

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

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)

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Никитин Константин Владимирович

Самара–2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1 Состояние вопроса. Постановка целей и задач исследования.... | 9 |
| 1.1 Специфические особенности традиционного литья по выплавляемым моделям..... | 9 |
| 1.2 Основные материалы, применяемые при подготовке производства в литье по выплавляемым моделям..... | 12 |
| 1.3 Анализ возможности интеграции аддитивных технологий и литья по выплавляемым моделям..... | 21 |
| 1.4 Управление структурой и свойствами литых изделий на основе явления структурной наследственности | 39 |
| 1.5 Цели и задачи исследования..... | 42 |
| 2 Методика исследования..... | 43 |
| 2.1 Общая методика исследования. Объекты исследования..... | 43 |
| 2.2 Основное оборудование и методы исследования свойств материалов..... | 47 |
| 3 Исследование технологических свойств воско-полимерных материалов для аддитивного производства..... | 57 |
| 3.1 Исследование свободной линейной усадки модельных составов различных видов..... | 57 |
| 3.2 Влияние вида полимерного материала и объемной доли заполнения модели, полученной средствами аддитивного производства, на величину зольного остатка в огнеупорной керамической форме | 62 |
| 3.3 Исследование влияния температуры экструзии полимерных материалов и объемной доли заполнения моделей на технологическую усадку в условиях аддитивного производства..... | 66 |
| 3.4 Исследование влияния объемной доли заполнения на коэффициент теплового линейного расширения моделей..... | 70 |
| Выводы по главе 3..... | 74 |
| 4 Разработка комплекса технологических решений для получения моделей средствами аддитивных технологий при литье в огнеупорные керамические формы..... | 77 |
| 4.1 Синтез воско-полимерных модельных составов и получение филаментов на их основе | 77 |
| 4.2 Разработка принципов проектирования воско-полимерных комбинированных моделей для АП | 87 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 4.3 | Исследование взаимодействия в системе «модель-огнеупорная керамическая форма» при технологических операциях удаления моделей..... | 91 |
| | Выводы по главе 4..... | 103 |
| 5 | Опытно-промышленная апробация результатов исследования.... | 106 |
| 5.1 | Опытно-промышленные испытания технологии получения отливок литьем в огнеупорные керамические формы с применением воско-полимерных моделей, изготовленных средствами аддитивного производства | 106 |
| 5.2 | Разработка технологии изготовления комбинированных воско-полимерных моделей, полученных средствами аддитивного производства | 113 |
| | Выводы по главе 5..... | 119 |
| | Заключение. Общие выводы по работе..... | 121 |
| | Список литературы..... | 124 |
| | Приложение А..... | 141 |
| | Приложение Б..... | 142 |
| | Приложение В..... | 143 |
| | Приложение Г..... | 144 |

ВВЕДЕНИЕ

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 мо-

делей 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 синтеза 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, MBC-3T) 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 $T_{\text{э}}$ (°С) и плотности заполнения K_0 (%), что выражается функциональной зависимостью $\alpha_{\text{п}} = f(\alpha_{\text{пм}}; T_{\text{э}}; K_0)$.

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 прокалки.

Практическая значимость.

1. *Доказано*, 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 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 ор-

ганизовано 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 САМ ЛПИ 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 таблиц, а также список литературы из 126 наименований.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЦЕЛЕЙ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Специфические особенности традиционного литья по выплавленным моделям

По классическому определению литьем по выплавленным моделям называется способ получения литых изделий «в многослойных оболочковых неразъемных разовых формах, изготавливаемых по разовым (выплавленным, выжигаемым и растворяемым) моделям» [1].

Литье по выплавленным моделям (ЛВМ) по классификации относится к специальным способам литья, но является одним из старейших способов получения литых изделий сложной конфигурации. Данный способ использовался ранее, в основном, для изготовления отливок декоративного и художественного назначения (ювелирные изделия, интерьерные и статуйные отливки), а также для производства примитивных и элементарных инструментов из металла. Первые упоминания применения технологий литья по выплавленным моделям берут свое начало с 5000 г. до н. э. [2].

В процессе развития индустриального общества способ ЛВМ получил распространение из-за возможности изготавливать отливки сложной геометрии с высоким качеством поверхности и размерной точностью. Преимущества данного способа литья становятся наиболее очевидными в тех случаях, когда литое изделие невозможно выполнить другими способами литья, а деталь – с помощью таких способов обработки металлов, как ковка, штамповка, механическая обработка и т.д.

Начало широкого освоения ЛВМ в мировой промышленности относится к 40-м г.г. XX-го века. Это связано с освоением производства лопаток авиационных газотурбинных двигателей из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов [3].

В настоящее время способом ЛВМ получают литые фасонные изделия массой от нескольких граммов до нескольких сот килограммов, сложной конфигурации с толщиной стенки менее 1 мм из широкой номенклатуры цветных (магниевого, алюминиевого, медного, жаропрочных никелевых и титановых) и черных (сталей, чугунов) сплавов. Еще одним основным преимуществом ЛВМ является высокий коэффициент использования металла (КИМ) на уровне 90-95%, что сопоставимо с данным показателем для литья под давлением. Укрупненная схема традиционного технологического процесса ЛВМ представлена на рис. 1.1.

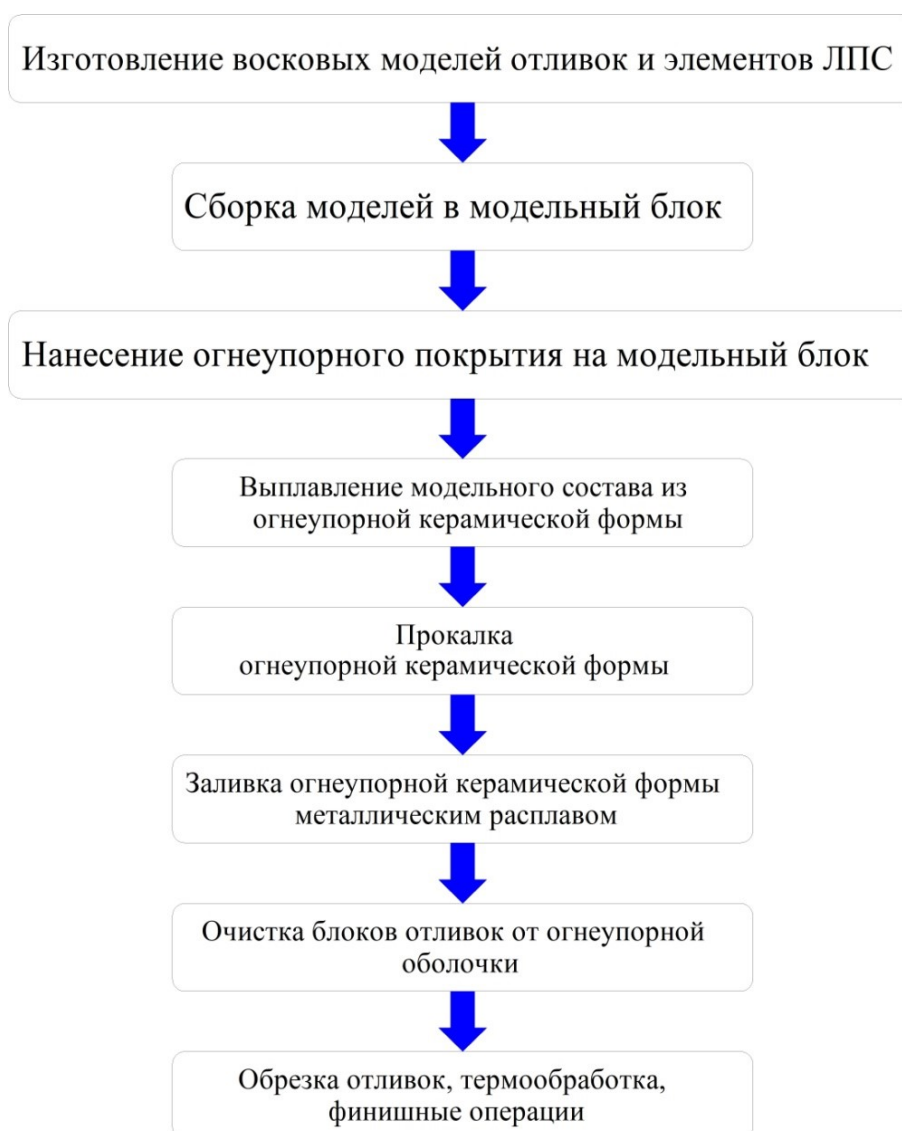


Рисунок 1.1 – Укрупненная схема технологического процесса литья по выплавляемым моделям

На первом этапе изготовление моделей отливок и элементов литниково-питающих систем осуществляют в пресс-формах специальных конструкций. В качестве материалов для изготовления моделей используют легкоплавкие воскообразные составы на основе синтетических смол, пластмасс, восков. Далее, модели отливок и элементов литниково-питающих систем напайкой или склейкой соединяют в модельный блок. Огнеупорная керамическая форма (ОКФ) формируется за счет послойного нанесения на модельный блок суспензии, состоящей из связующего материала и огнеупорного пылевидного наполнителя. Каждый нанесенный слой суспензии покрывается обсыпчным огнеупорным материалом, который может быть такой же природы, что и пылевидный, но более крупной фракции. Это делается для улучшения взаимосвязи между слоями и, в конечном счете, для повышения прочности ОКФ. В зависимости от вида применяемого связующего нанесенные слои сушат по определенным технологическим режимам (влажность воздуха, температура, время и т.д.). Геометрическая сложность и габариты модельного блока обуславливают количество наносимых слоев и, в конечном итоге, толщину стенки готовой ОКФ. Удаление (выплавление) модельного состава из готовой неразъемной огнеупорной керамической формы производят в теплоносителе (горячая вода, пар, и т.д.). На завершающем этапе огнеупорные керамические формы подвергаются прокатке и подаются на участок литья [4].

Большое количество технологических этапов и трудоемкость ЛВМ на стадии подготовки к литью обуславливает высокую себестоимость литых изделий, полученных данным способом. Например, себестоимость тонны стальных отливок, полученных ЛВМ, в $1,5 \div 10$ раз выше по сравнению с их получением литьем в песчано-глинистые формы (ПГФ). Однако, при этом обеспечиваются следующие неоспоримые преимущества: отливки, полученные способом ЛВМ, имеют высокую размерную точность (до 4-5 класса) и чистоту поверхности (шероховатость по R_z до 10 и R_a до 1,25

мкм); при литье в ПГФ минимальная шероховатость отливок по R_z составляет 40, а максимальная до 320 мкм [1, 3, 5].

Применение отливок, полученных ЛВМ, взамен изготовления деталей, например, резанием из деформированных полуфабрикатов (поковок, штамповок) обеспечивает сокращение объемов механической обработки в 3 – 10 раз, повышение КИМ в 5 – 10 раз, что существенно снижает трудоемкость и себестоимость изготовления конечного изделия [6].

В конце XX и начале XXI в.в. совершенствование ЛВМ происходило, в основном, по следующим направлениям:

- новые технологичные модельные составы для изготовления выплавляемых моделей;
- эффективные способы получения высокоточных выплавляемых моделей;
- эффективные огнеупорные материалы для огнеупорных керамических форм (ОКФ);
- совершенствование имеющихся и разработка новых технологий подготовки ОКФ к заливке;
- технологии подготовки расплавов к литью.

1.2 Основные материалы, применяемые при подготовке производства в литье по выплавляемым моделям

Модельные составы. Основные параметры, обеспечивающие качество будущих отливок при ЛВМ, закладываются на стадии изготовления выплавляемых моделей. Именно технологические свойства применяемых модельных составов во многом будут обуславливать геометрическую точность модели отливки.

Применяемые в настоящее время в серийных процессах ЛВМ виды модельных составов характеризуются широким спектром технологических свойств. Это обусловлено тем, что зачастую составы разрабатывались для

различных условий и серийности производства, оборудования и используемой оснастки, номенклатуры отливок и требований к качеству литья и т.п.

С целью обеспечения конкурентоспособности литья по выплавляемым моделям по качественным показателям и в связи с усложнением конфигурации отливок, получаемых данным способом, продолжают исследования, направленные на модернизацию известных и создание новых модельных составов. Анализ открытых источников информации показывает, что из более, чем 200 марок модельных составов, известных на сегодняшний момент, в серийных технологиях ЛВМ используется не более десяти [7]. Обеспечение геометрической точности будущих отливок во многом определяется точностью геометрии выплавляемых моделей, получаемых на первом технологическом этапе (рис. 1.1). Точность геометрии выплавляемых моделей зависит от следующих основных факторов: свойства используемого модельного состава, сложность моделей, условия их производства и хранения. Любая выплавляемая модель, получаемая из жидкого или пастообразного модельного состава, является, своеобразной отливкой. При затвердевании модельного состава в пресс-форме в нем протекают процессы, сходные процессам при затвердевании отливок из металлов и их сплавов, пластмасс, стекла, камня и др. [5].

Развернутая классификация свойств модельных составов дана в работах [1, 3, 5]. Классификация модельные составы (МС) построена по следующим ключевым признакам: природа и количественное соотношение компонентов, образующих МС; основные технологические свойства; методы и способы изготовления и удаления готовых моделей из форм [1, 3]. Это предопределяет то, что к модельным составам предъявляют большой перечень требований по физическим, химическим, технологическим и другим свойствам [5]. Модельные составы, по укрупненным признакам, должны соответствовать следующими основным требованиям: температура плавления 50-90⁰С; высокие теплопроводность и жидкотекучесть в жидком и пастообразном состояниях; минимальное время затвердевания в пресс-

форме; отсутствие прилипаемости к рабочей поверхности пресс-формы; возможность соединения между собой отдельных элементов в единый модельный блок; плотность не более 1 г/см^3 [3].

Широкое распространение в традиционных процессах изготовления выплавляемых моделей нашел модельный состав ПС 50-50 в связи с простотой состава (двухкомпонентный: парафин – 50%, стеарин – 50%) и удовлетворительными технологическими свойствами (высокие текучесть и пластичность; низкая твердость; возможность запрессовки при невысоком давлении). Однако, при получении тонкостенных отливок, изготовление выплавляемых моделей с запрессовкой модельного состава в пресс-формы, составы типа ПС (парафин+стеарин) применять нецелесообразно. Это обусловлено низкой скоростью затвердевания и охлаждения моделей (деформации тонкостенных моделей); недостаточная прочность МС (массовый брак моделей в процессе их извлечения из автоматизированных пресс-форм, а также при послойном формировании огнеупорного покрытия на автоматизированных линиях). В связи с этим, МС данного состава ограничено применяют в литейных цехах с небольшой серийностью для толстостенных стальных отливок или мелкого литья ремонтного назначения.

При наличии в литейных цехах высокого уровня механизации и автоматизации процесса широкое применение находят МС типа МВС-3Т (парафин – 45%; церезин синтетический – 40%; полиэтиленовый воск – 15%). Модельные составы типа МВС обеспечивают требуемую точность формы, прочность, теплостойкость. Однако, составы типа МВС, из-за наличия в составе полиэтиленового воска, характеризуются повышенной линейной усадкой и склонностью к образованию утяжин на моделях. Для минимизации отрицательного влияния полиэтиленового воска перед запрессовкой модельные составы типа МВС наполняют газообразным наполнителем (как правило, воздухом).

К числу МС, лишенных вышеуказанных недостатков, относятся составы, которые получают на основе минеральных восков природного происхождения (например, марки В-1, ВИАМ-102, Romonta PW). Такие МС применяются при производстве выплавляемых моделей сложных отливок типа лопаток турбин, а также тонкостенных отливок ответственного назначения, для которых требуются высокая чистота поверхности и размерная точность [8].

В настоящее время на различных отечественных предприятиях применяют широкий спектр МС, разработанных и производимых в РФ и РБ: «Салют» различных модификаций (разработчик ФГУП «ВИАМ», производитель ММПП «Салют»), ЗГВ (производитель ОАО «Завод горного воска», РБ), МВС (ТУ 0258-006-11035757-2004), ПС 50-50, МВС-3Т. Находят применение их зарубежные аналоги (KindtCollins, Blason, Romocast, Remet и др.).

Выбор того или иного модельного состава предопределяется особенностью его применения: МС для изготовления моделей литниково-питающих систем, для изготовления моделей отливок и т.д. Как правило, данные составы отличаются друг от друга незначительными добавками, определяющими различия в технологических свойствах в зависимости от их назначения. Поэтому конечному потребителю важны не столько компоненты, образующие тот или иной модельный состав, сколько физические и технологические свойства самих модельных составов. Следует отметить, что в сопроводительной документации, как правило, указывают плотность, прочность при статическом изгибе, температуру каплепадения и зольность модельных составов [9].

Перспективными модельными составами являются МС, производимые на основе очищенных гидрокарбонатных восков, синтетических восков, смол с добавлением твердого наполнителя в количестве от 29 до 33% (по массе) [5]. Такие модельные составы централизованно производят предприятия Германии (Deumex, VeciHaldex), Англии (Remet, BlaysonOlefines),

США (KnightCollins) и ряда других стран. Преимуществом указанных МС является низкая склонность к образованию в моделях дефектов усадочного происхождения и обеспечение высокой размерной и геометрической точности моделей отливок. Однако, общим существенным недостатком данных модельных составов является высокая вязкость в жидко-подвижном состоянии, что делает их практически не регенерируемыми.

В целом, для модельных составов важное значение имеют следующие технологические свойства: низкие (свободная и затрудненная) линейные усадки, сохранение стабильности линейных размеров при изменении температуры окружающей среды [10, 11].

На основании многолетнего анализа причин брака в производстве тонкостенных отливок ответственного назначения, получаемых ЛВМ, были сформулированы основные технологические критерии определяющие склонность МС к короблению, трещиноустойчивости и образованию утяжин на моделях [12].

В реальных производственных условиях температура пресс-форм при запрессовке МС регламентируется в диапазоне 25-30⁰С, но, в большинстве случаев, не контролируется с помощью измерительной аппаратуры; не контролируется цикличность запрессовки и длительность выдержки модели в пресс-формах. Не производится контроль температуры модели при извлечении ее из пресс-формы, длительность нахождения моделей на воздухе до сборки их в модельный блок, температурный режим и длительность хранения моделей и модельных блоков до нанесения огнеупорного покрытия. Указанные неконтролируемые факторы могут являться причинами образования повышенного брака моделей и оказывать существенное негативное влияние на качество будущих отливок.

С целью улучшения технологических свойств известных модельных составов используют различные модифицирующие добавки. Добавление к составу промышленных МС небольших количеств соевой муки обуславливает улучшение целого ряда технологических свойств: снижение шерохо-

ватости рабочих поверхностей моделей, уменьшение свободной линейной усадки, повышение твердости и прочности на растяжение МС, улучшение смачиваемости моделей из модифицированных МС огнеупорной суспензией [13].

Качество поверхности будущей отливки будет определяться и характером взаимодействия на границе контакта «модельный состав-керамическая форма». Установлено, что при использовании наполненных промышленных МС проникновение жидкого модельного состава в поры огнеупорной керамической формы не происходит, что снижает пригар на поверхности отливок [14]. С целью снижения давления расширяющегося во время выплавления модельного состава на внутренние стенки ОКФ предлагается производить предварительное захлаживание ОКФ [15] или использовать пустотелые конструкции модельного блока, особенно массивных частей (стояк, воронка, коллектор) [16].

Материалы для огнеупорных керамических форм. Совершенствованием технологий изготовления огнеупорных керамических форм для литья по выплавляемым моделям интенсивно занимаются научные коллективы «ЮУрГУ» (г. Челябинск) [17-19], «СПбПУ им. Петра Великого» (г. Санкт-Петербург) [20, 21], «НГТУ им. Р.Е. Алексеева» (г. Нижний Новгород) [22], «МАТИ - РГТУ им. К.Э. Циолковского» (г. Москва) [23], «МГТУ им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск) [24] и др.

Для формирования слоев огнеупорной керамической формы (ОКФ) применяют пылевидный (наполнитель в суспензию) и зерновой (обсыпочный) огнеупорные материалы, а также различные виды связующих. Типовой технологический процесс изготовления многослойных ОКФ является самостоятельной достаточно сложной и многоступенчатой технологией, которая включает в себя покрытие модельного блока огнеупорной суспензией, обсыпку зернистым материалом, сушку [25]. Вышеуказанные процессы повторяют необходимое количество раз для формирования требуемой толщины стенки огнеупорной керамической формы. Количество нано-

симых на модельный блок слоев определяется требуемой прочностью формы, ее металлоемкостью, огнеупорностью, способом формовки под заливку (в опорном наполнителе, без опорного наполнителя) и составляет, как правило, от 4-х до 10 и более. Необходимые прочностные свойства каждый слой огнеупорного покрытия приобретает только после сушки по регламентируемым режимам. При этом удаляется жидкая составляющая суспензии и происходит отвердевание связующего вещества. В процессах изготовления ОКФ применяют различные растворы связующих материалов, где связующим веществом является тугоплавкий неорганический окисел или соединения окислов, образующиеся в процессе сушке и прокаливании формы.

Широко применяемый на предприятиях в XX в. этилсиликат марок ЭТС-32 и ЭТС-40 для приготовления суспензии в настоящее время практически не применяется из-за следующих основных недостатков: вредность для здоровья, применение органических растворителей, высокая пожароопасность, проведение гидролиза с целью придания требуемых вяжущих свойств, невысокая живучесть суспензий, сушка форм в среде аммиака [25-28]. Готовое этилсиликатное связующее марки ГС-20П не требует проведения операции гидролиза и позволяет производить сушку слоев без применения аммиака [29]. Известно низкокремнистое этилсиликатное связующее (НКЭС), которое содержит 10÷12 % SiO_2 и позволяет получать огнеупорные керамические формы с высокой термомеханической стойкостью при заливке жаропрочными сплавами [30].

В современных процессах изготовления ОКФ все более широкое применение находят кремнезоли, которые являются водным коллоидным раствором двуокиси кремния, стабилизированным микродобавкой двуокиси натрия. Кремнезоли относятся к числу готовых связующих материалов и обладают рядом таких преимуществ, как длительная живучесть (6-8 месяцев), высокая седиментационная устойчивость суспензий, высокая прочность керамических оболочек, экологическая безопасность. Например, свя-

зующее марки «Сиалит-20С» является водным раствором высокодисперсного коллоидного силиката натрия с частицами кремнезема размером 8-10 нм, что обеспечивает его высокую агрегативную и кинетическую устойчивость [31-33].

Связующие на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (так называемые, алюмозоли) разработаны для изготовления ОКФ при получении отливок из титановых сплавов, а также сплавов с высокой температурой плавления. К алюмозолям относятся такие связующие готового типа, как «Алюмокс» [34] и «Remal 20» [35]. По сравнению с кремнезольями, алюмозоли имеют ряд недостатков: они твердеют в керамической форме обратимо, что требует определенных условий сушки слоев и удаления модельной массы; их рекомендуется применять только на лицевой (контактный) слой; прокалка форм производится при высокой температуре ($\sim 1300^\circ\text{C}$), что обуславливает повышение себестоимости керамической формы.

Для изготовления керамических форм применяют пылевидные и зернистые огнеупорные материалы, к которым предъявляются следующие основные требования: огнеупорность, химическая стойкость к заливаемому расплаву, низкий и стабильный коэффициент теплового линейного расширения (КТЛР) в интервале рабочих температур, минимальная стоимость, экологическая безопасность [3-5]. В качестве огнеупорных материалов наиболее часто применяют электрокорунд белый ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), периклаз (MgO), кварц кристаллический (SiO_2).

