по совокупности технологических параметров являются ВПС с содержанием полиэтиленового воска 25 и 50%.

7. Выполнена модернизация экструзионной линии и определены температурные режимы для получения филаментов требуемого качества из синтезированных ВПС. Установлена зависимость температуры экструзии филамента $T_{\text{эф}}$ при 3D-печати от температуры каплепадения воско-полимерного состава $T_{\text{К}}$: $T_{\text{эф}} \pm 5 = T_{\text{ВПС}} - (15 \div 25)$, $^{\circ}\text{C}$.

8. Установлено, что синтезированные ВПС по показателям, обеспечивающим геометрическую точность модели ($\alpha_{\text{П}}$, ΔL), имеют лучшие характеристики по сравнению с исходными восковыми составами Romocast 252 и Romocast 325, применяемыми в стандартных процессах ЛВМ, и филаментом на основе PLA, применяемым для 3D-печати по FDM-технологии. Разработана технологическая инструкция ТИ-

ЛВТ-7 «Получение воско-полимерных моделей средствами аддитивного производства по FDM-технологии».

9. *Разработаны принципы проектирования воско-полимерных моделей, состоящих из внешней легкоплавкой оболочки ($T_k \sim 79 \div 82^\circ\text{C}$) и внутренней тугоплавкой части ($T_k \sim 90 \div 95^\circ\text{C}$). Разработаны режимы аддитивного производства моделей из филаментов на основе синтезированных ВПС.*

10. *Установлено, что для обеспечения целостности огнеупорной керамической формы в системе «восковая модель – огнеупорная керамическая форма» необходимо обеспечить формирование зазора за счет ее предварительного захлаживания на величину $\Delta T = (T_{\phi 1} - T_{\phi 2})$, где ΔT – требуемая величина охлаждения системы относительно текущей температуры; $T_{\phi 1}$ и $T_{\phi 2}$ – текущая и требуемая температуры ОКФ (для наполненных восков: $\Delta T \sim 10 \div 15^\circ\text{C}$; для ненаполненных восков $\Delta T \sim 15 \div 20^\circ\text{C}$).*

11. *Установлено, что снижение давления на внутренние стенки ОКФ в системе «воско-полимерная модель, полученная средствами АП – огнеупорная керамическая форма» осуществляется за счет обеспечения следующих процессов: расплавление легкоплавкого модельного состава (при этом снижение давления на внутреннюю полость ОКФ происходит за счет его выдавливания из ОКФ расширяющимся тугоплавким модельным составом); обеспечение свободного удаления тугоплавкой составляющей модели за счет образующегося воздушного зазора с ОКФ.*

12. *Разработаны ступенчатые режимы нагрева ОКФ, совмещенные с удалением моделей и прокалкой ОКФ для следующих вариантов: модели ЛПС и отливки изготовлены по технологии 3D-печати из ВПС; модели отливки изготовлены по технологии 3D-печати из PLA, а модели ЛПС – из восковых составов по серийной технологии; модели ЛПС и отливки изготовлены по технологии 3D-печати из PLA. Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-8 «Подготовка огнеупорных керамических форм к литью при использовании воско-полимерных моделей».*

13. *Проведены опытно-промышленные испытания разработанных технологических решений. Доказана эффективность получения отливок из сплавов АК9ч и ВНЛ-3 единичной и мелкой серии литьем по выплавляемым моделям с использованием воско-полимерных и комбинированных моделей, изготовленных средствами аддитивного производства. Результаты опытно-промышленных испытаний подтверждены актами использования и внедрения результатов работ.*