Кварц кристаллический (кварцевый песок, маршалит) является наиболее дешевым и, в силу этого, распространенным материалом для изготовления керамических форм. В качестве обсыпочного материала применяют кварцевый песок с размером зерна 0,16-0,20 мм для первого слоя и 0,315-0,40 мм для последующих слоев. В качестве наполнителя для суспензии применяют молотый кварцевый песок (маршалит), при этом размер зерна должен быть менее 50 мкм. Температура плавления кварца кристаллического составляет 1713°C . Данный материал при нагреве до температу-

ры плавления претерпевает 4 полиморфных превращений, которые сопровождаются изменением плотности: от 2650 кг/м^3 (β -кварц, 573°C) до 2190 кг/м^3 (β -кристоболит, 1713°C). Изменение плотности при каждом полиморфном превращении сопровождается изменением объема [36]. Наиболее существенным полиморфным превращением является переход в β -кварц (573°C), которое сопровождается изменением объема кристаллического кварца на 2,4% [37]. Такое изменение объема сопровождается появлением большого числа микротрещин в ОКФ, которые ослабляют ее прочность. Кроме того, ОКФ изменяют свой объем, что обуславливает снижение геометрической точности отливок. В связи с этим, более перспективным материалом в качестве огнеупорного наполнителя является плавленный (аморфный) кварц [38, 39]. Преимуществами плавленного кварца являются отсутствие полиморфных превращений в процессе нагревания и очень низкий КТЛР ($0,4-0,5 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$) по сравнению с кварцем кристаллическим ($13,7 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$). Огнеупорные керамические формы, изготовленные на основе плавленного кварца, обладают высокой термостойкостью и стабильностью размеров. Благодаря этому плавленный кварц можно применять для изготовления ОКФ при получении крупногабаритных отливок диаметром до 1200 мм из жаропрочных сплавов [40, 41].

Электрокорунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) является наиболее устойчивой в широком интервале температур разновидностью глинозема. Электрокорунд получают прокаливанием гидратов или солей алюминия при температуре $>1200^\circ\text{C}$. Сырьем для электрокорунда могут служить технический глинозем ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) или бокситы (природные породы, содержащих гидраргиллит, бемит, диаспор). В этом случае электрокорунд получают плавлением указанных материалов при $2100\div 2500^\circ\text{C}$ [42]. В качестве наполнителя в суспензию и как зернистый обсыпочный материал наибольшее распространение получил белый электрокорунд.

Для литья лопаток турбины ГТД (литье с направленной кристаллизацией) рекомендуют использовать электрокорундовую суспензию и обсып-

ку. Для обеспечения регламентированной равноосной структуры в отливке в суспензию вводят модификатор – алюминат кобальта [43].

Основным недостатком электрокорунда является его высокий удельный вес (3990 кг/м^3). Указанный недостаток может быть нивелирован при использовании сферокорунда (полые зерна сферической формы), насыпной вес которого составляет $800\text{-}1200 \text{ кг/м}^3$ [44]. Еще одним дополнительным преимуществом сферокорунда является то, что он не изменяет своих свойств после заливки и может использоваться многократно без специальной предварительной подготовки.

1.3 Анализ возможности интеграции аддитивных технологий и литья по выплавляемым моделям

Основные задачи повышения эффективности литейного производства были поставлены в известной парадигме выдающегося ученого-литейщика Гуляева Б.Б. в конце XX-го века: *«Как получить расплав и отливку заданного качества при минимальных затратах материалов, энергии, труда и минимальном загрязнении среды?»* [45].

Бурное развитие цифровых технологий в конце XX – начале XXI вв. способствовало появлению нового вида производства фасонных изделий сложной конфигурации: аддитивное производство. Соответственно, аддитивное производство потребовало от ученых исследований, направленных на разработку технологий и материалов; от специализированных предприятий – разработку и создание оборудования для аддитивного производства.

Внедрение элементов аддитивных технологий на отдельных этапах литейного производства будет способствовать снижению себестоимости изделий из металлов и сплавов, обеспечению конкурентоспособности литой продукции за счет сокращения сроков и затрат на освоение новых видов продукции, повышения качества и геометрической точности литых из-

делий, а также за счет повышения эффективности использования материалов и энергии.

Краткая характеристика аддитивных технологий. Термины и определения. Внедрение аддитивных технологий в литейное производство в полной мере соответствует приоритетным направлениям Стратегии научно-технологического развития РФ до 2035 г. (п. 20, п/п «а») [46]: «а) переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта». Дальнейшее развитие аддитивных технологий в РФ предопределено Стратегией развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 г. [47].

Американская ассоциация испытаний и материалов (American Society for Testing and Materials – ASTM) разработала стандарт ASTM F2792.12A «Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies» (Стандартная терминология аддитивных технологий), в котором регламентируются основные термины и определения для различных этапов аддитивного производства. Стандарт F2792.12A был опубликован в 2009 г. В нем было дано определение «аддитивное производство», которое используется и в настоящее время. Стандарт F2792.12A был разработан с целью унификации терминологии, используемой производителями, исследователями, преподавателями, средствами массовой информации. Создавая общую лексику для аддитивного производства (АП), ASTM F2792 заложил основу для дальнейшего развития стандартов АП и обеспечил единообразие терминов и понятий. К настоящему времени стандарт ASTM F2792 прекратил свое действие. Его преемником стал стандарт ISO/ASTM 52900 «Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology» («Терминология аддитивного производства. Общие принципы»), который был опубликован в 2015 г. [48]. Стандарт ISO/ASTM 52900 является первым стандартом для АП, разработанным совместно Международной орга-

низацией по стандартизации (ISO) и ASTM International, а затем принятым Европейским комитетом по стандартизации (CEN). Стандарт ISO/ASTM 52900 стал первым шагом по объединению мировых органов по стандартизации в области АП и координации разработки стандартов в разных странах и разных отраслях промышленности.

Русскоязычным аналогом ISO/ASTM 52900 является ГОСТ Р 57558-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения» [49].

Английское слово «*additive*» (добавление) является антонимом «*subtractive*» (вычитание). Именно в этом заложено коренное отличие аддитивного производства (добавление материала слой за слоем) от производства фасонных изделий способами механической обработки (удаление материала слой за слоем).

Основным понятием согласно [48] является «*Additive Manufacturing*» (АМ) - аддитивное производство.

Соответственно, основным англоязычным определением АМ является следующее:

- *Additive manufacturing (AM) is the process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methods.*

Наиболее точным переводом может служить русскоязычное определение:

- *Аддитивное производство (АП) – это процесс объединения материалов для создания объектов по цифровым (компьютерным) объемным моделям, обычно, слой за слоем, в отличие от вычитающих производственных методов.*

В табл. 1.1 даны некоторые термины и определения, характеризующие аддитивное производство согласно ASTM F2792.12A1 и ГОСТ Р 57558-2017.

В рассматриваемых стандартах также даны термины и определения способов получения объемных объектов средствами аддитивного производства.

Таблица 1.1 - Некоторые термины и определения аддитивного производства

| № п/п | ISO/ASTM 52900 | ГОСТ Р 57558-2017 |
|-------|--|--|
| 1 | 3D printer - a machine used for 3D printing | 3D-принтер (3D printer): Установка для 3D-печати. |
| 2 | 3D printing - the fabrication of objects through the deposition of a material using a print head, nozzle, or another printer technology. | <i>Отсутствует</i> (перевод: « 3D-печать - изготовление объектов путем нанесения материала с использованием печатающей головки, сопла или другой печатающей технологии»). |
| 3 | additive manufacturing (AM) - a process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies. | аддитивное производство; АП (аддитивный технологический процесс) (additive manufacturing): Процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки). |
| 4 | additive systems - machines used for additive manufacturing. | система АП (аддитивная система) (additive manufacturing system): Установка АП и вспомогательное оборудование, используемое для АП. |

В ноябре 2020 года Росстандартом утвержден ряд новых национальных стандартов [50-55] в области аддитивных технологий (табл. 1.2).

Таким образом, на основании анализа терминов и определений, технологии аддитивного производства в полной мере относятся к цифровым технологиям. В процессе аддитивного производства изделий используется принцип сквозного проектирования, основой в котором является создаваемая в специализированных конструкторских системах трехмерная модель (3D-модель, математическая модель) будущего изделия. При реализации аддитивных технологий (АТ) все стадии производства от идеи до вопло-

щения находятся во взаимосвязанной конструкторско-технологической среде, которая является единой цифровой системой [56].

Таблица 1.2 - Российские стандарты по аддитивному производству

| № п/п | Номер стандарта | Наименование |
|-------|---------------------------|---|
| 1 | ГОСТ Р 59184-2020 [50] | «Аддитивные технологии. Оборудование для селективного лазерного сплавления. Общие требования» |
| 2 | ГОСТ Р 59037-2020 [51] | «Аддитивные технологии. Конструирование металлических изделий. Руководящие принципы» |
| 3 | ГОСТ Р 59038-2020 [52] | «Аддитивные технологии. Подтверждение качества и свойств металлических изделий» |
| 4 | ГОСТ Р 59036-2020 [53] | «Аддитивные технологии. Производство на основе селективного лазерного сплавления металлических порошков. Общие положения» |
| 5 | ГОСТ Р 59183-2020 [54] | «Аддитивные технологии. Изделия, полученные методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции, стали марки 08X18H10T. Общие технические требования» |
| 6 | ГОСТ Р 59185-2020 [55] | «Аддитивные технологии. Изделия, полученные методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции титанового сплава марки ВТ-6. Общие технические требования» |

Аддитивные технологии произвели настоящую цифровую революцию именно в высокотехнологичных отраслях — авиационной и аэрокосмической области, атомной индустрии, медицине и приборостроении. Для указанных отраслей характерно мелкосерийное, иногда штучное производство. Именно в них применение технологий аддитивного производства изделий позволяет существенно сокращать время на создание новой продукции.

Основные этапы АП можно представить в виде укрупненной схемы (рис. 1.2). В связи с большими возможностями АП и разнообразием решаемых задач к настоящему времени разработаны различные аддитивные технологии, материалы и оборудование.

АТ обладают следующими основными преимуществами:

- невысокие финансовые и временные затраты, связанные с подготовкой производства по сравнению с традиционными технологиями;

- относительно невысокая цена и высокая скорость выполнения заказов при единичном и мелкосерийном производствах;

- возможность быстрого тиражирования и масштабирования изделия по единичному представленному аналогу.

При этом, следует выделить ряд существенных недостатков АТ, которые присутствуют к настоящему времени:

- высокая стоимость промышленного оборудования;

- ограниченность выбора материалов для производства изделий ответственного назначения;

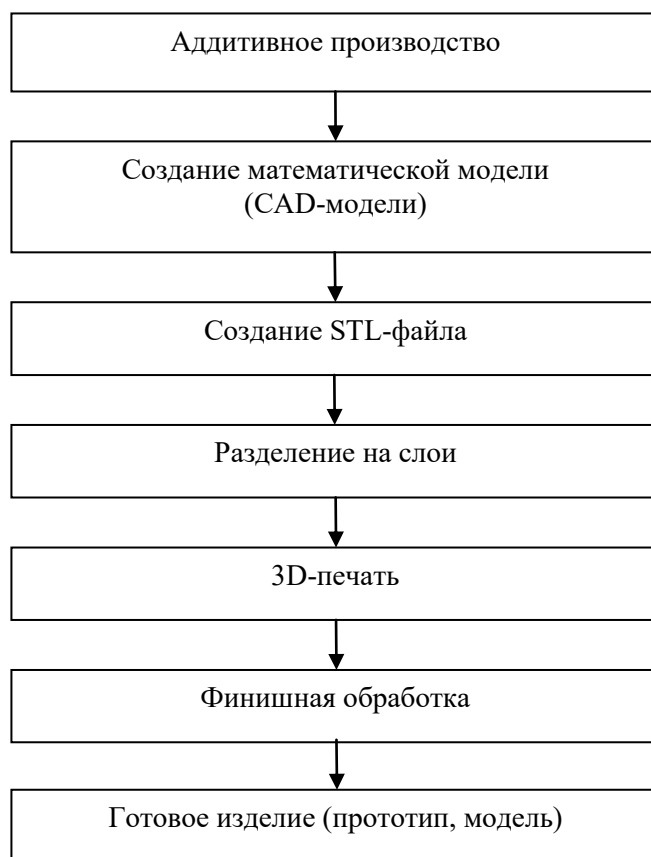


Рисунок 1.2. Укрупненная схема аддитивного производства

- низкая эффективность при крупносерийном производстве

Однако, анализ тенденций развития АТ позволяет прогнозировать устранение вышеперечисленных недостатков.

Классификация технологий АТ. В настоящее время развитие технологий АТ происходит для решения многообразных задач в различных отраслях мировой промышленности [56-59]. Это обусловило достаточно разветвленную классификацию АТ по методам и типам строительного материала (рис. 1.3). Известна классификация АТ по ключевой технологии (рис. 1.4).

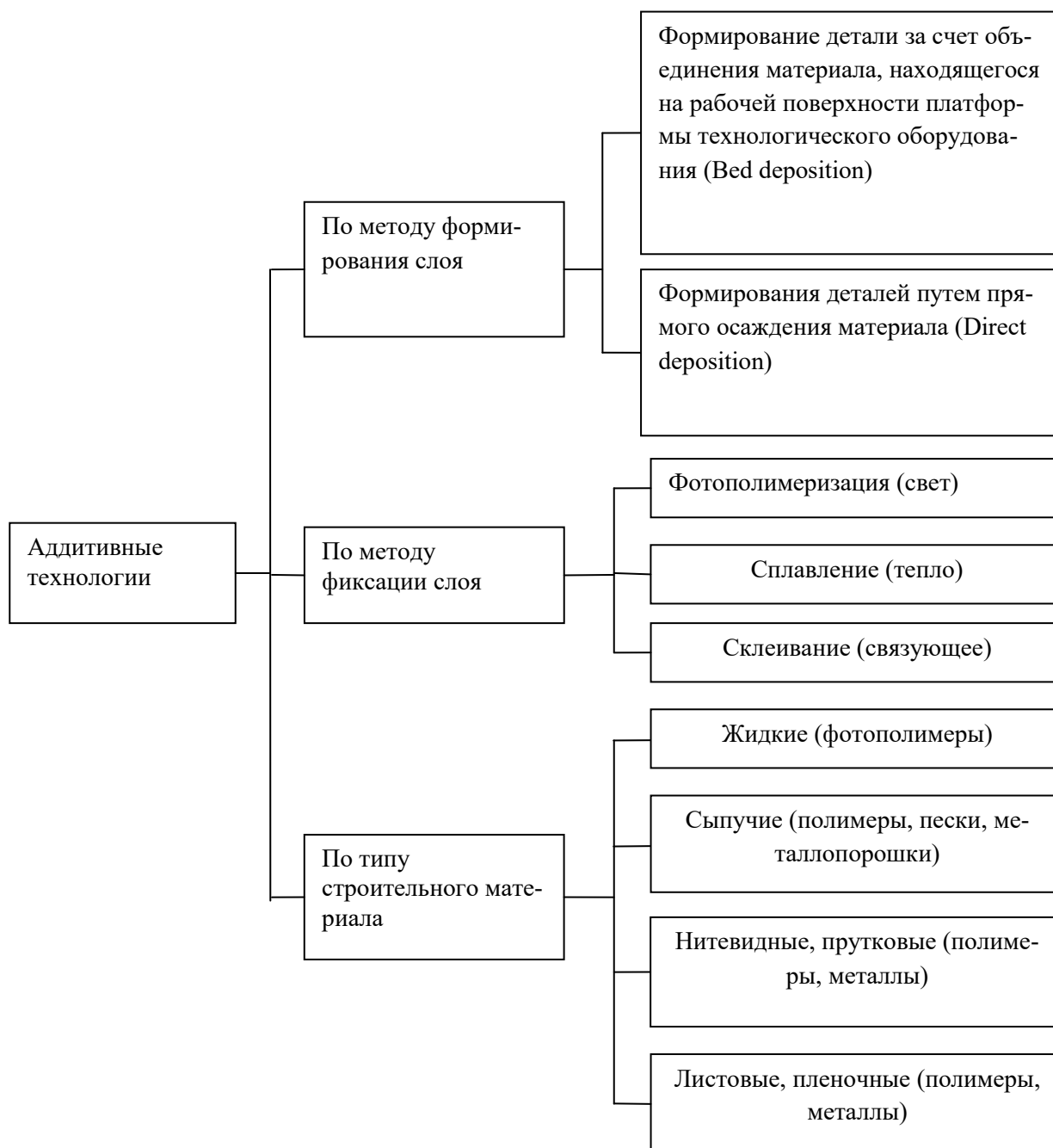


Рисунок 1.3. Расширенная классификация аддитивных технологий

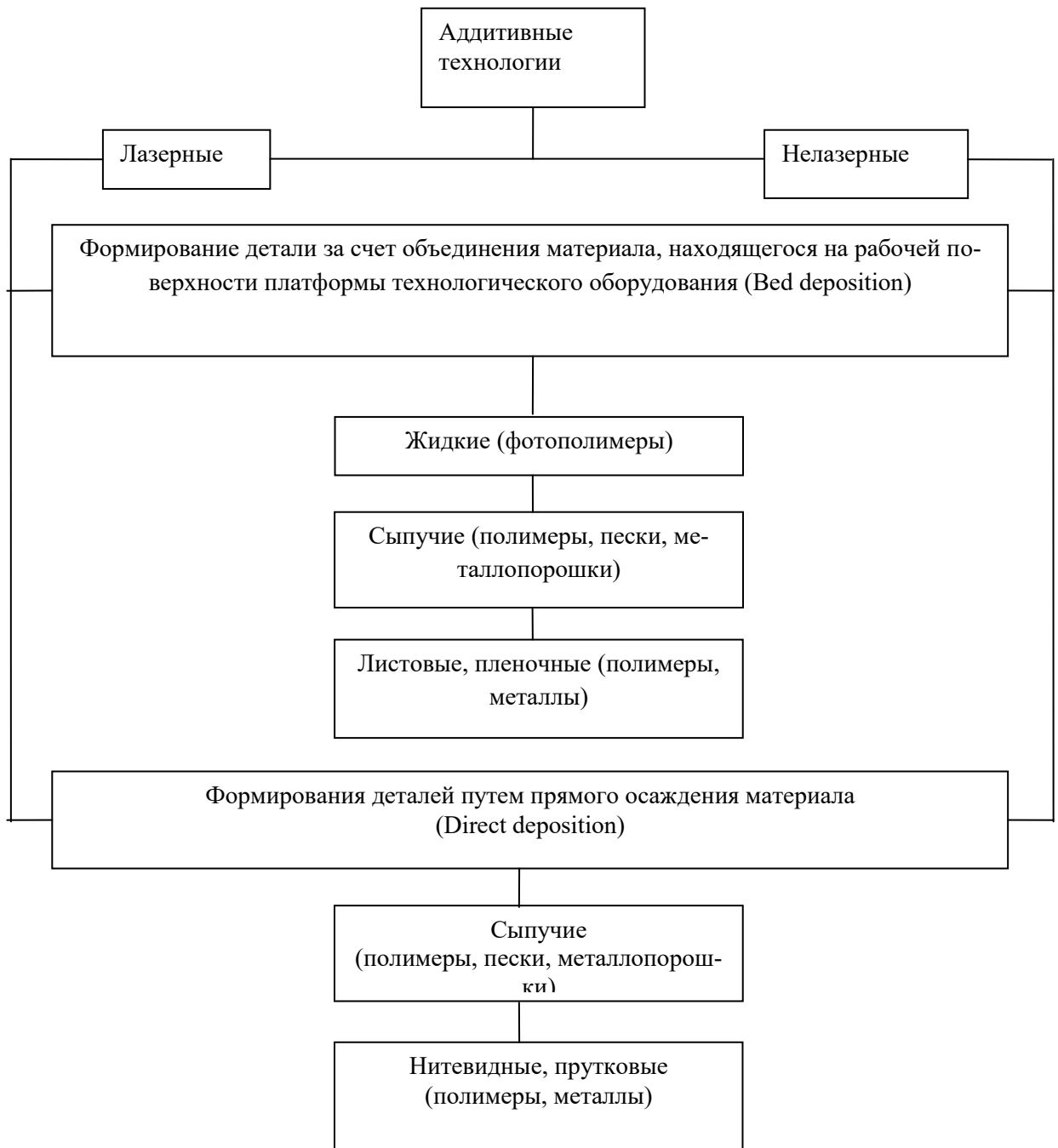


Рисунок 1.4. Классификация аддитивных технологий по ключевой технологии

По способу физического генерирования трехмерных объектов технологии АП можно разбить на три категории [60]:

- I. Процессы, основанные на жидком состоянии материалов.
- II. Процессы, основанные на твердом состоянии материалов.

III. Процессы, основанные на порошковых материалах.

Рассмотрим особенности основных разновидностей АТ.

Формирование детали за счет объединения материала, находящегося на рабочей поверхности платформы технологического оборудования (*Bed deposition* – *расположение на поверхности, отложение слоя*). Формирование первого слоя происходит за счет нанесения на поверхность рабочей платформы принтера определенной порции порошкового материала, далее происходит его разравнивание для формирования требуемой толщины. Затем, в соответствии с текущим сечением математической модели (CAD-модели), происходит выборочная (селективная) обработка порошка в сформированном слое для скрепления (сплавления или склеивания) частиц порошка. В процессе скрепления частиц положение плоскости построения не меняется. Часть строительного материала (порошок), которая лежит за пределами текущего сечения CAD-модели при этом не участвует в процессе скрепления (соединения), т.е. остается в созданном слое нетронутой. После построения единичного слоя рабочая платформа («*bed*») перемещается в вертикальном направлении на величину шага построения. Далее на ней формируют новый слой, и процесс циклически повторяется до полного построения изделия.

Если «скрепляющим» инструментом является лазер, то такая технология очень точно соответствует термину «селективный синтез» или «селективное лазерное спекание» (*Selective Laser Sintering*) и называется SLS-технология. Если в процессе формирования слоев соединение частиц происходит за счет сплавления (а не спекания) такая технология называется SLM-технология (*Selective Laser Melting* – селективное лазерное сплавление). Таким образом, в SLS- и SLM-технологиях, согласно классификации по ключевой технологии, изделие формируется за счет объединения частиц сыпучего материала, находящихся на рабочей поверхности платформы за счет теплового воздействия лазера и последующего охлаждения [56, 60, 61]. Другой разновидностью процесса «*Bed deposition*» является лазер-

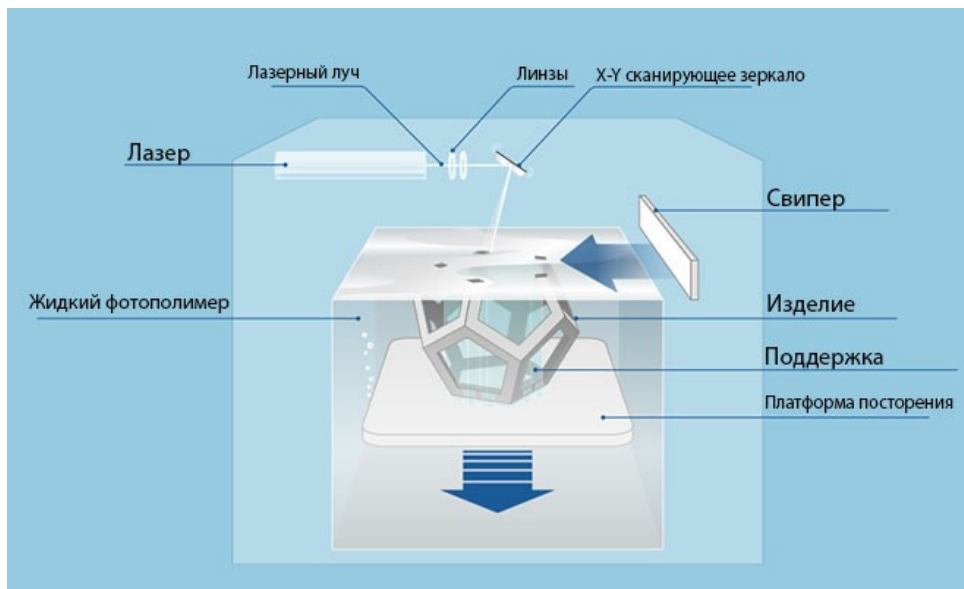
ная стереолитография (SLA-технология), при которой формирование слоя происходит за счет фотополимеризации жидкого строительного материала (фотополимера), т.е. источником отверждения является ультрафиолетовое излучение [56, 60-63]. На рис. 1.5 в качестве сравнения представлены схемы SLS- и SLA-технологий.

В табл. 1.3 представлен ряд технологий АП, которые также относятся к процессу «*Bed deposition*».

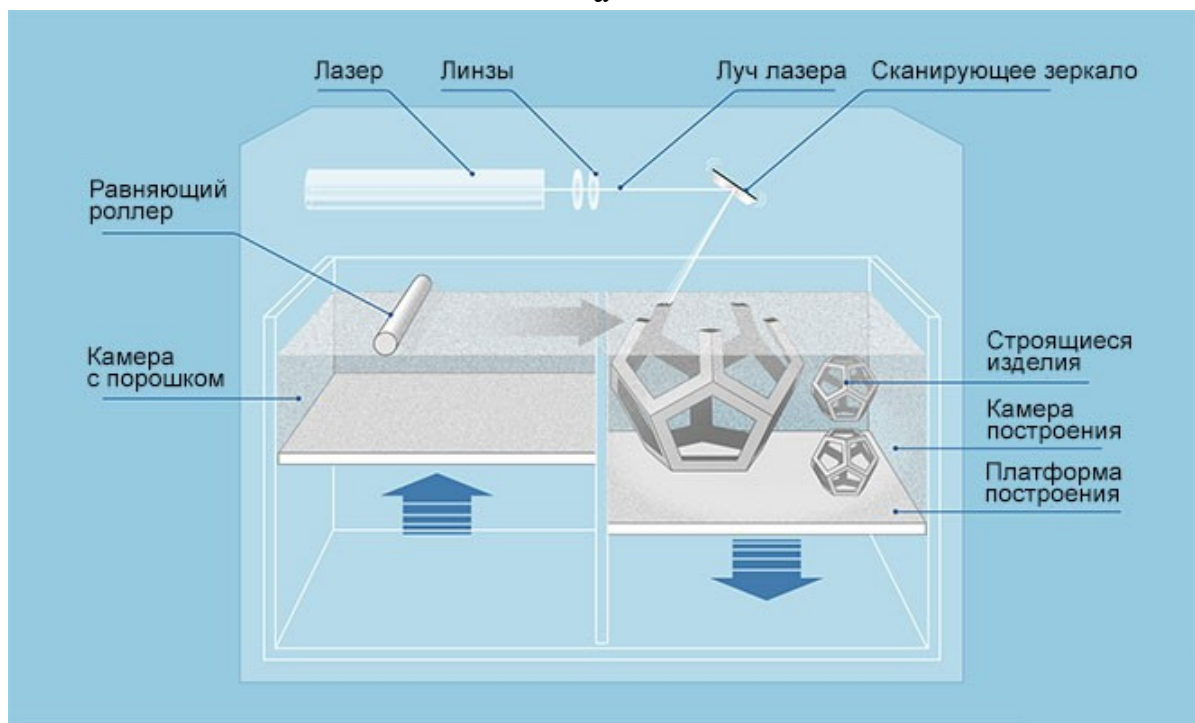
Таблица 1.3 -Технологии АП по процессу «*Bed deposition*»

| Аббревиатура | Полное название (перевод) | Компания |
|--------------|--|------------------------|
| DMLS | Direct Metal Laser Sintering (прямое лазерное спекание металла) | EOS, Германия |
| EBM | Electron Beam Melting (электронно-лучевая плавка) | Arcam, Швеция |
| SPLS | Solid Phase Laser Sintering (твердофазное лазерное спекание) | 3D Systems, США |
| I-J или BJ | Ink-Jet или Binder Jetting (струйная обработка связующего) | ExOne, 3D Systems, США |

Формирования деталей путем прямого осаждения материала (Direct deposition – прямое осаждение). В технологиях данного процесса слой строительного материала, в отличие от «*Bed deposition*», подается на рабочую поверхность одновременно с энергией в точку формирования слоя [64]. Согласно ГОСТ 57558-2017 [49] указанный принцип относится к процессам **прямого подвода энергии и материала (directed energy deposition)**: т.е. энергия от внешнего источника используется для соединения материалов путем их сплавления в процессе нанесения. При этом, источник энергии (например, лазер, электронный луч, плазма и др.) используют для полного или неполного расплавления наносимых материалов. Примером, наиболее распространенной технологии АП по процессу «*Direct deposition*» служит FDM-технология (Fused Deposition Modeling, дословно – изготовление модели наплавкой), заключающаяся в послойном наложении расплавленной полимерной нити и последующем затвердевании (рис. 1.6).



а



б

Рисунок 1.5- Технологические схемы изготовления моделей по технологиям АП: а – SLA; б – SLS

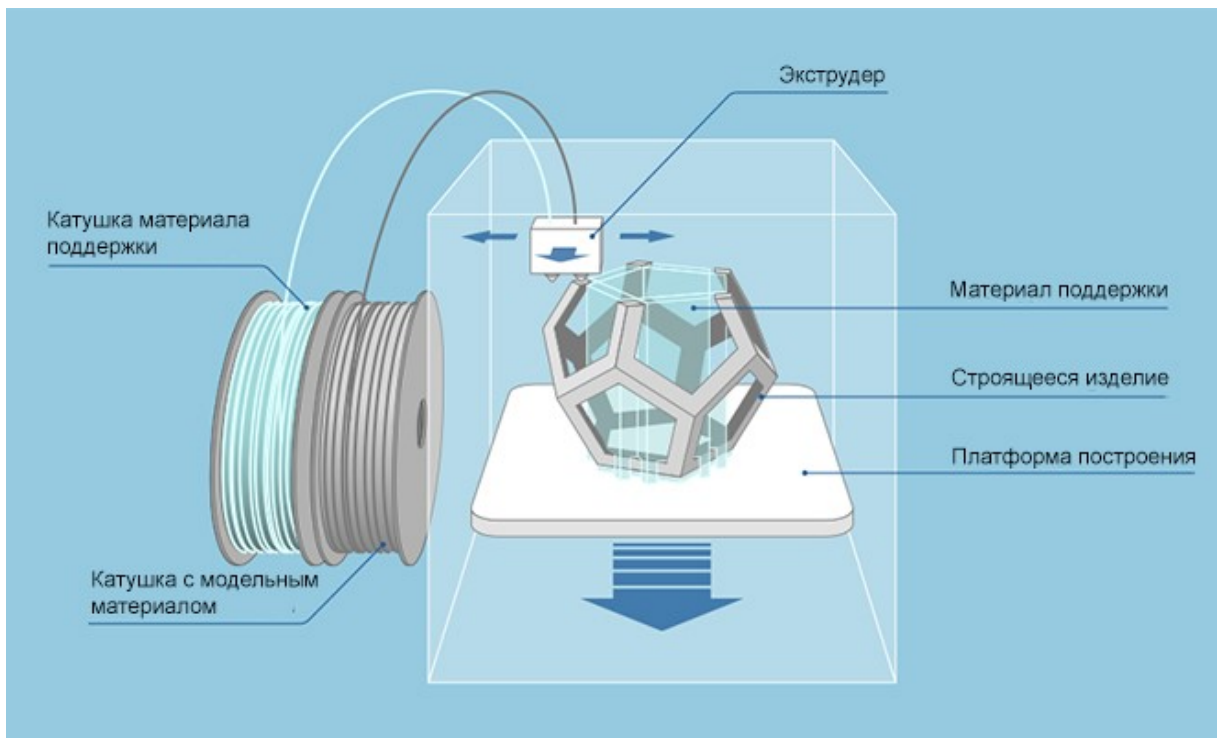


Рисунок 1.6 - Схема метода послойного наплавления по FDM-технологии

В последнее время развивается WAAM-технология (Wire and Arc Additive Manufacturing, дословно - послойная электродуговая наплавка металлической проволокой), суть которой состоит в том, что присадочный материал в виде металлической проволоки с заданной скоростью подается через сварочную головку, совершающую движение по заданной траектории, к месту формирования текущего слоя [65]. Под действием электрической дуги присадочный материал расплавляется, а при контакте с подложкой затвердевает, формируя твердый наплавленный слой. По сравнению с SLS-технологией, использующей металлические порошки в качестве расходного материала, преимущество WAAM-технологии заключается в том, что в изделии формируется плотная литая структура.

В табл. 1.3 представлен ряд технологий АП, которые также относятся к процессу «*Direct deposition*»

Таблица 1.3 - Технологии АП по процессу «Directdeposition»

| Аббревиатура | Полное название (перевод) | Компания |
|--------------|---|---------------------------------------|
| DMD | Direct Metal Deposition (прямое осаждение металлов) | РОМ, США |
| LENS | Laser Engineered NetShape (лазерное создание сетчатой формы) | Optomec, США |
| DM | Direct Manufacturing (прямое производство) | Sciaky, США |
| MJS | Multiphase Jet Solidification (многофазное струйное затвердевание) | Fraunhofer IFAM, Германия FDM, США |

По классификации ASTM [48] аддитивные технологии разделены на 7 категорий (табл. 1.4).

Таблица 1.4 - Классификация АТ по ASTM

| Наименование | Технология |
|---------------------------|--|
| Material Extrusion | «Выдавливание материала» или послойное нанесение расплавленного строительного материала через экструдер: в место построения модели через подогреваемый экструдер выдавливается пастообразный строительный материал: смесь металлического порошка и связующего – пластификатора. Полученную модель помещают в печь для удаления связующего и дальнейшего спекания |
| Material Jetting | «Разбрызгивание материала» или послойное струйное нанесение строительного материала: модельный материал – обычно фотополимер или воск, подается в зону построения через многоструйную головку |
| Binder Jetting | «Разбрызгивание связующего» или послойное струйное нанесение связующего на строительный материал: модельный материал – обычно фотополимер или воск, подается в зону построения через многоструйную головку |
| Sheet Lamination | «Соединение листовых материалов» или послойное формирование изделия из листовых строительных материалов: например, листы металлической фольги сваривают с помощью ультразвука, и затем избыток удаляют фрезерованием |

| Наименование | Технология |
|-----------------------------------|---|
| Vat Photopolymerization | «Фотополимеризация в ванне» или послойное отверждение фотополимерных смол: жидкие модельные материалы – фотополимерные смолы, например, SLA-технология, отверждающиеся под действием ультрафиолетового излучения |
| Powder Bed Fusion | «Расплавление материала в заранее сформированном слое» или последовательное формирование слоев порошковых строительных материалов и выборочное (селективное) спекание частиц строительного материала: многочисленная группа SLS-технологий, в которых в качестве источника тепла применяется лазер. К этой же категории относят такие технологии, как Arcam-технология, использующая электронный луч, и технология SHS (Selective Heat Sintering), в которой источником тепла являются ТЭНы (трубчатые электронагреватели). |
| Directed energy deposition | «Прямой подвод энергии непосредственно в место построения» или послойное формирование изделия методом внесения строительного материала непосредственно в место подвода энергии: строительный материал и энергия для его сплавления подводятся одновременно к месту построения изделия. Эти технологии предполагают применение машин, оснащенных системами подвода модельного (строительного) материала и энергии (обычно в виде сфокусированного лазерного излучения) |

В машиностроительных отраслях наибольшее распространение для решения различных задач получили следующие технологии АП, рассмотренные выше: SLA, SLS, DMLS, SLM, FDM, Ink-Jet.

В табл. 1.5 представлен анализ основных достоинств и недостатков наиболее распространенных технологий АП [59].

Правильный выбор той или иной технологии АП определяется по совокупности большого ряда критериев, включающих стоимость установок и расходных материалов, назначение 3D-изделий и условия их дальнейшей эксплуатации; серийности, квалификации персонала и т.д.

Таблица 1.5 - Достоинства и недостатки некоторых технологий АП

| Технология АП (аббревиатура) | Достоинства | Недостатки |
|------------------------------|---|--|
| FDM | Простота процесса и доступность оборудования; возможность собрать принтер самостоятельно; невысокая цена производства; доступность и невысокая стоимость расходных материалов | Повышенный расход материалов для формирования поддерживающих структур при печати нависающих элементов; необходимость финишной обработки после окончания печати; повышенная шероховатость поверхностей |
| SLS | Отсутствие поддерживающих структур; получение различных вариантов готовых изделий за счет применения металлических или керамических порошков; низкие напряжения и деформации в создаваемых объектах; возможность одновременной печати нескольких изделий в рабочей камере | Высокая стоимость оборудования и расходных материалов; большие энерго- и временные затраты на предварительный подогрев порошка и рабочей камеры; механическая обработка изделий после печати |
| SHS | Более низкая стоимость оборудования, чем при SLS-технологии; засвечивание всего слоя объекта целиком | Разрешение печати более низкое, чем при SLS-технологии; низкая энергоотдача нагревательного элемента; малый диапазон расходных материалов; необходимость последующей обработки изделий |
| SLM | Возможность создания изделий со множеством закрытых полостей, а также с большой площадью поверхности, но малым объемом; практически неограниченная область применения | Внутренние напряжения в изделии; сфероидизация для некоторых видов сплавов (например, на основе олова, меди, цинка, свинца); ограничение по использованию расходных материалов с высокой температурой плавления; высокая стоимость оборудования и расходных материалов |

Особенности применения аддитивных технологий для литейного производства. Аддитивное производство литых изделий из металлов и сплавов пока еще не составляет конкуренции литью, особенно, в серийном и крупносерийном производствах. Это обусловлено следующими основными причинами:

- высокая стоимость установок и расходных материалов;
- отсутствие нормативной базы, регламентирующей требования по структуре и свойствам к деталям, полученным АП (особенно, для деталей ответственного назначения);
- высокая стоимость деталей, получаемых АП;

- отсутствие системы подготовки кадров для АП.

Литейное производство является многофакторным и вариативным процессом. В зависимости от требований, предъявляемым к будущим деталям, литые заготовки (отливки) могут получаться различными способами литья: в песчано-глинистые формы (ПГФ), в формы из холодно-твердеющих смесей (ХТС), по выплавляемым моделям (ЛВМ), по газифицируемым моделям (ЛГМ), в кокиль (ЛК), литье под давлением (ЛПД) и т.д. [1]. Способ литья выбирается в зависимости от серийности отливок, требованиям по геометрической точности, массы, объема последующей механической обработки и т.д.

Тем не менее, технологии АП начинают находить экономически и технологически оправданное применение на различных стадиях подготовки литейного производства. В табл. 1.6 приведены примеры возможного применения технологий АП в литейном производстве в зависимости от способа литья [56, 67-69].

Таблица 1.6 - Применение технологий АП при подготовке литейного производства

| № п/п | Назначение | Способ литья | Технология АП |
|-------|---|--------------|-----------------------------|
| 1 | Изготовление литейной формы | ПГФ, ХТС | Binder Jetting Ink-Jet |
| 2 | Изготовление стержней | ПГФ, ХТС, ЛК | Binder Jetting Ink-Jet |
| 3 | Изготовление пресс-форм для получения разовых (восковых) моделей | ЛВМ | SLA |
| 4 | Изготовление разовых моделей, элементов литниково-питающих систем | ЛВМ, ЛГМ | Multi Jet Modeling (MJM) |
| 5 | Изготовление постоянных (многоразовых) моделей, элементов литниково-питающих систем | ПГФ, ХТС | FDM |
| 6 | Изготовление мастер-моделей для получения силиконовых форм | ЛВМ | SLA, FDM |

Для производства литейных разовых форм и стержней наиболее целесообразно использовать песчано-полимерную печать, суть которой заключается в послойном спекании плакированных частиц песка под действием энергии лазерного луча и послойного нанесения связующего состава. По сути, указанные технологии (Binder Jetting, Ink-Jet) являются разновидностью SLS- и MJM-технологий [56, 70-72]. Отличие от SLS-технологии за-

ключается в том, что в качестве модельного материала используется литейный (кварцевый или циркониевый) песок, который предварительно плакирован специальным полимером. Плакирование песчаных частиц производится в специальном смесителе: песок смешивают с жидким связующим так, чтобы каждая частичка песка была покрыта тонким слоем связующего. При печати формы или стержня тепловое воздействие лазера приводит к расплавлению связующего, и песчинки «склеиваются». После спекания получается, так называемая, «грин-модель». Грин-модель (зеленая модель, сырая модель) требует аккуратного обращения при очистке от несвязанных между собой частиц песка. Для закрепления поверхности очищенных мест их сразу обрабатывают вручную пламенем газовой горелки. Далее элементы формы или стержней помещают в прокалочную печь и производят (при температуре 300-350°C) окончательное отверждение элементов формы или стержня. Затем осуществляют сборку и подготовку к заливке расплавов по традиционному технологическому процессу. Отличие от ММ-технологии заключается в том, что в рабочую зону принтера впрыскивается не строительный материал, а связующий состав. В данном случае литейный песок подают и разравнивают на рабочей платформе послойно с шагом 0,2-0,4 мм (аналогично SLS-системам). Далее рабочий бункер с построенным элементом извлекают из принтера, модели очищают и подготавливают к сборке. При печати с такой разновидностью, дополнительной термообработки элементов песчаной формы или стержней не требуется.

Низкая шероховатость, высокая геометрическая точность позволяет использовать SLA-технологии в нескольких направлениях при подготовке литейного производства: изготовление пресс-форм для получения восковых моделей; изготовление мастер-моделей для последующего передела [56, 66]. Если восковая модель имеет ось симметрии или является телом вращения, то пресс-форму для ее получения можно получать по SLA-технологии. После получения пресс-формы, восковая модель получается по традиционной технологии: методом инъекции жидкого воскового состава в полость пресс-формы. В случае, когда восковая модель имеет сложную геометрию, из-за которой невозможно получить ее инъекцией воскового состава в пресс-форму с одной плоскостью разреза, используют другой подход. По мастер-модели, полученной методом SLA, изготавливают эластичную (силиконовую) форму. Для извлечения мастер-модели эластичную форму разрезают по образующей. Далее силиконовую форму

смыкают по линии разъема, и в образовавшуюся полость заливают воск. Такой подход можно использовать в мелкосерийном производстве отливок литьем по выплавляемым моделям. Если к моделям не предъявляются высокие требования по шероховатости поверхности, то мастер-модель можно изготовить по FDM-технологии.

Для непосредственного получения выплавляемых моделей средствами АП используется MJM-технология. Модели по данной технологии печатают на 3D-принтерах с использованием специального модельного материала, состоящего из светочувствительной смолы (фотополимер на акриловой основе) и литейного воска (содержание которого - более 50% по массе). Фотополимер является связующим компонентом. Материал многоструйной головкой послойно наносится на поверхность рабочей платформы, отверждение каждого слоя производится за счет облучения ультрафиолетовым лучом.

При использовании FDM-технологии для изготовления постоянных моделей отливок и элементов литниково-питающих систем для литья в ПГФ и ХТС необходимо на цифровой 3D-модели предусматривать уклоны для обеспечения их свободного извлечения из литейной формы, выполненной по традиционным технологиям. Кроме того, после получения печатных моделей требуется постобработка элементов, полученных по FDM-технологии.

Для обеспечения эффективного применения аддитивных технологий в литейном производстве инженер-технолог, в первую очередь, должен владеть основами литейных технологий, знать особенности каждого способа литья, уметь грамотно проектировать отливку и элементы литниково-питающих систем, знать литейные свойства сплавов (жидкотекучесть, линейную усадку) и т.д. С целью грамотного выбора вида аддитивной технологии и объекта для их применения необходимо знать серийность отливок, требуемые сроки изготовления, требования по классу точности, шероховатости поверхности, стоимость расходных материалов для аддитивного производства, стоимость обслуживания и амортизации оборудования для АП и т.д. [73].

Таким образом, умение сквозного проектирования технологического процесса, позволит эффективно использовать технологии АП в литейном производстве и обеспечивать конкурентность литой продукции по сравнению с традиционным подходом.

1.4 Управление структурой и свойствами литых изделий на основе явления структурной наследственности

Сохранение и трансляция структурной информации в системе «шихта-расплав-литое изделие» является природным свойством большинства известных металлов и сплавов на их основе. Данное свойство получило название «явление структурной наследственности в литых сплавах» (ЯСН). Приоритет в теоретическом обосновании и практическом использовании ЯСН принадлежит Самарской школе литейщиков (работы В.И. Никитина, К.В. Никитина, И.Ю. Тимошкина и др.) [74-76]. В последнее время все больше внимания уделяется исследованиям эффекта структурной наследственности в алюминиевых сплавах. Это обусловлено тем, что литые изделия из алюминиевых сплавов имеют существенную долю в машино- и автомобилестроении, аэрокосмической отрасли [77, 78].

Применение ЯСН на практике позволяет использовать в составе шихты повышенную долю различных отходов, что, с одной стороны, снижает себестоимость литья, а, с другой, обеспечивает качество, так называемых, «вторичных» алюминиевых сплавов на уровне первичных [79-83].

Закладка положительной структурной информации может осуществляться не только за счет вовлечения в состав шихты определенной доли шихтовых материалов с дисперсной структурой (например, деформированные отходы, Д-шихта) и модифицирования мелко- и микрокристаллическими модификаторами, но и за счет различных физических воздействий, оказываемых на расплав [81, 83, 84-86].

Изучением ЯСН и влияния структуры шихтовых материалов на строение и структурно-чувствительные свойства жидкой промышленной стали активно занималась Уральская школа литейщиков под руководством Б.А. Баума [87-90]. На основании гистерезиса структурно-чувствительных свойств промышленных марок был сделан важный вывод о влиянии предыстории (происхождения) расплава, т.е. структуры исходной шихты.

Стальные образцы, имеющие повышенные механические свойства, после расплавления в жидком состоянии обладали более высокой вязкостью, меньшими температурами гистерезиса, и пониженными значениями электросопротивления. Влияние на строение расплавов, а, следовательно, и на их структурно-чувствительные свойства оказывал способ выплавки шихтовых материалов. Характерно, что расплав, приготовленный из зоны столбчатых кристаллов стального слитка, имел пониженные значения вязкости по сравнению с расплавом, полученным из центральной и корковой зон того же слитка.