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих научных изданиях:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. **Баринов А.Ю.** Применение быстрого прототипирования для получения единичных и мелкосерийных отливок литьем по выплавляемым моделям [текст] / **А.Ю. Баринов**, К.В. Никитин, В.Н. Дьячков // Литейное производство, 2017 - №3. – С. 123-127.
5. **Баринов А.Ю.** Применение аддитивных технологий для получения литых изделий технического назначения [текст] / **А.Ю. Баринов**, К.В. Никитин, В.Н. Дьячков, Б.Н. Тукабайов, Б.Н. Бородин // Литейщик России, 2018. - №10. – С. 32-42.
6. **Баринов А.Ю.** Применение аддитивных технологий и реверс-инжиниринга для изготовления литых деталей при реставрации автомобильной техники [Текст] / **А.Ю. Баринов**, К.В. Никитин, В.Н. Дьячков, Б.Н. Тукабайов, Б.Н. //Литейное производство, 2019 - №8. – С. 31-34.
7. Никитин К.В. Исследование линейной усадки модельных составов и механизмов взаимодействия в системе «выплавленная модель – огнеупорная керамическая форма» [Текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, В.Н. Дьячков, **А.Ю. Баринов** // Известия вузов. Цветная металлургия, 2019 №6. – С.42-50
8. **Баринов А.Ю.** Получение выжигаемых моделей с применением аддитивных технологий методом послойного наплавления [Текст] / **Баринов А.Ю.**, Тукабайов Б. Н., Никитин К.В., Никитин В.И. // Литейное производство, 2020 - №6. – С. 28-31.

Статьи в научных изданиях, рецензируемых в базе SCOPUS:

9. Nikitin K.V., D'yachkov V.N., Nikitin V.I., **Barinov A.Yu.**, Deev V.B. Influence of temperature conditions on the shrinkage of wax patterns for investment casting // SAMSTech-2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2020. Vol. 919. Issue 2. Номер статьи 022041 doi:10.1088/1757-899X/919/2/022041.

Статьи в научных изданиях, рецензируемых в базе SCOPUS и WOS:

10. Nikitin, K.V. Improving the Casting Process in Ceramic Forms Using Additive Technologies in Manufacturing Model Kits [текст] // K.V. Nikitin, B.N. Tukabayov, V.N. D'yachkov, V.I. Nikitin, V.B. Deev, **A.Yu. Barinov**// Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2021 - Vol. 62. - No. 6. - P. 675–681.

Статьи в других изданиях:

11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Дьячков, В.Н. Эффективная технология изготовления керамических форм на основе плавленого кварца для литья по выплавляемым моделям [текст]/ В.Н. Дьячков, К.В. Никитин, **А.Ю. Баринов** // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2016. -№5. С. 99-102. (РИНЦ)
16. **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).
17. **Баринов А.Ю.** Получение металлических отливок литьем по выплавляемым моделям с применением реверс-инжиниринга и аддитивных технологий [текст] / **А.Ю. Баринов**, Б. Н. Тукабайов, Демин А. А. // 2-я Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых, Том 5. Юго-Зап. гос. ун-т, Курск: ЗАО Университетская книга, 2017, 341- 343 с.
18. **Баринов А.Ю.** Аддитивные технологии при получении литых изделий технического назначения [текст] / **А.Ю. Баринов**, В.Н. Дьячков, К.В. Никитин, Б.Н. Тукабайов, Б.Н. Бородин// Труды VIII Всеросс. науч.-техн. конф. с

- междунар. участием «Наследственность в литейно-металлургических процессах». - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – С. 550-561.
19. Дьячков В.Н. Изготовление выплавляемых моделей в пресс-формах, полученных методом 3D-печати [текст] / В.Н. Дьячков, К.В. Никитин, **А.Ю. Баринов**, И.Ю. Тимошкин, Б.Н. Тукабайов, А.А. Демин // Труды VIII Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Наследственность в литейно-металлургических процессах». - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. - С. 561-567.
20. Тукабайов Б.Н. Применение реверс-инжиниринга для реставрации автомобильной техники [текст] / Б.Н. Тукабайов, **А.Ю. Баринов** // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса: межвуз. сб. науч. статей (с междунар. участием). – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – С. 3–7.
21. **Баринов А.Ю.** Реставрация автомобильной техники на основе современных литейных технологий [текст] / **А.Ю. Баринов**, Б.Н. Тукабайов // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса: межвуз. сб. науч. статей (с междунар. участием). – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – С. 49–55.
22. **Баринов А.Ю.** Разработка модельной оснастки для литья по выплавляемым моделям с помощью аддитивной технологии [Текст] / **А.Ю. Баринов**, В.Н. Дьячков, А.А. Демин // Всероссийской научной конференции (17-18 октября 2018 года), в 4-х томах, Том 3. Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: ЗАО Университетская книга, 2018. – С. 163-168.