С позиции кластерной природы строения микрогетерогенных расплавов считается, что полное разрушение кластеров и устранение наследственного влияния шихтовых материалов наступает при температуре кипения сплава [92]. Однако, считается, что для снижения влияния отрицательной структурной наследственности достаточно перегревов до температур $1,2-1,6T_{пл}$ в зависимости от природы расплавов [92]. На основании собственных экспериментов авторы предложили два метода устранения отрицательной наследственности в сплавах системы Fe-C:

- экстенсивный (замена чушковых чугунов, изменение состава шихты, корректировка технологии производства и химических составов сплавов);
- интенсивный (применение термовременной обработки в печном агрегате, микролегирование и модифицирование, электромагнитное или вибрационное воздействия).

Микронеоднородность промышленных сплавов, вероятно в большей мере, обусловлена наличием в расплавах энергетически неравноценных межатомных связей, которые, в свою очередь, определяются сложным химическим составом промышленных сплавов [93]. Атомные группировки с наиболее сильным взаимодействием частиц могут сохраняться в расплаве значительно дольше и при больших перегревах, чем группы атомов со слабым взаимодействием. Чугуны и стали являются системами, которые образованы различными по природе элементами (Fe – истинный металл; C –

неметалл). Это определяет характер сильного межчастичного взаимодействия в жидком состоянии и длительность сохранения унаследованной расплавом структурной информации.

Применение в составе шихты добавок доменных чугунов, пакетированной листовой стали, различных видов возврата в различных соотношениях в производстве отливок из чугунов с шаровидным графитом (ЧШГ) оказывает существенное влияние на величину и характер распределения шаровидных включений графита, а следовательно, и на механические свойства отливок, полученных из одной и той же марки ЧШГ [94-96]. Сильное наследственное влияние качества доменных чугунов проявляется и при получении чугунов с пластинчатым графитом (ЧПГ) [97].

Проявление отдельных закономерностей ЯСН в сталях за счет корректировки их шихтовых составов исследовалось в работах [98-103].

Повышение качества литых изделий за счет использования основных закономерностей ЯСН подтверждается на сплавах различной природы: жаропрочных [104], цинковых [105], медных [106, 107] и т.д.

Следует отметить, что в силу своей специфики литье по выплавляемым моделям характеризуется невысокими и низкими скоростями охлаждения при кристаллизации сплавов в огнеупорных керамических формах. Следовательно, использование основных закономерностей ЯСН при литье по выплавляемым моделям является актуальным направлением и является дополнительным резервом для повышения качества литой продукции [108].

1.5 Цели и задачи исследования

Внедрение в процесс ЛВМ перспективных технологий аддитивного производства сдерживается необходимостью применения дорогостоящего оборудования на стадии получения моделей и модельных блоков. Отсутствуют материалы для АП, имеющие технологические свойства максимально приближенные к современным модельным составам применяемым в литье по выплавляемым моделям; отсутствуют систематизированные данные по технологическим свойствам полимерных материалов и по процессам, протекающим в системе «модель (полученная средствами АП)-огнеупорная керамическая форма». Недостаточно комплексных исследований, охватывающих все основные технологические этапы процесса получения моделей средствами АП, включающих в себя изготовление моделей и подготовки огнеупорных керамических форм к литью.

На основании проведенного литературного обзора поставлена следующая основная цель: 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 необходимо решить следующие основные 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.

2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Общая методика исследования. Объекты исследования

Решение поставленных задач и достижение цели работы обеспечивалось выполнением исследовательских этапов согласно разработанной схеме исследований (рис. 2.1). Выполнение исследовательских этапов во взаимосвязи с технологическим процессом литья по выплавляемым моделям способствовало разработке технологических рекомендаций и их опытно-промышленной апробации на каждом технологическом этапе.

Объектами исследования являлись модельные составы (рис. 2.2) и полимерные материалы для аддитивного производства (рис.2.3) различных видов и производителей, полиэтиленовые воски различных видов (табл. 2.3).



Рисунок 2.1 - Схема методики исследования

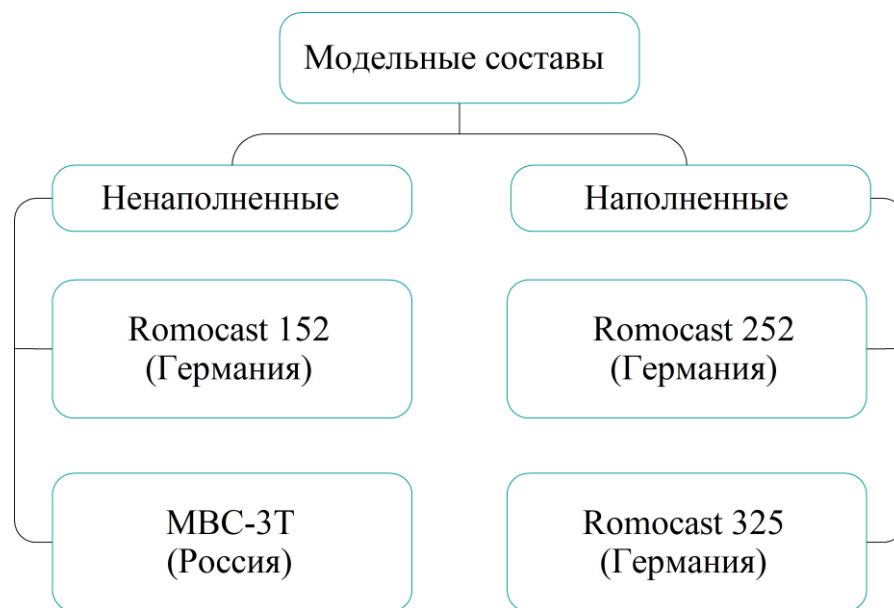


Рисунок 2.2 - Исследуемые модельные составы

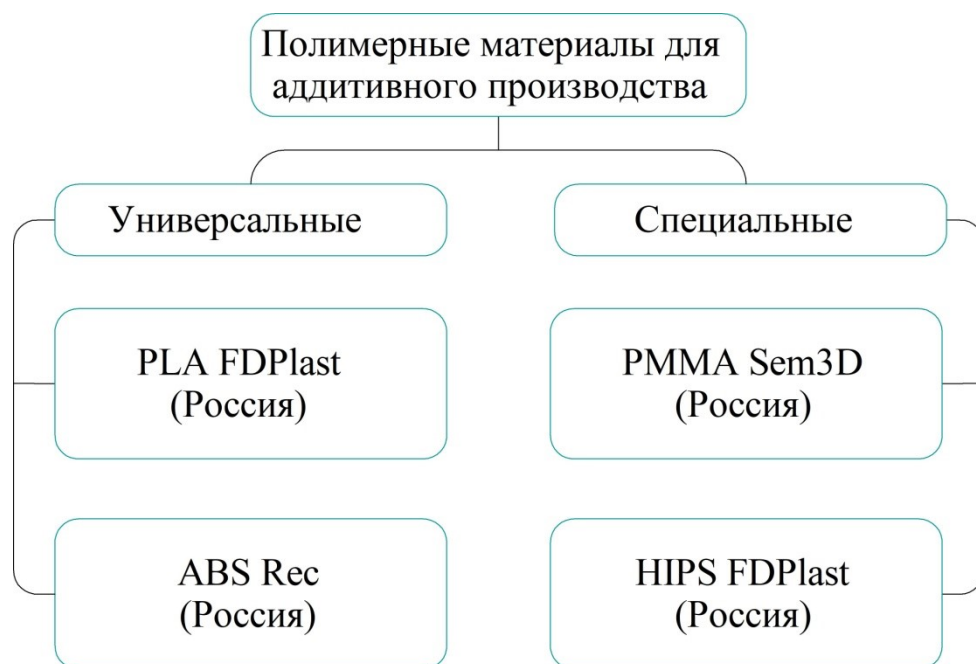


Рисунок 2.3 - Исследуемые полимерные материалы для АП

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

Таблица 2.1 – Свойства исследуемых модельных составов

| Группа | Марка | Содержание наполнителя, % | Вид наполнителя | Свободная линейная усадка при запрессовке, % | Температура каплепадения, °С | Остаток после прокаливания, max % | Вязкость при 100° С, мПа×с |
|------------------|--------------|---------------------------|-----------------|--|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Ненаполненный | Romocast 152 | - | - | Не указано | 67 – 71 | 0,05 | 120 – 180 |
| | MBC-3T | - | - | 1,1-1,5 | 76,9 | 0,02 | 784 |
| Наполненный воск | Romocast252 | 35 | XLPS* | Не указано | 67 – 72 | 0,05 | 300 – 600 |
| | Romocast 325 | 30 | | Не указано | 73 – 82 | | 200 – 500 |

XLPS* - высокомолекулярный полиэтилен

Видно, что восковые модельные составы в зависимости от группы различаются по температурам каплепадения и вязкости. Ненаполненные модельные составы характеризуются малым процентом остатка после про-

каливания. Для модельных составов зарубежного производства отсутствуют данные по свободной линейной усадке.

В табл. 2.2 представлены основные свойства исследуемых полимерных материалов для аддитивного производства

Таблица 2.2 – Свойства исследуемых полимерных материалов

| Марка | Температура экструзии, °С | Температура размягчения, °С | Линейная усадка, % | Прочность на изгиб, МПа | Прочность на растяжение, МПа | Плотность, г/см ³ |
|-------|---------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|
| PLA | 200-220 | 50 | 0,2-0,5 | 94,2 | 34,8 | 1,25 |
| PMMA | 225-245 | 113 | Не указано | 110 | 72 | 1,18 |
| HIPS | 220-235 | 96 | Не указано | 37,6 | 16,4 | 1,03 |
| ABS | 240-270 | 103 | 0,8-1,2 | 65,4 | 29,6 | 1,05 |
| SBS | 225-245 | Не указано | Не указано | 3,4 | 19,7 | 0,95 |

Для компаудирования модельных составов с целью получения филаментов применялись пластифицирующие агенты на основе полиэтиленовых восков высокой вязкости. В табл. 2.3 представлены основные свойства полиэтиленовых восков.

Таблица 2.3 – Свойства полиэтиленовых восков

| Группа | Марка | Температура каплепадения, °С | Температура плавления, °С | Твердость по пенетрации при 25 °С, 10 ⁻¹ мм | Плотность при 25 °С, г/см ³ | Кислотное число, мгКОН/1мг | Вязкость при 140° С, мПа×с |
|--------------|----------|------------------------------|---------------------------|--|--|----------------------------|----------------------------|
| Неокисленные | ПЛВН-4Б | 104-109 | 102-107 | 2 | 0,91-0,93 | - | 450-600 |
| | ПЛВН-6Б | 104-110 | 102-108 | 2 | | - | 600-800 |
| Окисленные | ПЛВО-112 | 110-116 | 108-114 | 1 | 0,95-0,99 | 12-18 | 1000-2500 |
| | ПЛВО-272 | 102-109 | 101-108 | 2 | | 18-24 | 500-1000 |

В табл. 2.4 приведены основные материалы, используемые для изготовления огнеупорных керамических форм (ОКФ).

Таблица 2.4 – Основные материалы для изготовления ОКФ

| Наименование материала | ГОСТ, ТУ | Характеристика материала |
|--------------------------|---------------------------|---|
| Плавленый кварц «Кефрон» | ТУ 5931-002-71435339-2004 | фракция: менее 0,063мм; 0,125-0,315мм; 0,315-0,43 мм. |
| Песок кварцевый 5КЗО302 | ГОСТ 2138-91 | фракция: 0,125-0,315мм; 0,315-0,43 мм. |
| Связующее «Сиалит-20С» | ТУ 2145-003-438/1938-97 | Плотность 1,133-1,138 г/см ³ |

2.2 Основное оборудование и методы исследования свойств материалов

Определение линейной усадки восковых составов и полимерных материалов для аддитивного производства. Определение свободной усадки восковых составов при затвердевании ($\alpha_{мс}$, %) производили по следующей методике. Навеску модельного состава массой 500 г расплавляли в восковом инжекторе Logimes 2500D при температуре 80⁰С. Жидкий модельный состав запрессовывали ручным способом при температуре 75⁰С в специальную пресс-форму конструкции ВНИИТМАШ (рис. 2.4). Размеры рабочей полости формы: 10×10×150 мм. После затвердевания модельного состава пресс-форму разбирали, извлекали образец. Измерение длины образцов производили с помощью электронного штангенциркуля Qstexpress (точность измерения 0,01 мм) через 24 ч после затвердевания. Из каждой марки модельного состава получали по 5 образцов. Нагрев образцов до температур выше +20⁰С производили в сушильном шкафу, задавая требуемый температурный режим с помощью ПИД-регулятора.

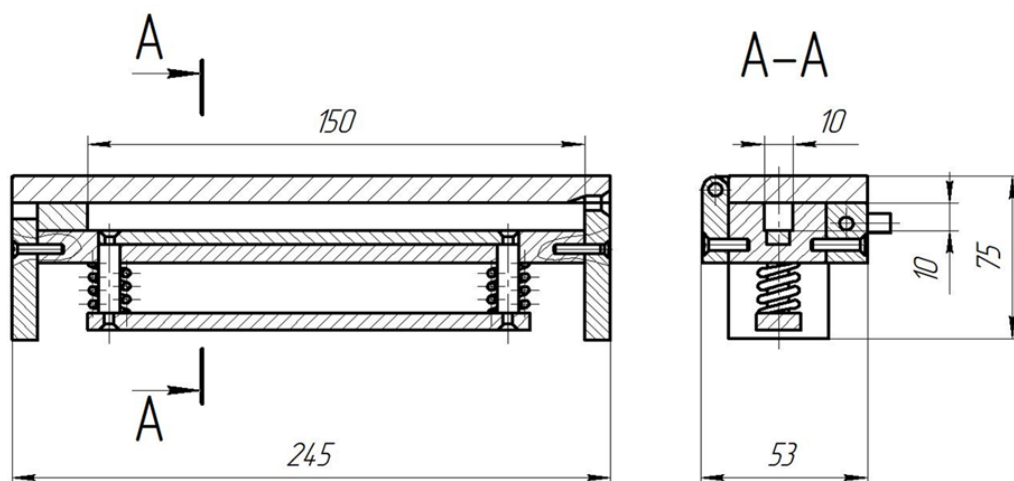


Рисунок 2.4 - Пресс-форма для получения образцов для определения свободной линейной усадки конструкции ВНИИТМАШ

Свободную линейную усадку(%) образцов вычисляли по формуле:

$$\alpha_{\text{мс}} = [(L_{\text{п}} - L_{\text{об}}) / L_{\text{п}}] \times 100, \quad (2.1)$$

где: $L_{\text{п}}$ - длина полости формы (150 мм); $L_{\text{об}}$ – длина образца, мм.

Анализ формулы (2.1) показывает, что она не позволяет выявить характер и величину, на которую изменяется длина образца в зависимости от температуры окружающей среды. Для определения характера и степени изменения длины $\Delta L_{\text{МС}}$ образцов (%) в зависимости от температуры окружающей среды предложено выражение:

$$\Delta L_{\text{МС}} = [(L_2 - L_1) / L_1] \times 100, \quad (2.2)$$

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

Отрицательные значения $\Delta L_{\text{МС}}$ будут означать уменьшение длины (усадку) образцов при их охлаждении ниже (+20)⁰С, положительные значения $\Delta L_{\text{МС}}$ характеризуют увеличение длины (тепловое расширение) образцов при их нагреве выше (+20)⁰С относительно исходного размера.

Определение свойств полимерных материалов. С целью определения зольного остатка А (%) в условиях прямого выжигания полимерных моделей полученных средствами АП из ОКФ разработан тестовый образец (рис 2.5), 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 [109]. Образцы печатали на 3D-принтере модели «DesignerXL» (Рис.2.6) по FDM-технологии с варьируемой степенью заполнения (плотность печати) 5-15-30 (%) для анализа влияния внутренних опорных структур модели на величину зольного остатка. Массовая доля зольного остатка определялась с помощью аналитических весов AND-VM 252G.

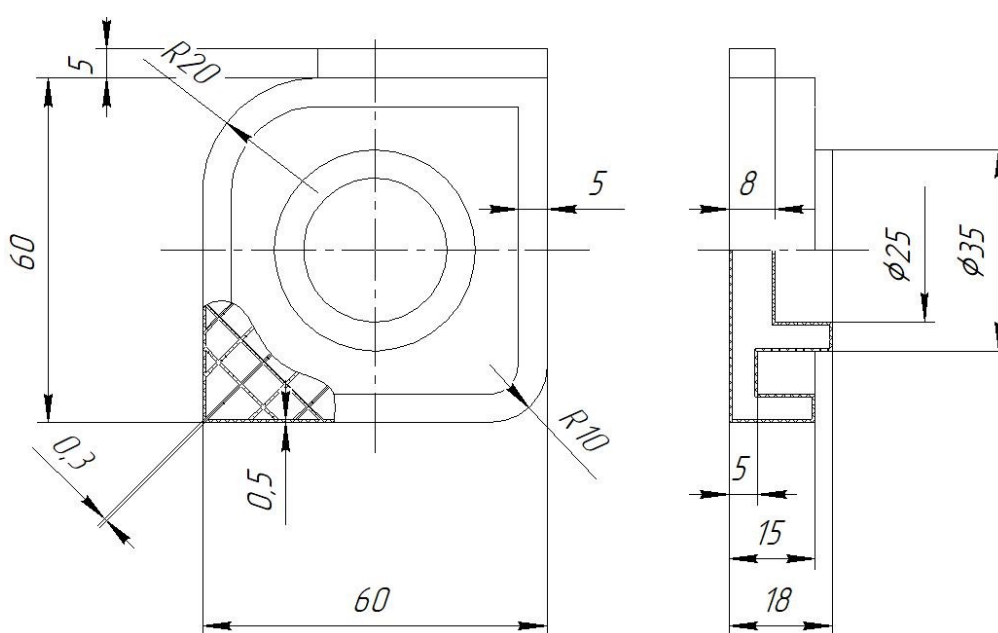
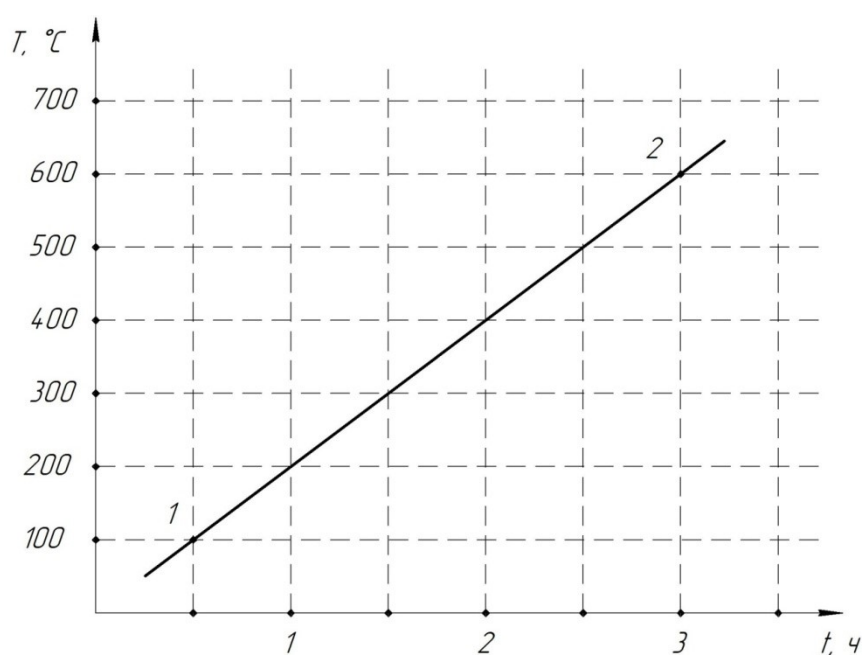


Рисунок 2.5 - Конструкция тестового образца, получаемого средствами АП, для определения зольного остатка в ОКФ в условиях прямого выжигания



Рисунок 2.6 - 3D-принтер «DesignerXL» компании Picaso

На полученные образцы носилось 4 слоя покрытия на основе плавле-ного кварца, 5-ый формировался без обсыпки и являлся закрепляющим слоем. Размер фракции огнеупорного материала: в первом слое – 0,2 мм; во втором и последующих – 0,4 мм. Сушка первого (формирующего) слоя длилась 4 ч, последующие слои формировались с интервалом в 2 ч. Про-калка керамических блоков проводилась при температуре 600 °С по приве-денному режиму на рис. 2.7.



1- Загрузка керамических блоков; 2 – извлечение керамических
блоков

Рисунок 2.7 - Режим прокаливания ОКФ

Расчет зольного остатка в условиях прямого выжига полимерных ма-териалов производили по формуле:

$$A = [M_{30} / M_{06}] \times 100\%, \quad (2.3)$$

где: M_{30} - масса зольного остатка в ОКФ после прокаливании, г; M_{06} – масса образца, г

Определение усадки полимерных материалов для аддитивного производства ($\alpha_{\text{пм}}$, %) осуществляли путем получения образцов с вариативной плотностью заполнения 5, 15 и 30% (рис.2.8) на 3D-принтере «DesignerXL».



а - модель заполнения 5%; б - модель заполнения 15%;
в - модель заполнения 30%

Рисунок 2.8 - Визуализация заполнения в программном комплексе PoligonXV1.4:

Технологические параметры аддитивного производства моделей приведены в табл.2.5

Таблица 2.5 – Технологические параметры АП

| Диаметр сопла, мм | Высота экструдруемого слоя модели H_c , мм | Скорость печати внешних периметров, мм/с | Скорость печати внутренних периметров, мм/с | Скорость печати внутренних структур, мм/с |
|-------------------|--|--|---|---|
| 0,5 | 0,2 | 40 | 60 | 80 |

Свободную линейную усадку полимерных моделей для аддитивного производства вычисляли по формуле:

$$\alpha_{\text{пм}} = [(L_{\text{мм}} - L_{\text{по}}) / L_{\text{по}}] \times 100, \quad (2.4)$$

где: $L_{\text{мм}}$ - длина математической модели образца, мм; $L_{\text{по}}$ - длина образца полученного с помощью машин аддитивного производства, мм.

Определение длины полученных образцов производили через 1, 30 и 60 минут после окончания процесса аддитивного производства. Определение влияния температуры экструзии при печати на величину усадки полимерных материалов производили по формуле (2.3) на образцах, полученных в интервалах температур печати согласно паспорту материалов.

Синтез воско-полимерных модельных составов производили по следующей методике. Навеску модельного состава массой 300 г расплавляли в электрошкафу при температуре 85⁰С. Для ввода пластифицирующих компонентов на основе синтетических восков осуществляли перегрев модельного состава до температур 120±5⁰С с выдержкой до полного растворения пластифицирующих агентов. Получение гранулированной структуры материалов для последующего использования в процессах экструзии и прессования осуществлялась путем капельного орошения МС на водоохлаждаемую медную поверхность для интенсификации процессов кристаллизации.

Массовая доля пластифицирующих агентов на основе полиэтиленовых восков высокой вязкости определялась по методу аддитивности с определением теоретической температуры каплепадения $T_{\text{впс}}$ по формуле:

$$T_{\text{впс}} = T_{\text{к}}^{(\text{МС})} \times k_{\text{МС}} + T_{\text{к}}^{(\text{ПВ})} \times k_{\text{ПВ}} \quad (2.5)$$

где: $T_{\text{к}}^{(\text{МС})}$ – температура каплепадения исходного модельного состава, °С; $T_{\text{к}}^{(\text{ПВ})}$ – температура каплепадения пластифицирующих агентов на основе полиэтиленовых восков, °С; $k_{\text{МС}}$ и $k_{\text{ПВ}}$ – доля соответствующего компонента в составе, принятого за 1.

Получение пруткового материала (филамента) пригодного для применения в машинах аддитивного производства по FDM-технологии осуществляли с помощью экструзионной линии WellzoomV2 (рис.2.9). Характеристики экструзионной линии представлены в таблице 2.6.

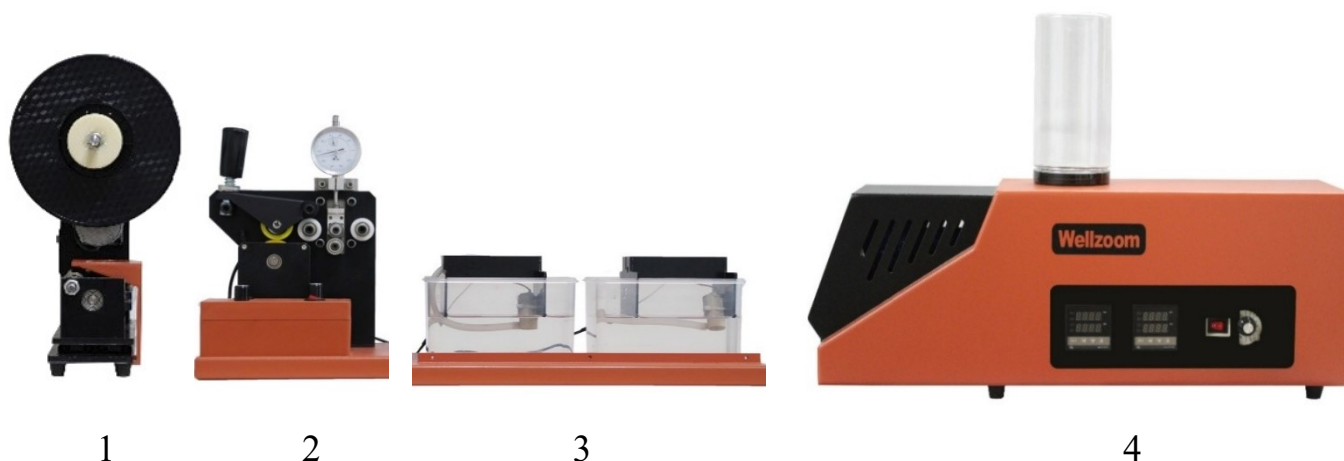


Рисунок 2.9 - Экструзионная линия Wellzoom V2:

1-станция намотки; 2-станция контроля пруткового материала; 3-станция охлаждения; 4- блок экструдера.

Таблица 2.6 – Характеристики экструзионной линии Wellzoom V2

| Характеристика | Показатель |
|---|--|
| Максимальная скорость шtrandг-прессования | 4400 мм/мин (1,75 мм, АБС-пластик) |
| Используемые материалы | ABS, PLA, PVA, PS ит.д |
| рабочая температура | до 320 °С |
| температурная зона | 3 температурных зоны (независимый контроль) |
| точность контроля температуры | ± 1 °С |
| точность нити | 1,75 мм, + / -0,05; 3 мм, + / -0,1 |
| Мощность | 220 Вт-440 Вт |

Методика исследования коэффициента теплового линейного расширения (КТЛР, α_L) материалов для АП. КТЛР определяли на экспериментальной установке ЭУ-1КТЛР (рис. 2.10).

Образец прямоугольного сечения (габариты математической модели 10×10×150 мм) устанавливали между кварцевыми трубками. Включали нагревательное устройство. Показания температуры фиксировали с мультиметра, непосредственно подсоединенного к термопаре. Термопара соприкасалась непосредственно с исследуемым образцом. Показания с

устройства измерения часового типа фиксировали через каждые $5 \div 10^\circ\text{C}$ в зависимости от типа материала. При достижении максимального значения температурного интервала образец подвергается термической деформации (рис.2.11), после которой получение точного значения размера невозможно.

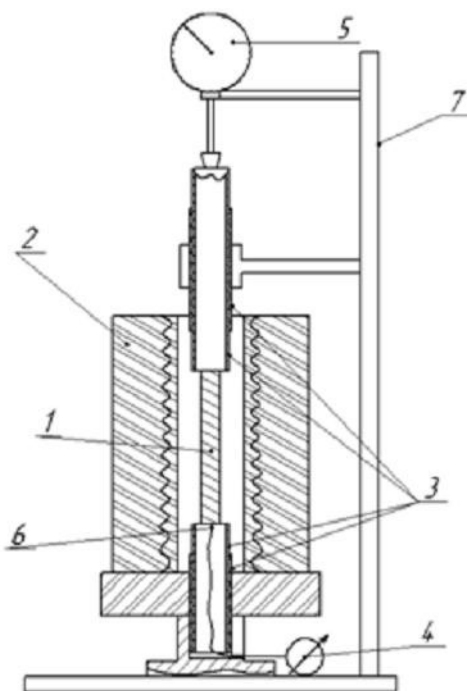


Рисунок 2.10 - Экспериментальная установка ЭУ-1КТЛР для измерения коэффициента теплового линейного расширения: 1- образец; 2- электрический нагреватель; 3- кварцевые трубки; 4- мультиметр; 5- устройство измерения перемещения часового типа; 6- термопара; 7- штатив

Коэффициент теплового линейного расширения α_L образцов рассчитывали по формуле:

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

где l_0 – длина образца, мм; $\Delta l = l_n - l_0$, l_n – длина образца после нагрева, l_0 – длина образца при температуре 23°C , мм; $\Delta T = T_1 - T_2$, T_1 - текущая температура образца, T_2 - начальная температура образца (23°C), $^\circ\text{C}$.



Рисунок 2.11 – Исследуемые образцы после термической деформации

Механические свойства сталей определяли на разрывной машине английской фирмы Testometric модели FS 150 kN AX в центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ) ОАО «Металлист-Самара» (г. Самара).

Моделирование процессов заполнения форм и затвердевания расплавов производили с использованием лицензионного пакета системы автоматизированного моделирования литейных процессов LVMFlow (версия 4.6r2) и САМ ЛП ПОЛИГОН на базе лаборатории «Реверс-инжиниринг и аддитивные технологии» ЦЛТ СамГТУ.

Приготовление суспензии для формирования ОКФ по восковой модели осуществляли в специальной емкости, в которую заливали требуемое количество связующего «Сиалит-20С». При постоянном перемешивании вводили огнеупорный наполнитель (кристаллический или плавленый кварц). После получения готовую суспензию выдерживали в течение часа. Вязкость контролировали вискозиметром ВЗ-4 (ГОСТ 9070-75, погрешность – не более 3%). Перед нанесением на восковую модель суспензии, ее перемешивали в течение 3-5 мин. Нанесение огнеупорной суспензии производили окунанием образцов. После стекания излишков суспензии с образцов вручную производили обсыпку зернистым огнеупорным материалом (кристаллическим или плавленым кварцем). После нанесения первого слоя осуществляли его сушку на воздухе в течение 24 ч при температуре

окружающей среды. Далее операции повторяли, формируя требуемое количество слоев. Второй и последующие слои сушились в течение двух часов. После формирования огнеупорной керамической формы производили выплавление модельного состава в горячей воде. Далее осуществляли прокатку керамических образцов в печи при температуре $900 \pm 5^{\circ}\text{C}$ в течение часа.

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

- приготовление огнеупорной суспензии для облицовки модельного блока (связующее «Сиалит 20С», огнеупорный наполнитель - плавленый кварц «Кефрон»);
- облицовка модельного блока в пескосыпе псевдокипящего слоя модели FG-FSJ500;
- выплавление модельного состава в паровом котле модели КПЭМ 100/9;
- прокатка огнеупорных керамических форм в прокаточной печи модели ПС 51.41.52.

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

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОСКО-ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

3.1. Исследование свободной линейной усадки модельных составов различных видов

В настоящее время для изготовления выплавляемых моделей отливок и элементов литниково-питающих систем в производстве фасонных отливок литьем по выплавляемым моделям используют различные марки восковых модельных составов, которые характеризуются разнообразными технологическими свойствами. Для выбора того или иного вида воскового состава, как правило, необходимо учитывать конструктивные особенности и требования, которые предъявляются к геометрической точности будущей отливки, а также технологии изготовления восковых моделей.

Наиболее важными технологическими свойствам большинства модельных составов являются следующие: точное воспроизведение конфигурации рабочей полости пресс-формы; необходимые твердость и прочность после затвердевания в пресс-форме; стабильность размеров при изменении температуры окружающей среды; минимальную и стабильную усадку при затвердевании; невысокую температуру плавления и хорошую жидкотекучесть и т.д. [1, 3-5]. Как правило, в сопроводительной документации указываются температура каплепадения, предел прочности при статическом изгибе и плотность при комнатной температуре, свободную линейную усадку, зольность восковых модельных составов. Однако, кроме этого необходимо также знать склонность модельного состава к изменению линейных размеров при постоянной температуре окружающей среды, а также в зависимости от ее изменения. Это во многом будет определять обеспечение геометрической точности будущей отливки.

В Центре литейных технологий СамГТУ исследовали свободную линейную усадку $\alpha_{мс}$ исследуемых модельных составов при постоянной тем-

пературе $(+20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ [9, 110, 111]. Замеры длин образцов производили через 1 и 24 часа после их затвердевания и извлечения из пресс-формы.

Установлено, что наибольшей свободной линейной усадкой обладал ненаполненный модельный состав марки МВС 3-Т (рис. 3.1). Минимальную линейную усадку имеют модельные составы марок Romocast 252 и 325, относящиеся к наполненным модельным составам. При этом, усадочные процессы протекают в образцах в течение 24 ч, что, вероятно, объясняется длительностью процессов полимеризации и низкой теплопроводностью восковых модельных составов.

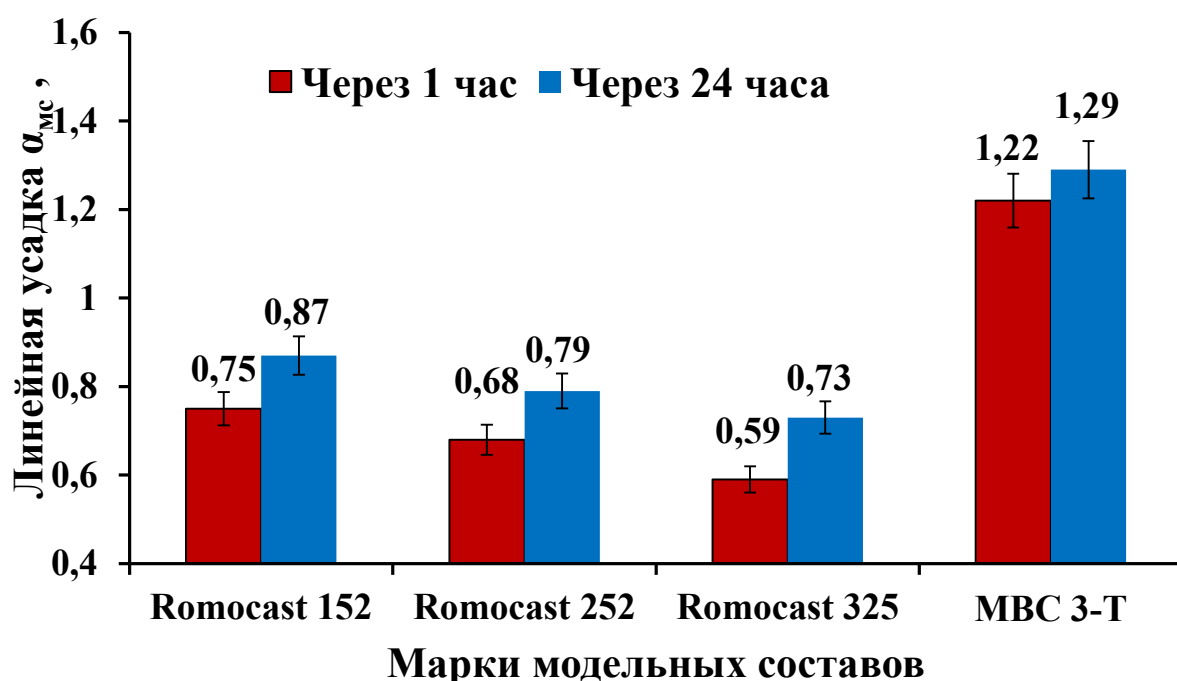


Рисунок 3.1 - Влияние времени выдержки модельных составов после затвердевания на свободную линейную усадку образцов

Обеспечение геометрической точности литого изделия будет во многом определяться технологической усадкой модельных составов $\alpha_{\text{МС}}$, которая зависит от физических свойств восковых модельных составов и размеров испытываемого образца [5]:

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

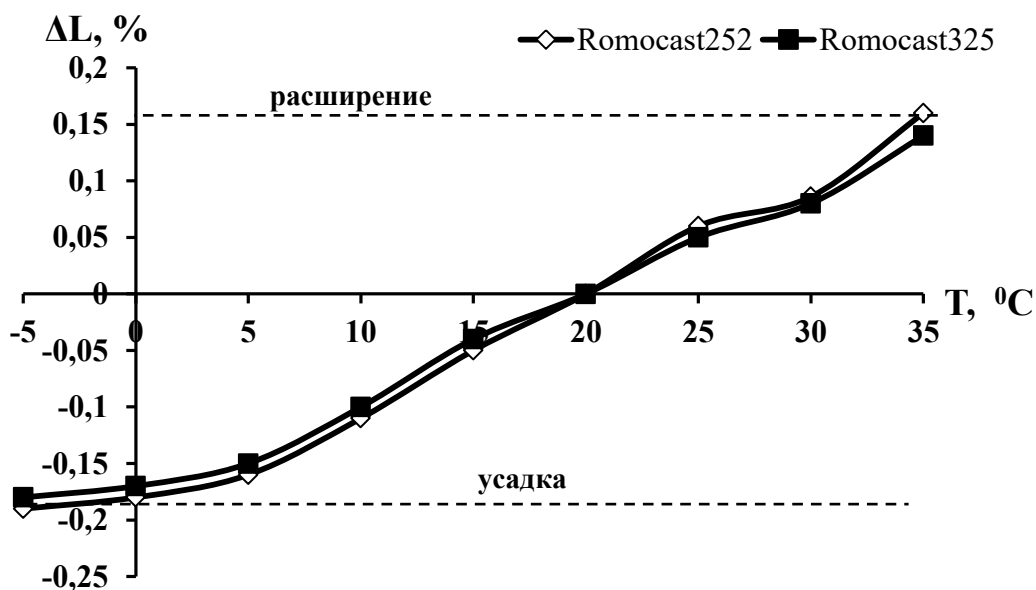
где α_C – свободная линейная усадка, %; σ_{TP} – касательные напряжения, возникающие в восковой модели при ее усадке, Па; E_{MC} – модуль упругости модельного состава при растяжении; l – длина восковой модели, см; b – длина стороны поперечного сечения восковой модели; m – показатель степени, учитывающий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

Из выражения (3.1) следует, что наиболее существенное влияние на технологическую усадку α_{MC} оказывает свободная линейная усадка α_C воскового модельного состава определенной марки. Следовательно, наибольшей технологической усадкой будут характеризоваться восковые модели, изготовленные из ненаполненных модельных составов марок Romocast152 и МВС 3-Т, для которых установлены повышенные значения α_{MC} (рис. 3.1).

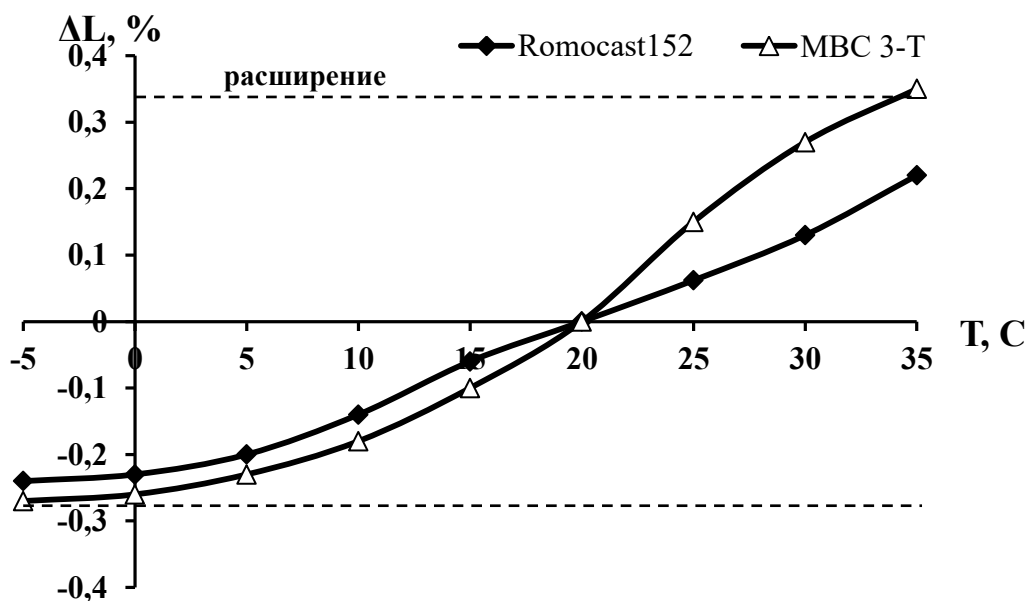
На рис. 3.2 представлено влияние температуры окружающей среды на характер изменения длины образцов в зависимости от марки восковых модельных составов. Расчеты производили по формуле (2.2).

Видно, что изменение температуры окружающей среды влияет на изменение длины образцов: при охлаждении ниже $(+20)^\circ\text{C}$ происходит уменьшение их линейных размеров из-за усадки, а при повышении температуры – увеличение линейных размеров из-за теплового расширения. При этом, наибольшими изменениями длины в зависимости от температуры окружающей среды характеризуются образцы, полученные из ненаполненных модельных составов марок Romocast 152 и МВС 3-Т. В диапазоне температур окружающей среды $(-5) \div (+15)^\circ\text{C}$ уменьшение длины образцов ΔL из модельного состава марки МВС 3-Т составило $0,27 \div 0,27\%$. Это означает, например, что длина образца уменьшилась со 148,3 мм при $(+20)^\circ\text{C}$ до 147,8 мм при $(-5)^\circ\text{C}$. При нагревании от $(+20)^\circ\text{C}$ до $(+35)^\circ\text{C}$ длина образцов из этого же состава увеличилась на 0,4%: длина данных образцов при нагревании до указанной температуры составила 148,9 мм. Указанные модельные составы характеризуется и максимальной свободной линейной

усадкой в процессе затвердевания. Интервал изменения длины ΔL образцов для наполненных модельных составов Romocast 252 и 325 в исследованном диапазоне температур составил $(-0,19) \div (+0,16)\%$.



а

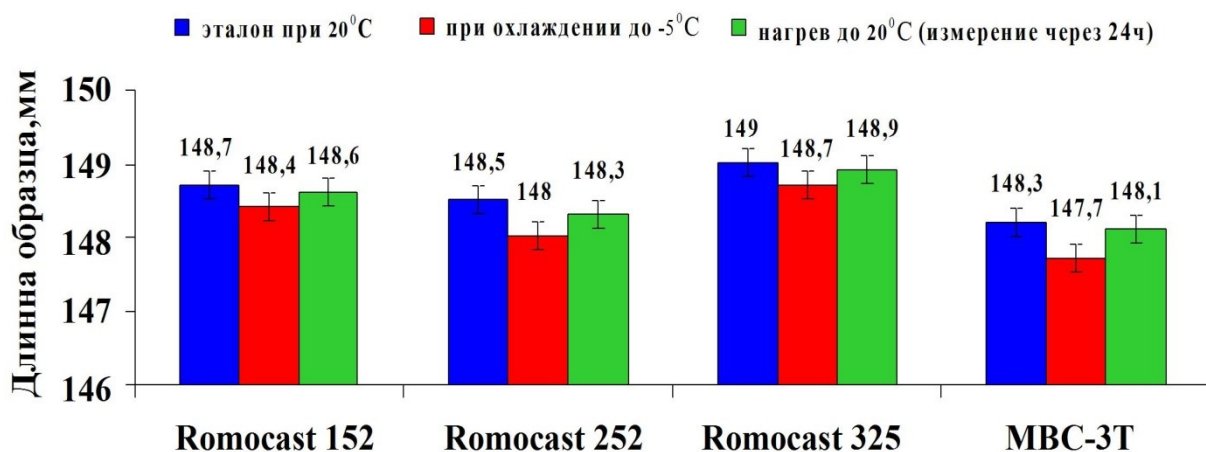
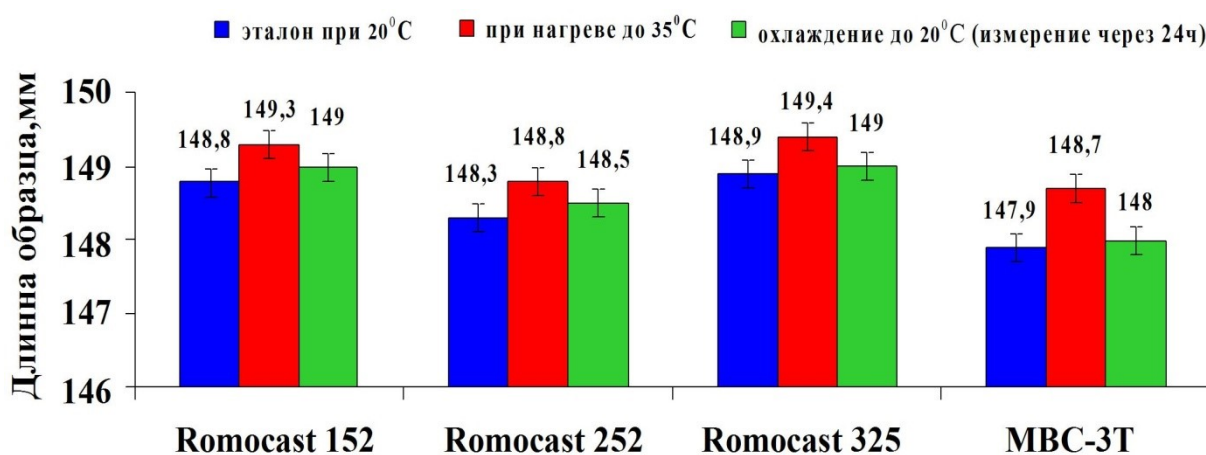


б

а, б – наполненные и ненаполненные модельные составы, соответственно
 Рисунок 3.2 – Влияние температуры окружающей среды на изменение длины образцов из различных модельных составов

Сохранение стабильности линейных размеров образцов в зависимости от температуры окружающей среды является очень важным технологическим параметром. С целью определения данного параметра образцы охлаждали до $(-5) \text{ }^{\circ}\text{C}$ и нагревали до $(+35) \text{ }^{\circ}\text{C}$ относительно фиксированной

(эталонной) температуры $(+20)^{\circ}\text{C}$. Образцы выдерживали при $(-5)^{\circ}\text{C}$ и $(+35)^{\circ}\text{C}$ в течение 24 ч и снова приводили (нагревая или охлаждая) к исходной температуре $(+20)^{\circ}\text{C}$. Далее производили изотермическую выдержку при эталонной температуре выдерживали в течение 24 ч и замеряли длину образцов. Установлено, что после температурных воздействий, оказанных на образцы, стабилизации их линейных размеров не происходит. Как следствие, отсутствует и возврат к исходным размерам, установленным при температуре $(+20)^{\circ}\text{C}$.



а – после нагрева до $(+35)^{\circ}\text{C}$; б – после охлаждения до $(-5)^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3.2 - Исследование стабильности линейных размеров моделей в зависимости от температуры окружающей среды

Наибольшие отклонения размеров от исходного состояния в условиях проведенных экспериментов имели образцы из ненаполненных модельных составов (Romocast 152 и MBC 3-T). Наполненные модельные составы

(Romocast 252 и 325) характеризуются повышенной склонностью к сохранению размерной стабильности.

Таким образом, установлено, что температура окружающей среды оказывает существенное влияние на изменение геометрических размеров образцов из модельных составов различных видов. Данный фактор необходимо учитывать при проектировании пресс-форм для получения моделей отливок, а также хранения готовых модельных блоков. В тоже время, значения свободной линейной усадки $\alpha_m \geq 0,8$ и отсутствие стабилизации линейных размеров при колебаниях температур образцов в пределах положительных значений $20 \div 35^\circ\text{C}$, делает невозможным применение ненаполненных модельных составов в аддитивном производстве по технологии FDM.

3.2 Влияние вида полимерного материала и объемной доли заполнения модели, полученной средствами АП, на величину зольного остатка в огнеупорной керамической форме

К полимерным материалам, используемым для получения моделей в условиях АП по FDM-технологии, предъявляется ряд требований, близких к восковым составам: низкие значения линейной усадки при АП, сопоставимые с восковыми модельными составами, малый коэффициент теплового линейного расширения при нагреве перед выжиганием модельных блоков из ОКФ и низкая величина зольного остатка в ОКФ после выжигания модельных блоков. Составляющими зольности при использовании модельных составов являются сажевый остаток (m_c) и остаток неорганического происхождения (m_n). В первичных модельных составах зольность, как правило, находится в пределах $0,02 \div 0,2\%$. Причем в первичном модельном составе $m_c \gg m_n$, а при повторном использовании происходит по-

вышение зольности за счет увеличения доли m_n . При этом в возврате (при рециклировании) восковых модельного состава характерно следующее соотношение: $m_c \ll m_n$. При использовании полимерных моделей, полученных средствами АП, величина m_n не учитывается ввиду отсутствия рециклирования материала. Непосредственная величина зольного остатка в ОКФ после операций выжигания и прокаливания будет свидетельствовать о возможности использования полимерного материала в технологическом процессе ЛВМ. Процесс образования твердого зольного остатка (кокса) в результате выжигания полимерного материала из ОКФ без доступа кислорода определяет газотворную способность ОКФ [4]. Чем выше величина коксуюемости, тем выше вероятность образования в отливках газовых раковин, спаев и недоливов.

В случае использования полимерных моделей, полученных средствами АП, имеется возможность варьировать их объемную долю заполнения (плотность заполнения K_o , %) для обеспечения оптимального соотношения «прочность модели – скорость печати модели – расход полимерного материала». Однако, увеличение массовой доли выжигаемого материала (увеличение K_o) может привести к образованию засоров ОКФ при режимах ее прокаливания в диапазонах $500 \div 600^\circ\text{C}$.

Исследовали влияние процента заполнения модели и вида полимерного филамента на величину зольного остатка $A(\%)$ в ОКФ [109, 112]. При проведении экспериментов на соответствующие образцы с вариативной степенью заполнения (5, 15, 30 %) наносилось 4 слоя покрытия, 5-ый формировался без обсыпки и являлся закрепляющим слоем. Размер фракции огнеупорного материала: в первом слое – 0,2 мм; во втором и последующих – 0,4 мм. Сушка первого (формирующего) слоя длилась 4 ч, последующие слои формировались с интервалом в 2 ч. Прокалка образцов проводилась при температуре 600°C в течение часа. В табл. 3.1 и рис. 3.3 пред-

ставлены результаты по влиянию вида полимерного материала для АП и объемной доли заполнения модели на величину зольного остатка в ОКФ.

Таблица 3.1 – Зольный остаток полимерных материалов после выжигания и прокалки ОКФ

| Полимерный материал | Заполнение, % | Средняя масса образца, г | Средняя масса золы, г | Средние значения А, % |
|---------------------|---------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| ABS | 5 | 3,94 | 0,0161 | 0,41 |
| | 15 | 4,30 | 0,037 | 0,85 |
| | 30 | 5,41 | 0,06 | 1,10 |
| PLA | 5 | 5,06 | 0,01 | 0,19 |
| | 15 | 6,74 | 0,02 | 0,25 |
| | 30 | 7,53 | 0,036 | 0,48 |
| PMMA | 5 | 5,10 | 0 | 0 |
| | 15 | 5,82 | 0,006 | 0,10 |
| | 30 | 6,08 | 0,01 | 0,16 |
| HIPS | 5 | 3,84 | 0,01 | 0,26 |
| | 15 | 4,24 | 0,017 | 0,39 |
| | 30 | 5,39 | 0,027 | 0,50 |

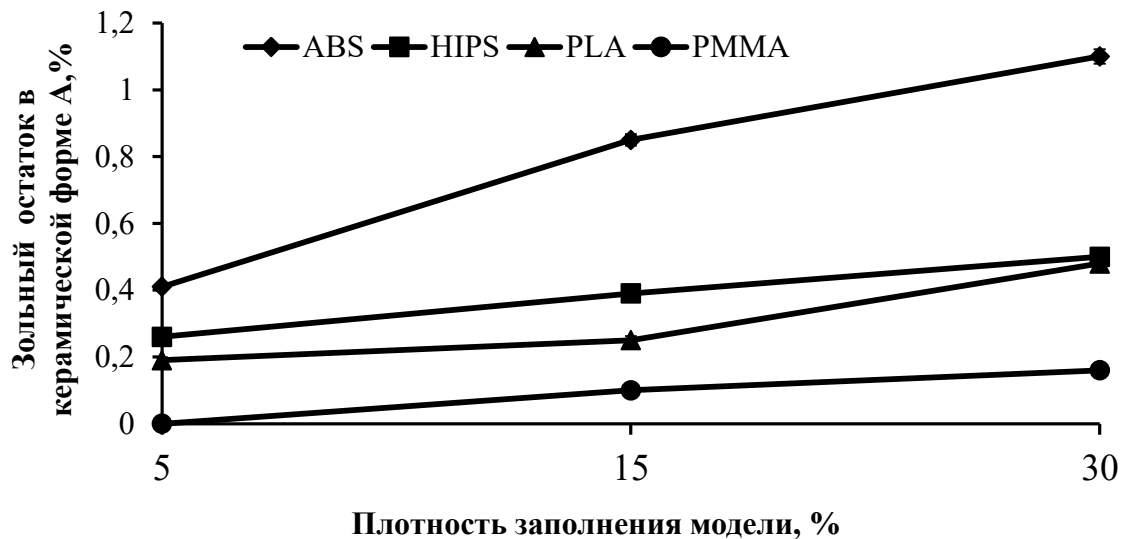


Рисунок 3.3 – Влияние вида полимерного материала и плотности заполнения модели, полученной средствами АП, на величину зольного остатка в ОКФ

Анализ результатов исследования свидетельствует о влиянии плотности внутренних поддерживающих структур (плотность заполнения) и вида

полимерного филаментана величину A в ОКФ. Минимальными значениями зольного остатка в исследуемом диапазоне плотности заполнения характеризуется полимер на основе РММА ($\leq 0,05\%$). Во всем исследуемом диапазоне плотности заполнения величина зольного остатка не превышает значения зольности восковых модельных составов для литья по выплавляемым моделям. Полимер на основе PLA имеет зольный остаток в диапазоне $0,19 \div 0,25\%$ при плотности заполнения $5 \div 15\%$. Это позволяет прогнозировать минимизацию дефектов в виде газовых раковин, спаев и недоливов при использовании моделей, полученных средствами АП, из полимеров на основе полилактида в заданном интервале плотности заполнения.

У полимерных материалов на основе ударопрочного полистирола (HIPS) и акрилонитрилбутадиенстирола (ABS) значения зольного остатка составляют $0,26 \div 0,55$ и $0,5 \div 1,28\%$, соответственно. Высокий зольный остаток может обуславливать повышенный брак отливок за счет образования засоров в тонких сечениях рабочих полостей в ОКФ и механического пригара.

Оптимальная плотность заполнения моделей, получаемых средствами аддитивных технологий, будет способствовать снижению зольного остатка при удалении моделей. Таким образом, плотность заполнения моделей из полимерных материалов необходимо устанавливать в диапазоне $5 \div 15\%$, в зависимости от сложности геометрии формообразующей поверхности. По совокупности положительных технологических факторов наиболее предпочтительными для получения моделей средствами АП являются полимеры на основе PLA и РММА при соблюдении следующих условий: плотность заполнения модели в диапазоне $5-15\%$ и максимально возможного извлечения массовой доли полимерного материала модели из полости формы посредством плавного подъема температуры в прокаточной печи исключая процессы горения.

3.3 Исследование влияния температуры экструзии полимерных материалов и объемной доли заполнения модели на технологическую усадку моделей в условиях аддитивного производства

Интервал рабочих температур экструзии машин аддитивного производства зависит от типа применяемого материала и предельных габаритов создаваемой модели. С увеличением рабочей области построения модели требуется большая температура экструзии (T_3) материала для компенсации теплопотерь печатающего узла машины АП, вызванных длительным временем выполнения, как рабочего, так и холостого ходов при послойной экструзии материала по FDM-технологии.

Для обеспечения размерной точности моделей, получаемых средствами АП, необходимо учитывать следующие параметры: коэффициент экструзии полимерного материала (K_3); высоту слоя экструдированного материала (H_c); скорость построения внешней оболочки модели (V_n) и опорных структур модели (V_3), а также величину технологической усадки полимерной модели (α_n) после печати.

Исследовали влияние температуры экструзии на технологическую усадку α_n образцов, полученных средствами АП [109]. При проведении эксперимента соответствующие образцы изготавливали на машинах АП при температурах экструзии T_3 (°C) в интервалах 200÷220(PLA); 220÷240(HIPS); 240÷270 (ABS); 250÷265 (PMMA); $K_3=100$ %; время выдержки после печати 60 мин.

На рис. 3.4 представлены результаты исследования влияния температуры экструзии полимерных материалов на α_n моделей в интервале рабочих температур, характерном для каждого полимера.

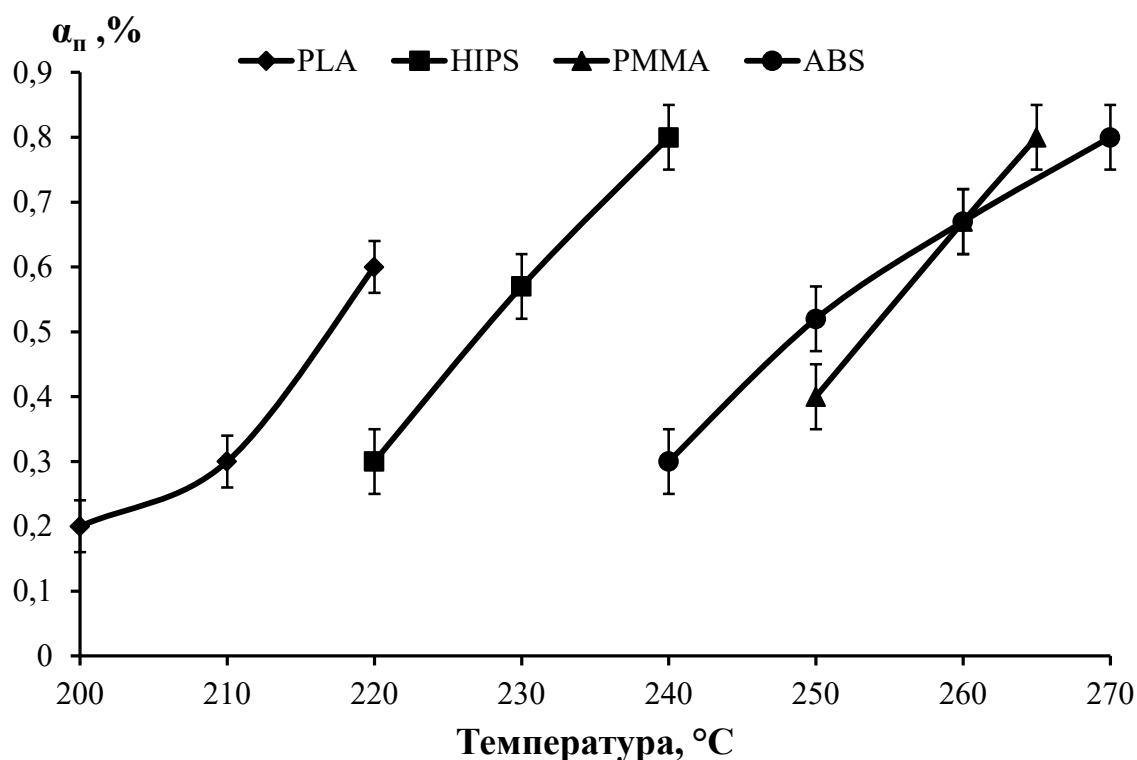


Рисунок 3.4 - Влияние температуры экструзии полимерных материалов на технологическую усадку моделей, полученных средствами АП

Видно, что с увеличением рабочих температур экструзии, характерных для каждого полимера, увеличивается и технологическая усадка моделей. Это означает, что наименьшими изменениями линейных размеров после окончания печати будут характеризоваться образцы, экструдированные из PLA в интервале рабочих температур 200÷220 °C; максимальными – из ABS в интервале рабочих температур 240÷270 °C.

На основании результатов исследований по влиянию вида полимера на величину зольного остатка (A) и технологической усадки ($\alpha_{п}$) можно сделать вывод о том, что по совокупности этих параметров наиболее технологичными филаментами для изготовления выжигаемых моделей являются филаменты на основе полимеров PLA и PMMA. В связи с этим дальнейшие эксперименты выполняли с использованием этих филаментов.

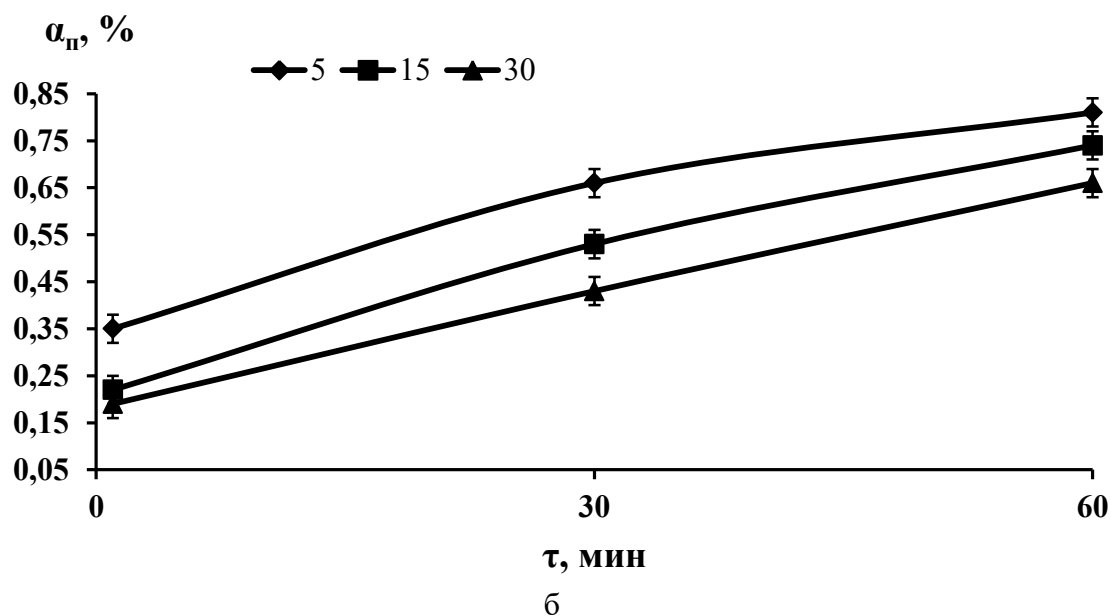
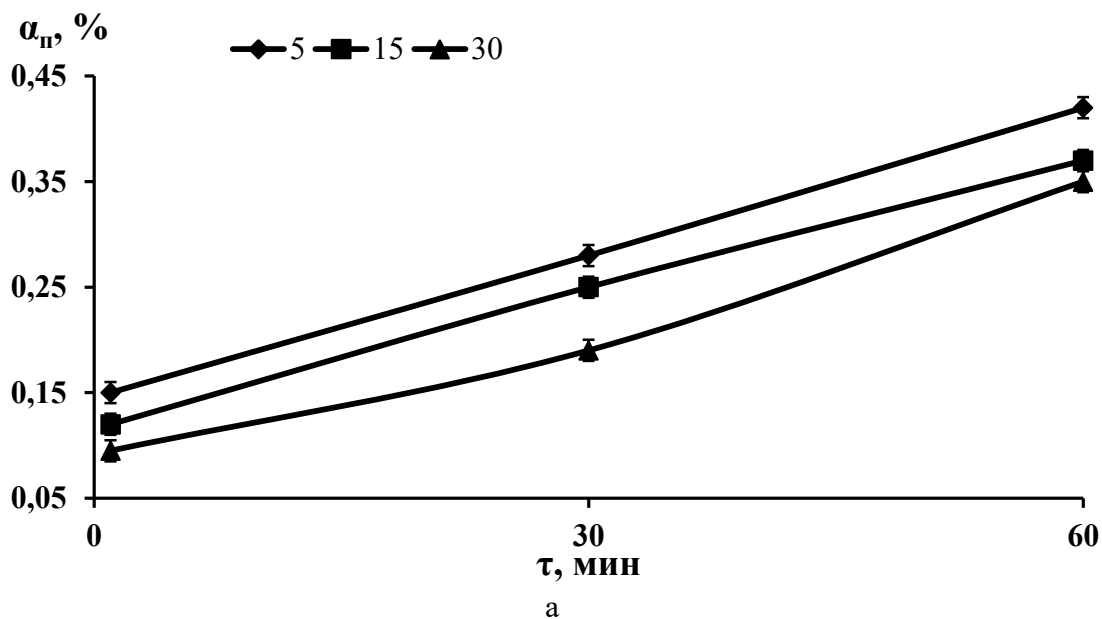
В таблице 3.2, рис. 3.5 представлены результаты по исследованию влияния плотности заполнения (K_0) модели на $\alpha_{пв}$ течение времени после завершения процесса печати для полимерных материалов на основе PLA и PMMA.

Таблица 3.2 – Влияние полимерного материала и плотности заполнения модели на технологическую усадку с течением времени после печати

| ПМ | $K_0, \%$ | Временя выдержки после печати, мин | | |
|-------------------|-----------|------------------------------------|------|------|
| | | 1 | 30 | 60 |
| | | $\alpha_{п,} \%$ | | |
| PLA ¹ | 5 | 0,15 | 0,28 | 0,42 |
| | 15 | 0,12 | 0,25 | 0,35 |
| | 30 | 0,095 | 0,19 | 0,35 |
| PMMA ² | 5 | 0,35 | 0,66 | 0,81 |
| | 15 | 0,22 | 0,53 | 0,74 |
| | 30 | 0,19 | 0,43 | 0,66 |

¹ $T_s=200^{\circ}\text{C}$; ² $T_s=250^{\circ}\text{C}$

Из представленных результатов видно, что усадочные процессы в образцах протекают в течение часа после печати. При этом, отмечается следующая тенденция: при плотности заполнения 5 и 15% технологическая усадка имеет **большие** значения по сравнению с образцами, напечатанными с плотностью заполнения 30% для обоих видов полимерных филаментов. Это может быть связано с тем, что с повышением плотности заполнения до 30% внутренние опорные структуры оказывают тормозящее действие на усадочные процессы. Данное предположение подтверждается результатами по определению $\alpha_{п}$ на образцах с плотностью заполнения 100% (рис. 3.4).



а – PLA; б – PMMA

Рисунок 3.5 – Влияние объемной доли заполнения на линейную усадку моделей, полученных средствами АП

Таким образом, технологическая усадка $\alpha_{л}$ модели при АП зависит, в основном, от свободной линейной усадки полимерного материала (вида филамента), температуры экструзии и плотности заполнения, что выражается следующей функциональной зависимостью:

$$\alpha_{л} = f(\alpha_{пм}; T_{э}; K_0) \quad (3.2)$$

где: T_3 – температура экструзии полимерного материала, °С; K_0 – плотность заполнения, %; $\alpha_{\text{лм}}$ – свободная линейная усадка полимерного материала, %.

3.4 Исследование влияния объемной доли заполнения на коэффициент теплового линейного расширения моделей

В научных источниках практически отсутствует информация о коэффициентах теплового линейного расширения полимеров (α_L), применяемых в АП. При этом, изменение линейных размеров образцов извосковых модельных составов (п. 3.1) и полимерных моделей (п.п. 3.2, 3.3) в процессе усадки будет оказывать существенное влияние на геометрическую точность отливок, а в процессе теплового линейного расширения – на подготовку ОКФ к литью в процессе выплавления, операциях выжига и прокалки. Кроме того, по значениям α_L полимерной модели можно судить о необходимой толщине ОКФ для обеспечения ее целостности.

Исследовали влияние плотностью заполнения K_0 на α_L моделей из полимерных материалов на основе полилактида (PLA) и полиметилметакрилата (PMMA).

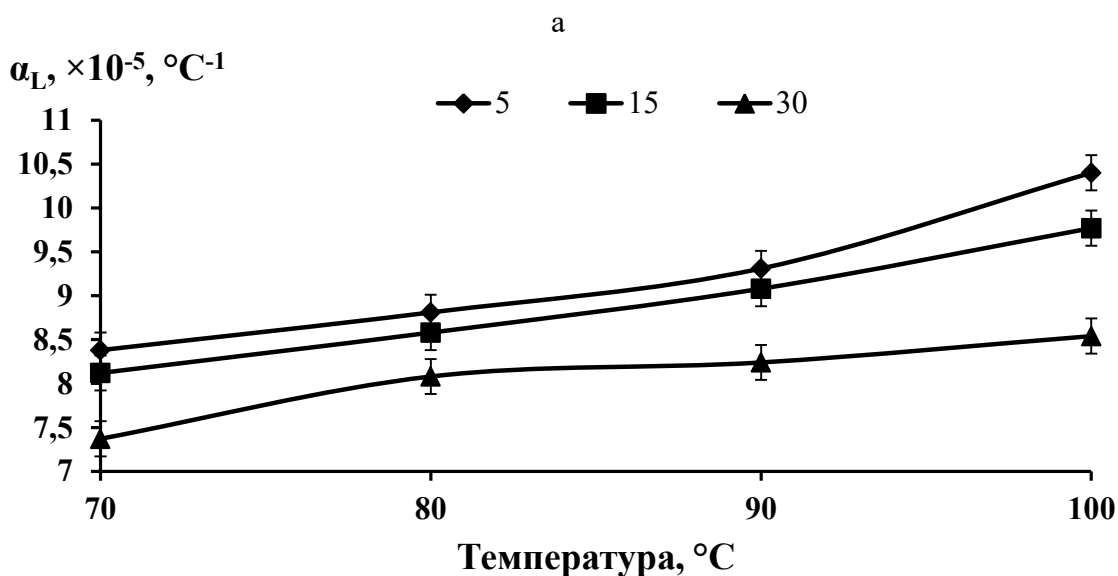
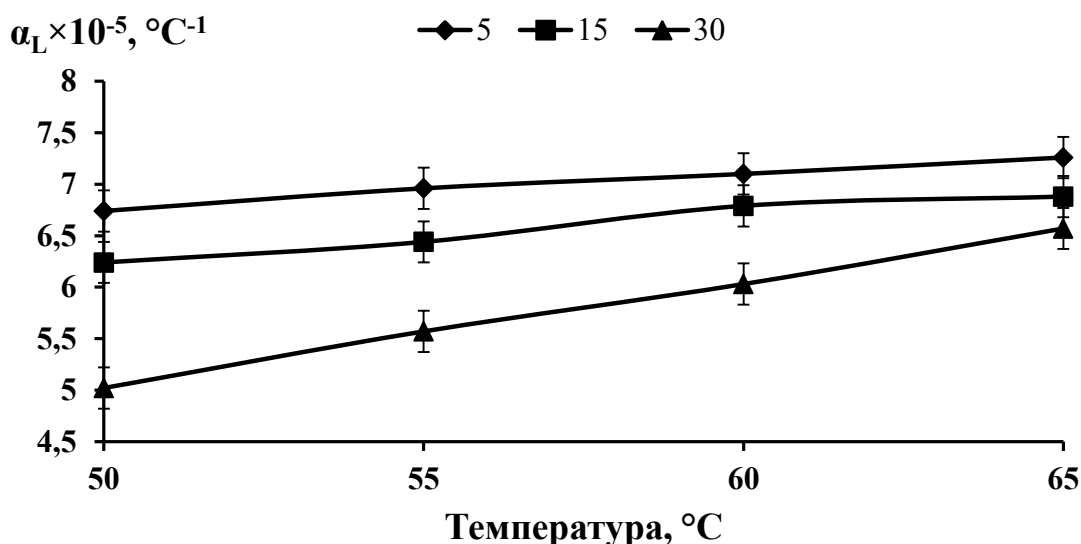
Исследования для моделей из PLA вели в диапазоне температур $50 \div 65^\circ\text{C}$ с шагом 5°C ; для моделей из PMMA – в диапазоне $70 \div 100^\circ\text{C}$ с шагом 10°C . Это связано с тем, что образцы при нагреве свыше 65°C (PLA) и 100°C (PMMA) деформировались, и было невозможно определить истинный размер образцов. Деформация образцов объясняется тем, что пластики не имеют кристаллической структуры и до определенной температуры, которая называется температурой стеклования T_c находятся в стеклообразном состоянии. При повышении $T > T_c$ полимеры переходят в высокоэластическое состояние и происходит их первичная деформация,

степень которой может оставаться неизменной до достижения температуры текучести T_T . С последующим повышением температуры полимеры переходят в вязкотекучее состояние. Следует отметить, что в научных источниках также, как и по КТЛР, крайне мало сведений о T_c полимеров, используемых в АП. Например, для полимеров на основе полилактида (PLA) температура стеклования по данным [113] составляет 60-65⁰С. Для полимеров на основе полиметилметакрилата (PMMA) температура стеклования по данным [114] составляет 100-108⁰С. Указанные температуры подтвердились в ходе постановочных экспериментов.

Результаты по влиянию плотности заполнения в зависимости от вида полимера представлено в табл. 3.3 и на рис. 3.6. Анализ полученных результатов показывает, что в исследованных температурных интервалах для обоих видов полимеров при плотности заполнения K_0 15 и 30% значения α_L ниже по сравнению с образцами, полученными при $K_0=5\%$.

Таблица 3.3- Влияние плотности заполнения на КТЛР образцов из полимеров PLA и PMMA

| ПМ | $K_0, \%$ | $\alpha_L \times 10^{-5}, ^\circ C^{-1}$ | | | | $\alpha_L \times 10^{-5}, ^\circ C^{-1}$ | | | |
|------|-----------|--|------|------|------|--|------|------|-------|
| | | Температура, $^\circ C$ | | | | Температура, $^\circ C$ | | | |
| | | 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 |



б

а – PLA; б - PMMA

Рисунок 3.6 – Влияние плотности заполнения и вида полимера на коэффициент теплового линейного расширения α_L

Вероятно, установленную особенность можно объяснить вкладом теплового расширения воздуха, находящегося в ячейках внутренней структуры образцов. Средний коэффициент объемного теплового расширения сухого воздуха в интервале температур $20 \div 100^\circ\text{C}$ составляет $366,5 \times 10^{-5}$ ($3,665 \times 10^{-3}$) $^\circ\text{C}^{-1}$ [115]. Чем ниже плотность заполнения K_0 , тем выше объемная доля воздуха, находящегося в ячейках внутренней структуры образ-

ца. При нагревании воздух будет оказывать дополнительный вклад в тепловое расширение образца.

Установленный фактор может иметь критическое значение на этапе удаления модельных блоков изогнеупорных керамических форм. Расширяющиеся полимерные модели будут оказывать дополнительное давление на внутренние стенки ОКФ, что может приводить к повышенному браку по растрескиванию при неблагоприятном сочетании полимерного материала и плотности заполнения внутренней структуры модельного блока.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

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

2. Максимальной свободной линейной усадкой характеризуются ненаполненные модельные составы марок Romocast 152 и MBC 3-T. Величина α_m для указанных модельных составов имеет следующие значения:

- через 1 ч после затвердевание: $0,72 \div 1,22$ %;
- через 24 ч после затвердевания: $0,87 \div 1,29$ %.

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

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

4. На основании полученных результатов сделан вывод о невозможности применения ненаполненных модельных составов в аддитивном производстве по технологии FDM, ввиду высоких значений свободной линейной усадки ($\alpha_m \geq 0,8$) и отсутствия стабилизации линейных размеров при колебаниях температур образцов в пределах $20 \div 35^\circ\text{C}$. Для применения наполненных модельных составов в технологии АП необходима дополнительная стабилизация линейных размеров, посредством увеличения массовой доли полимерного наполнителя.

5. Впервые выполнено сравнительное исследование влияния вида полимерного материала и объемной доли заполнения модели, полученной средствами АП, на величину зольного остатка A (%) в ОКФ при выжиге. Минимальными значениями зольного остатка в исследуемом диапазоне плотности заполнения характеризуется полимер РММА ($\leq 0,05\%$). Во всем исследуемом диапазоне плотности заполнения величина зольного остатка не превышает значения зольности модельных составов для литья по выплавляемым моделям. Полимер PLA имеет зольный остаток в диапазоне $0,19 \div 0,25\%$ при объемных долях заполнения $5 \div 15\%$. Это позволяет прогнозировать минимизацию дефектов в виде газовых раковин, спаев и недоливов при использовании моделей, полученных средствами АП, из полимеров на основе полилактида в заданном интервале объемного заполнения.

6. Полимерные материалы на основе ударопрочного полистирола (HIPS) и акрилонитрилбутадиенстирола (ABS) имеют повышенные значения зольного остатка ($0,26 \div 0,55$ и $0,5 \div 1,28\%$, соответственно), что может обуславливать повышение брака за счет образования засоров в тонких сечениях рабочих полостей в ОКФ и механического пригара на отливках.

7. Установлено, что при плотности заполнения K_0 5 и 15% технологическая усадка $\alpha_{\text{п}}$ имеет большие значения по сравнению с $K_0=30\%$ для образцов из полимеров на основе PLA и РММА. Технологическая усадка $\alpha_{\text{п}}$ модели при АП зависит, в основном, от свободной линейной усадки $\alpha_{\text{пм}}$ (%) полимерного материала (вида филамента), температуры экструзии T_3 ($^{\circ}\text{C}$) и плотности заполнения K_0 (%), что выражается функциональной зависимостью: $\alpha_{\text{п}} = f(\alpha_{\text{пм}}; T_3; K_0)$.

8. Впервые выполнено сравнительное исследование влияния плотности заполнения K_0 на коэффициент теплового линейного расширения α_L образцов из полимеров на основе PLA и РММА, полученных средствами АП. Установлено, что при нагреве от 23°C до температур близких к температурам стеклования T_c (65°C для PLA и 100°C для РММА) значения α_L увеличиваются. В исследованных температурных интервалах для обоих

видов полимеров при плотности заполнения K_0 15 и 30% значения α_L ниже по сравнению с образцами, полученными при $K_0=5\%$. Это объясняется вкладом теплового расширения воздуха, находящегося в ячейках внутренней структуры образцов. Установленную особенность необходимо учитывать в дальнейшем на этапах подготовки огнеупорных керамических форм к литью.

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

4. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МОДЕЛЕЙ СРЕДСТВАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ЛИТЬЕ В ОГНЕУПОРНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ФОРМЫ

4.1 Синтез воско-полимерных модельных составов и получение филаментов на их основе

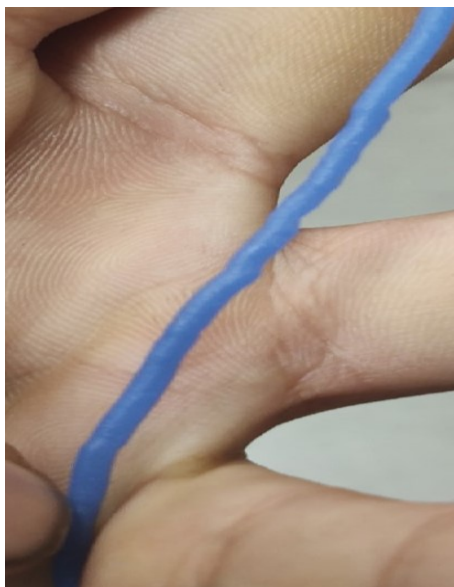
Для литейных предприятий, использующих машины аддитивного производства по технологии FDM в своих технологических процессах, необходимо применять материал, который по своим технологическим свойствам максимально приближен к восковым модельным составам для высокоточного литья. Именно в этом случае процесс интеграции АП и стандартного технологического процесса ЛВМ будет экономически и технологически оправдан.

Как было показано в п. 3.1 на примере исследования свойств восковых составов, оптимальной основой для создания филаментов являются наполненные воска марок Romocast 252 и Romocast 325. Высокие для восков температуры каплепадения ($T_k=67\div 82^\circ\text{C}$) в совокупности с повышенной динамической вязкостью (500-600 мПа \times с), обусловленные наличием в их составе высокомолекулярного полиэтилена в качестве наполнителя, позволяют прогнозировать контролируемое послойное осаждение материала филамента экструзионным методом, который реализуется при FDM-технологии.

Однако, первые эксперименты по получению филаментов непосредственно из восковых составов выявили следующие проблемы:

- деформация и нестабильность в диаметре экструдированного филамента (рис. 4.1, а);
- обрывы в процессе намотки филамента на катушку;
- дробление филамента после намотки на катушку (рис. 4.1, б).

С целью получения филаментов, пригодных для применения в машинах аддитивного производства по технологии FDM, в восковые составы необходимо вводить пластифицирующие агенты для компаудирования модельных составов на основе полиэтиленовых восков высокой вязкости.



а



б

а – деформированное состояние филамента на основе VM Romocast 325;
б – дробление филамента на основе VM Romocast 252

Рисунок 4.1 – Характерные дефекты при получении филаментов экструдированием восковых составов

Приготовление воско-полимерного состава состояло из следующих этапов:

1. Взвешивание воскового состава и пластификатора на электронных весах в требуемой пропорции.
2. Расплавление навески пластификатора и порционное введение воскового состава с постоянным перемешиванием до достижения однородности.
3. Полученная однородная масса выливается на медную подложку тонким слоем для интенсификации процесса затвердевания.
4. Застывший воско-полимерный состав помещается в герметичный пакет и помещается в морозильный ларь на 10-12 ч.

5. После заморозки воско-полимерный состав измельчается с помощью шнекового блендера.

Исходя из того, что используемые воска и полиэтилен не образуют соединений между компонентами в процессе смешивания определение оптимальной объемной доли пластифицирующего агента производили на основе принципа аддитивности по формуле (2.5).

За граничные значения температурного интервала $T_{ВПС}$ были приняты значения, предъявляемые к модельным составам для ЛВМ категории В ($54 < T_{ВПС} < 100$) [4]. Выбор данного диапазона обусловлен следующими основными факторами:

- возможность выплавления воско-полимерного состава на стандартном оборудовании, применяемом в процессах ЛВМ;
- оптимальные температурные режимы экструзионной линии при получении филамента;
- возможность использования стандартных 3D-принтеров для печати моделей по FDM-технологии.

На рис. 4.2, табл.4.1 представлены расчетные и экспериментальные значения $T_{ВПС}$ воско-полимерных составов (ВПС) на основе восков марок Romocast 252 и Romocast 325 в зависимости от доли полиэтиленового воска марки ПЛВО-272 (табл. 2.3). Экспериментальные значения $T_{ВПС}$ определяли в ЦЗЛ ПАО «ОДК-Кузнецов» по принятой на предприятии методике.

Из представленных результатов видно, что значения $T_{ВПС}$, определенные экспериментально достаточно хорошо совпадают с расчетными.

Далее приступили к отработке процесса получения филаментов на экструзионной линии.

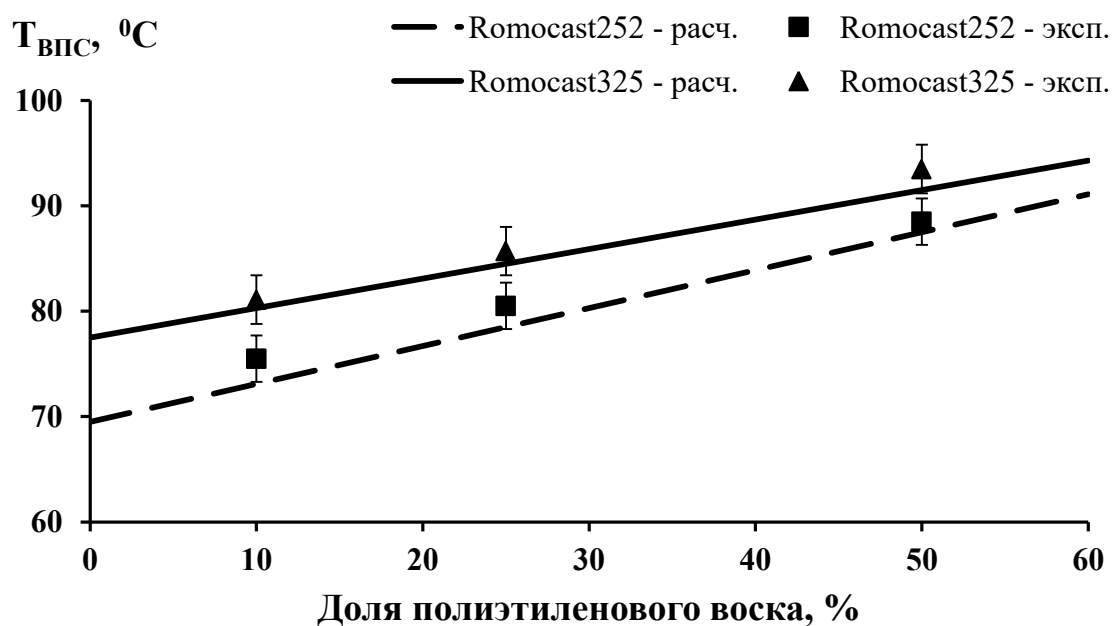


Рисунок 4.2 – Расчетные и экспериментальные значения $T_{ВПС}$ в зависимости от доли полиэтиленового воска

Таблица 4.1 – Состав температуры каплепадения синтезированных воско-полимерных составов

| № п/п | Марка синтезированного ВПС | Содержание модельного состава, % | Содержание пластификатора, % | Температура каплепадения, $T_{ВПС}$, °C | |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------|--|-------------|
| | | | | Расчет | Эксперимент |
| На основе Romocast252 | | | | | |
| 1 | P252ПЭ10 | 90 | 10 | 73,1 | 75,5 |
| 2 | P252ПЭ25 | 75 | 25 | 78,5 | 80,5 |
| 3 | P252ПЭ50 | 50 | 50 | 87,5 | 88,5 |
| На основе Romocast325 | | | | | |
| 4 | P325ПЭ10 | 90 | 10 | 80,3 | 81,1 |
| 5 | P325ПЭ25 | 75 | 25 | 84,5 | 85,7 |
| 6 | P325ПЭ50 | 50 | 50 | 91,5 | 93,5 |

Для обеспечения устойчивого получения воско-полимерных филаментов с использованием экструзионной линии необходимо обеспечивать следующий температурный режим экструзии $T_{эф}$:

$$T_{эф} \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C} = T_{ВПС} - (15 \div 25) \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.1)$$

где: $T_{ВПС}$ - температура каплепадения воско-полимерного модельного состава, $^\circ\text{C}$

Данные по температурным интервалам экструзии синтезированных ВПС для получения филаментов приведены в табл.4.2.

Таблица 4.2 – Температурные интервалы экструзии ВПС

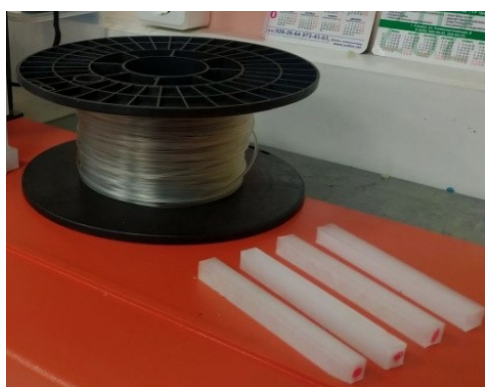
| Марка | Диаметр сопла D_c , мм | Температура зоны нагрева, $^\circ\text{C}$ | Температура экструзии $T_{эф}$, $^\circ\text{C}$ |
|----------|--------------------------|--|---|
| P252ПЭ10 | 1,75 $_{-0,05}$ | 64÷66 | 61÷63 |
| P252ПЭ25 | | 69÷70 | 65÷67 |
| P252ПЭ50 | | 70÷73 | 67÷70 |
| P325ПЭ10 | | 66÷69 | 65÷67 |
| P325ПЭ25 | | 67÷70 | 67÷68 |
| P325ПЭ50 | | 69÷72 | 68÷71 |

Для обеспечения получения воско-полимерного пруткового материала (филамента) с необходимой размерной точностью ($\varnothing 1,75 \pm 0,05$ мм) в конструкцию блока экструдера были внесены следующие изменения:

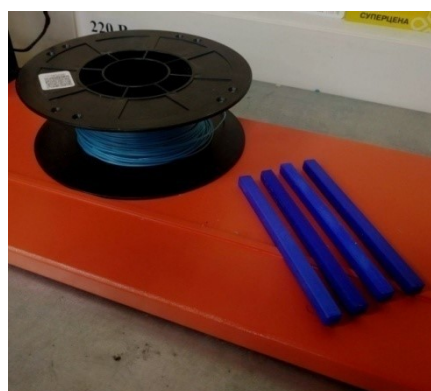
- отключение второй зоны нагрева для стабилизации температурного режима экструзии легкоплавких воско-полимерных составов в интервале температур 45÷95 $^\circ\text{C}$.

- разработка и изготовление сопла экструдера (рис. 4.3) из медно-цинкового сплава марки ЛС59-1 ($\lambda=105 \text{ Вт}/(\text{кг}\times\text{К})$) с увеличенным литниковым ходом до $6 \pm 0,75$ мм для интенсификации процесса охлаждения филамента и формирование его необходимой размерной точности внутри узла при экструзии.

В процессе первичных экспериментов выяснилось, что филамент марки P252ПЭ10 после намотки на катушку подвергается растрескиванию и фрагментации. Это, вероятно, связано с недостаточным количеством пластификатора для обеспечения целостности филамента в деформированно-напряженном состоянии (в состоянии смотки). В связи с этим остальные эксперименты проводились на филаментах, полученных из ВПС №№ 2-6 (табл. 4.1). Для дальнейших экспериментов из опытных филаментов были напечатаны образцы (рис. 4.5) для исследования технологических свойств по принятым методикам (п.2).



а



б

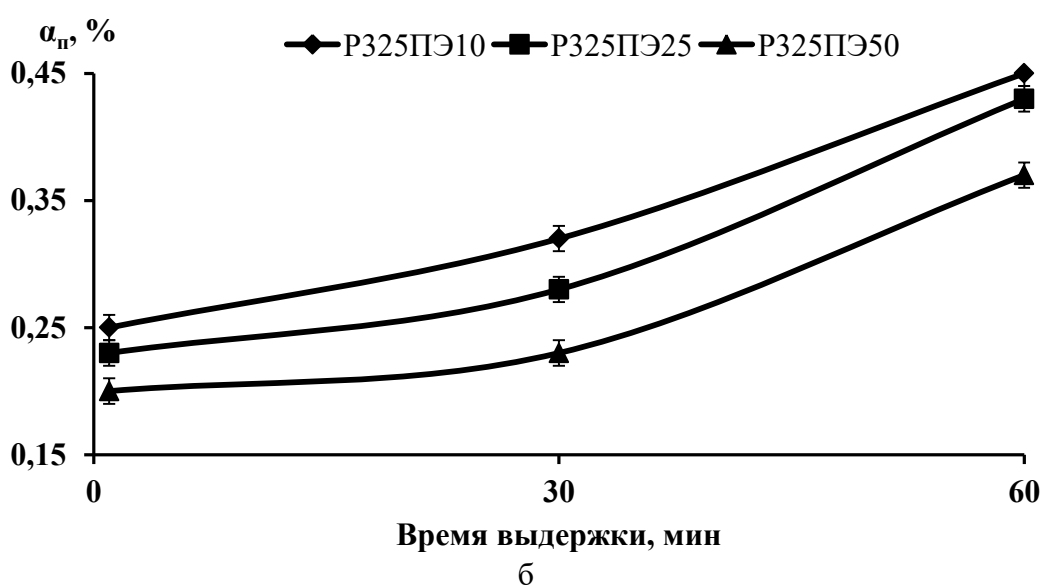
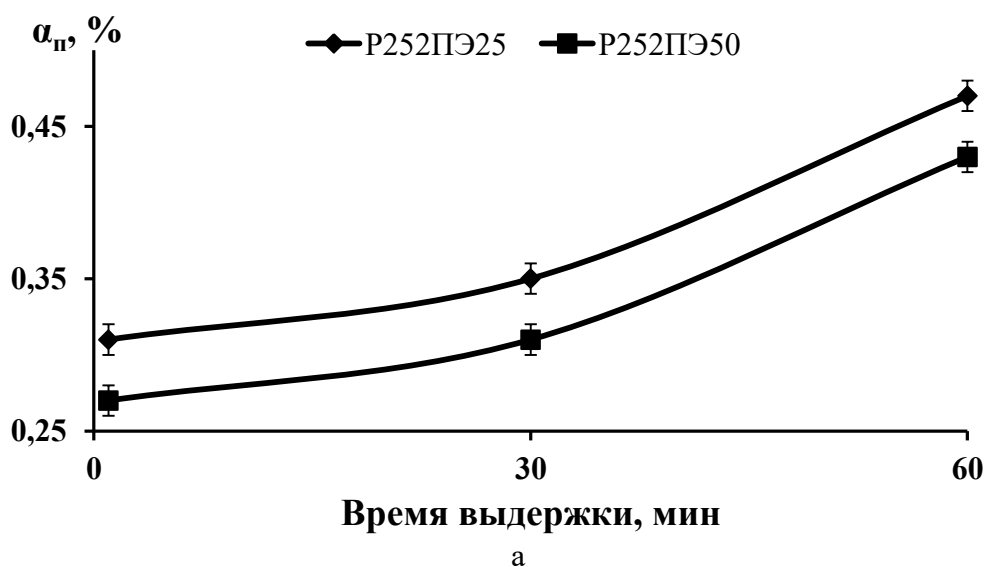
а – на основе Romocast252; б – на основе Romocast325

Рисунок 4.5-Образцы из опытного воско-полимерного филамента, полученные средствами АП

В табл. 4.3, рис. 4.6 представлены результаты по исследованию влияния времени выдержки образцов после печати на величину технологической усадки $\alpha_{п}$.

Таблица 4.3-Влияние времени выдержки после печати на $\alpha_{п}$ в зависимости от марки филамента

| Марка | Время выдержки после печати, мин | | |
|----------|--|------|------|
| | 1 | 30 | 60 |
| | Коэффициент линейной усадки $\alpha_{п}$, % | | |
| P252ПЭ25 | 0,31 | 0,35 | 0,47 |
| P252ПЭ50 | 0,27 | 0,31 | 0,43 |
| P325ПЭ10 | 0,25 | 0,32 | 0,45 |
| P325ПЭ25 | 0,23 | 0,28 | 0,43 |
| P325ПЭ50 | 0,22 | 0,27 | 0,40 |

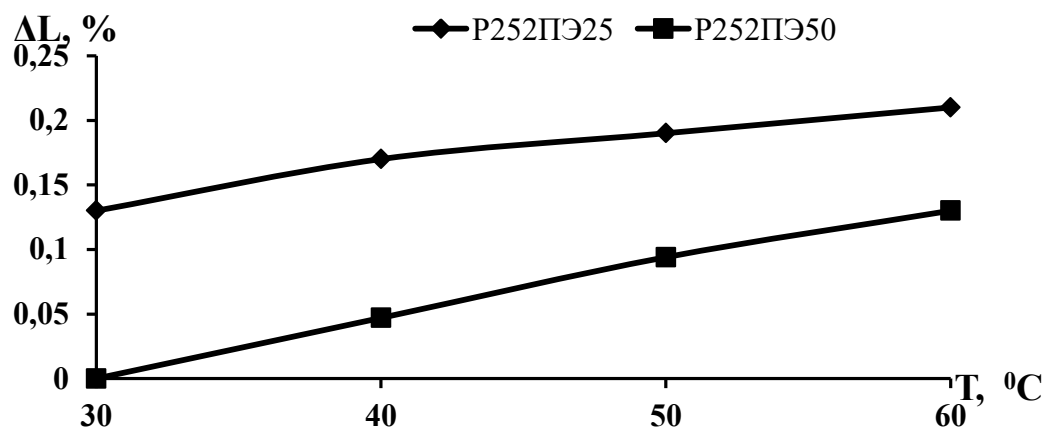


а, б – на основе Romocast 252 и Romocast325, соответственно
 Рисунок 4.6 – Влияние времени выдержки после печати на $\alpha_{п}$, %

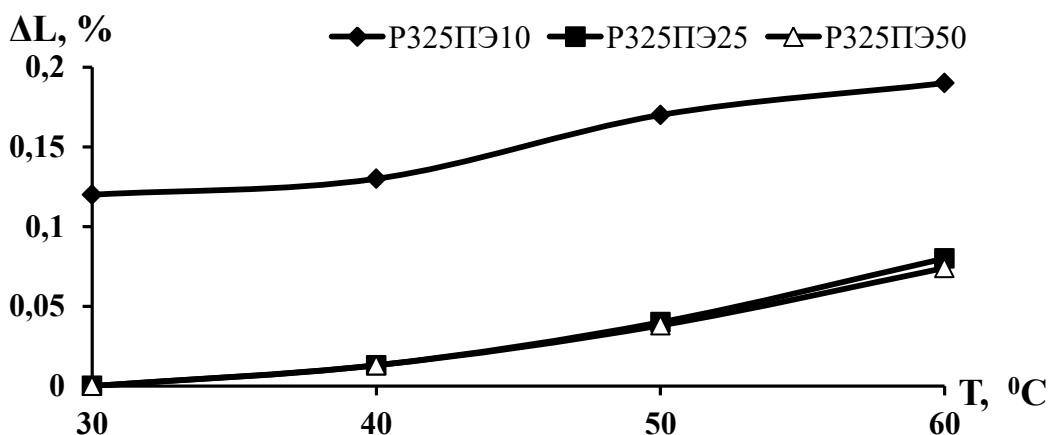
Видно, что технологическая усадка $\alpha_{п}$ образцов, полученных на основе Romocast252 (рис. 4.6, а) в зависимости от времени выдержки изменяется в интервале $0,27 \div 0,47\%$. Увеличение доли пластификатора с 25 до 50% (марка P252ПЭ50) способствует снижению значений $\alpha_{п}$. Усадка образцов, полученных на основе Romocast325 (рис. 4.6, б) изменяется в интервале $0,20 \div 0,45\%$, а с увеличением доли пластификатора с 10 до 50% значения $\alpha_{п}$ снижаются. При одинаковом количестве пластификатора в составе ВПС значения $\alpha_{п}$ ниже в образцах, полученных на основе Romocast325. Это может быть обусловлено тем, что в данном восковом со-

ставе изначально более высокая доля наполнителя в виде высокомолекулярного воска по сравнению с Romocast252.

Далее по разработанной методике исследовали влияние температуры нагрева и марки ВПС на изменение длины ΔL (%) образцов в интервале $30 \div 60^\circ\text{C}$ (рис. 4.7).



а



б

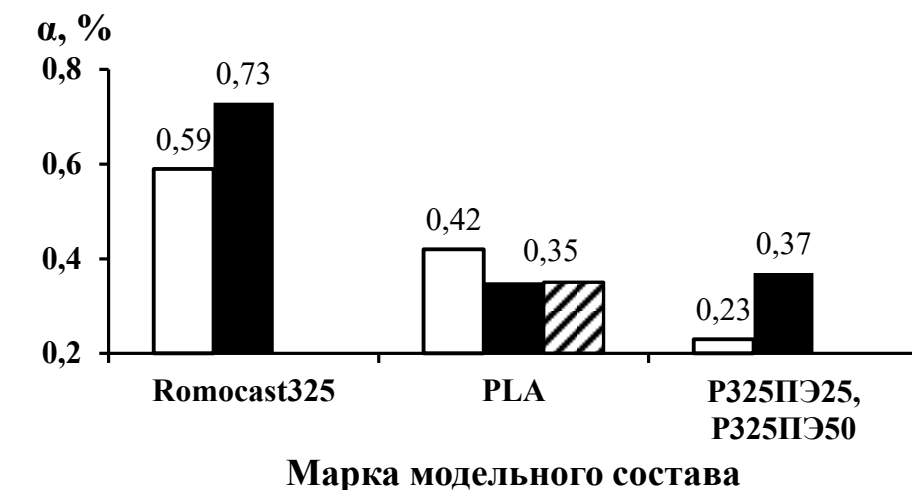
а, б – на основе Romocast 252 и Romocast325, соответственно

Рисунок 4.7 - Влияние температуры окружающей среды на изменение длины образцов из различных ВПС

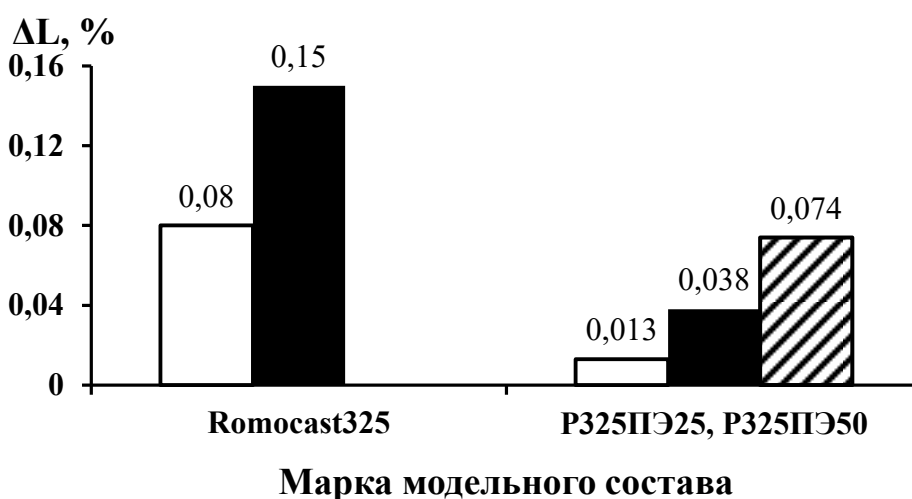
Анализ полученных результатов позволил выявить следующую общую тенденцию: увеличение доли пластификатора способствует снижению ΔL образцов. При этом, образцы из ВПС на основе Romocast252 (рис. 4.7, а) при содержании пластификатора 50% изменяют свою длину в исследованном интервале температур с 0 до 0,13%. Длина образцов на основе Romocast325 при содержании пластификатора 25 и 50% изменяется практически одинаково в интервале от 0 до 0,074%. Соответственно, мож-

но прогнозировать, что ВПС на основе Romocast325 будут оказывать меньшее давление на внутренние стенки огнеупорной керамической формы при нагревании системы до температур выплавления модельных блоков.

На рис. 4.8 представлены сравнительные результаты изменения линейной усадки восковых, полимерных и воско-полимерных составов.



а



б

а – свободная линейная усадка при 23⁰С:

Romocast325 – время выдержки 1 и 24 ч, соответственно;

PLA – К₀ 5, 15, 30%, соответственно, время выдержки 1 ч;

P325ПЭ – время выдержки 0,5 и 1 ч, соответственно;

б – изменение длины при нагреве: Romocast325 – 30 и 35⁰С, соответственно;

P325ПЭ – 40, 50 и 60⁰С, соответственно

Рисунок 4.8 – Сопоставление значений свойств различных модельных составов

Видно, что по показателям, обеспечивающим геометрическую точность модели (α , %) и степень ее давления на стенки ОКФ (ΔL , %) при удалении, синтезированные ВПС (P325ПЭ25 и P325ПЭ50) имеют лучшие характеристики.

4.2 Разработка принципов проектирования воско-полимерных комбинированных моделей для АП

Для крупногабаритных фасонных отливок с большой суммарной площадью обрабатываемых поверхностей наиболее целесообразным является использование комбинации материалов при получении моделей, где в качестве материала опорных структур внутреннего пространства модели должен применяться воско-полимерный модельный состав с температурами каплепадения $T_k \sim 90 \div 95^\circ\text{C}$, а для создания внешней оболочки целесообразно использовать наполненные воско-полимерные составы с T_k до $80 \pm 5^\circ\text{C}$. На основании исследований свойств синтезированных воско-полимерных составов (п. 4.1) в качестве опорных структур оптимальным является применение воско-полимерных филаментов P325ПЭ50 и P252ПЭ50 с содержанием пластифицирующих компонентов 50%. В качестве оболочкового материала для получения модели средствами аддитивного производства целесообразно использовать филаменты из воско-полимерных составов P252ПЭ25 или P325ПЭ10, имеющие самую низкую температуру каплепадения, полученную в ходе экспериментов ($T_k \sim 79 \div 82^\circ\text{C}$).

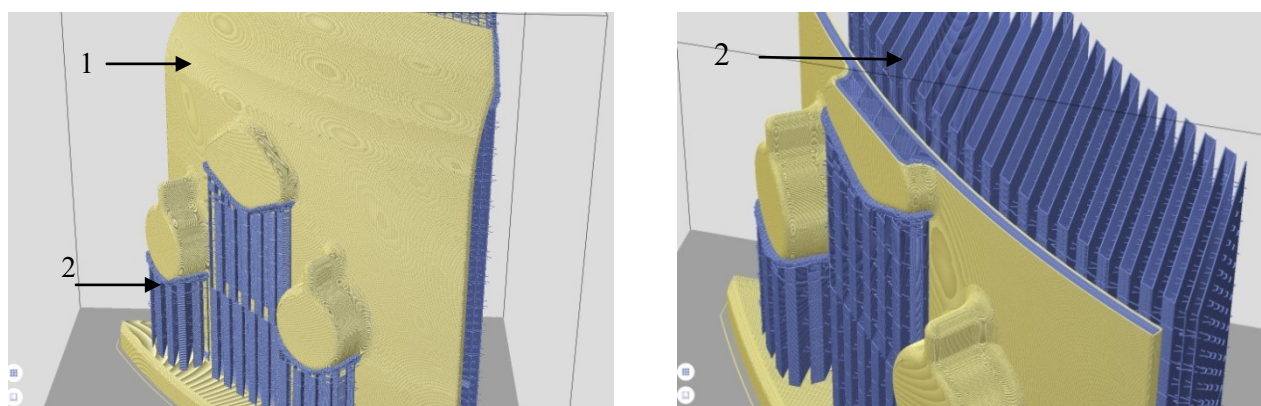
Оценивали возможность получения комбинированных моделей по FDM-технологии с применением двухэкструдерного печатающего механизма с реализацией поддерживающих структур из тугоплавкого воско-полимерного состава. На рис. 4.9 представлена структура комбинированной модели, спроектированной в автоматизированной системе подготовки управляющих программ «PolygonX». Внутренний

каркас вместе с опорной структурой модели спроектирован из тугоплавкого воско-полимерного состава, внешняя оболочка - из легкоплавкого.

Основным требованием на данном этапе подготовки управляющей программы является сохранение условия толщины внешней оболочки:

$$L_o \geq 2D_\phi, \quad (4.2)$$

где L_o – толщина внешней оболочки модели, мм; D_ϕ – диаметр сопла печатающего узла машины аддитивного производства, мм.



а

б

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

Рисунок 4.9 - Структура комбинированной модели в программной среде PolygonX (фрагмент)

Условие (4.2) обеспечивает получение равномерного внешнего слоя модели и необходимую адгезию экструдированного материала на поверхность каркаса изделия.

При аддитивном производстве моделей фасонных отливок для ЛВМ практически всегда необходима расстановка поддерживающих (опорных) структур под нависающими частями модели в процессе печати. От правильного выбора критериев расстановки поддерживающих структур во

многим зависит качество облицовочного слоя и трудоемкость постобработки модели. Для обеспечения удаления поддерживающих структур без формирования дефектов на лицевой поверхности модели необходимо соблюсти следующие условия.

Для нижней опорной поверхности:

$$H_{\text{зн}} \geq 2H_{\text{с}}, \quad (4.3)$$

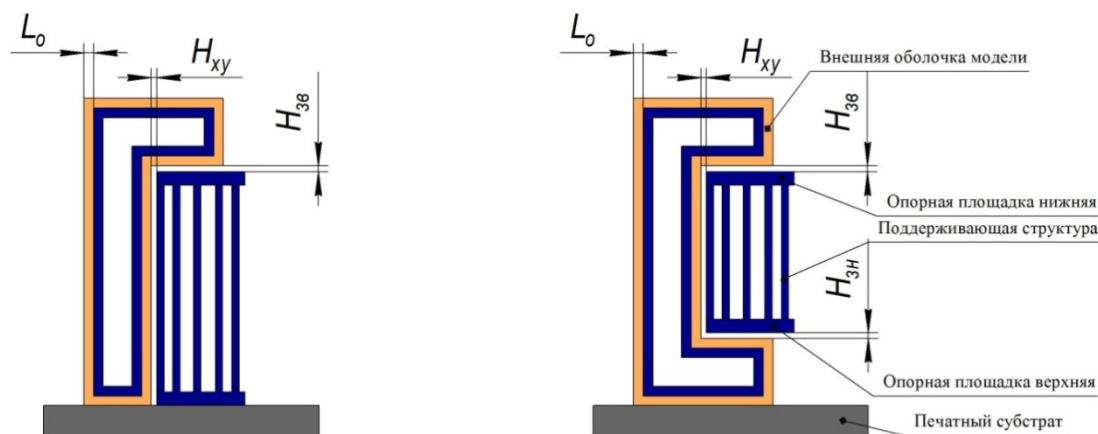
где $H_{\text{зн}}$ – величина зазора опорной площадки поддерживающей структуры, мм; $H_{\text{с}}$ – высота слоя экструдированного материала на поверхность модели, мм.

Для верхней опорной поверхности:

$$H_{\text{зв}} \leq H_{\text{с}}, \quad (4.4)$$

где $H_{\text{зв}}$ – величина зазора опорной площадки поддерживающей структуры, мм; $H_{\text{с}}$ – высота слоя экструдированного материала на поверхность модели, мм.

Таким образом, при начале печати опорной структуры на поверхности модели происходит снижение температуры экструдированного тугоплавкого воско-полимерного материала, что препятствует сплавлению двух материалов и обеспечивается легкость удаления поддерживающих структур с нижней поверхности модели. Принцип проектирования опорных структур с обеспечением условий (4.3-4.4) представлен на рисунке 4.10.



а

б

а – при расстановке опорных структур от печатного субстрата;

б – при расстановке опорных структур от поверхности модели

Рисунок 4.10 - Схематическое изображение расположения опорных структур

На основании указанного подхода разработаны режимы аддитивного производства комбинированных моделей габаритными размерами до 500 мм на 3D-принтере DesignerXL с использованием автоматизированной системы подготовки управляющих программ «PolygonX» (табл.4.4).

Таблица 4.4 - 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 , мм | H_{xy} , мм | H_{3n} , 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 |

Таким образом, при использовании филаментов из ВПС с высоким содержанием пластификатора (P252ПЭ50, P325ПЭ50) целесообразно применять более высокие значения следующих параметров, которые задаются

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» (Приложение А).

4.3 Исследование взаимодействия в системе «разовая модель-огнеупорная керамическая форма» при технологических операциях удаления моделей

Исследовали взаимодействие в системе «восковая модель - огнеупорная керамическая форма» [116-119].

Было установлено, что ОКФ, изготовленные из плавленного кварца, характеризуются минимальным значением коэффициента теплового линейного расширения в интервале температур $100 \div 350^{\circ}\text{C}$ [116]. Выплавление ненаполненных и наполненных восковых модельных составов производится в диапазоне температур $60 \div 95^{\circ}\text{C}$. Соответственно, ОКФ из плавленного кварца практически не будет изменять своих размеров. В случае нагрева огнеупорной керамической формы с модельным блоком сразу до температур выплавления ($\sim 95-100^{\circ}\text{C}$) модельный блок из воскового состава начинает расширяться, оказывая давление на внутренние стенки ОКФ. Данный фактор зачастую служит причиной появления брака по растрескиванию керамических форм на данном технологическом этапе. Наиболее критичным это становится при наличии в конструкции модельного блока переходов от толстых сечений к тонким или острым углам на образующих поверхностях. Для снижения брака по растрескиванию ОКФ, например, увеличивают количество огнеупорных слоев (толщину стенки керамической оболочки) и применяют опорный наполнитель при выплавлении. Это обуславливает дополнительное увеличение трудоемкости и материалоем-

кости процесса ЛВМ. Дополнительным технологическим приемом для предотвращения растрескивания ОКФ на основе плавленного кварца выплавление восковых модельных составов осуществляют в среде перегретого пара, используя бойлерклав. Удаление модельного блока на основе воскового состава из ОКФ в бойлерклаве считается достаточно технологичным при выплавлении модельных составов с температурой плавления около 100°C . Однако, существенными недостатками указанного способа является высокая стоимость бойлерклава, повышенный расход электроэнергии для выработки пара с необходимым давлением и температурой ($P=0,8\text{Па}$, $T=170^{\circ}\text{C}$), а также необходимость регенерации модельных составов перед повторным использованием из-за насыщения влагой. Указанные факторы снижают производительность, повышают энергоемкость и себестоимость процесса ЛВМ.

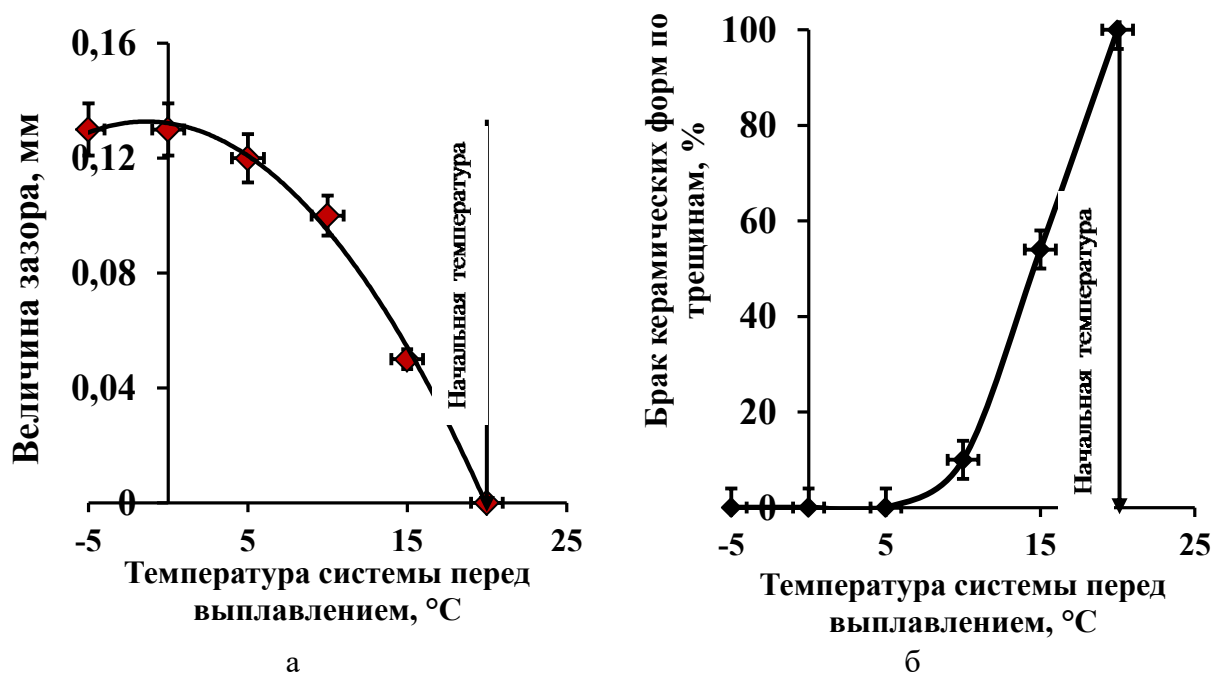
В связи с тем, что модели из восковых составов склонны к уменьшению своих линейных при захлаживании в диапазоне $(-5)\div(+20)^{\circ}\text{C}$ (п. 3.1), было предложено использовать данное свойство для снижения брака по растрескиванию ОКФ. Температуру системы «восковая модель-огнеупорная керамическая форма» изменяли в диапазоне $(-5)\div(+20)^{\circ}\text{C}$ путем охлаждения в морозильной камере и нагрева в сушильном шкафу. После достижения заданной температуры производили изотермическую выдержку системы в течение 30 мин для выравнивания температуры по всему объему. Выплавление модельных составов из ОКФ осуществляли в воде, имеющей температуру $(+95)^{\circ}\text{C}$.

Установлено, что при захлаживании системы между рабочими поверхностями ОКФ и восковым составом (за счет его усадки) образуется воздушный зазор, величина которого зависит от степени захлаживания (рис. 4.11, а). Образующийся зазор является своеобразным компенсатором последующего теплового расширения восковой модели при нагревании системы на этапе выплавления, что обуславливает снижения брака ОКФ по растрескиванию (рис. 4.11, б). В целом, зависимость величины зазора в ис-

следованном интервале температур системы «восковая модель – огнеупорная керамическая форма» адекватно описывается выражением:

$$\Delta h = -0,0003T^3 - 0,0008T + 0,1322, \quad (4.5)$$

где Δh – зазор между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ, мм; T – температура системы «восковая модель – огнеупорная керамическая форма» перед выплавлением, $^{\circ}\text{C}$.



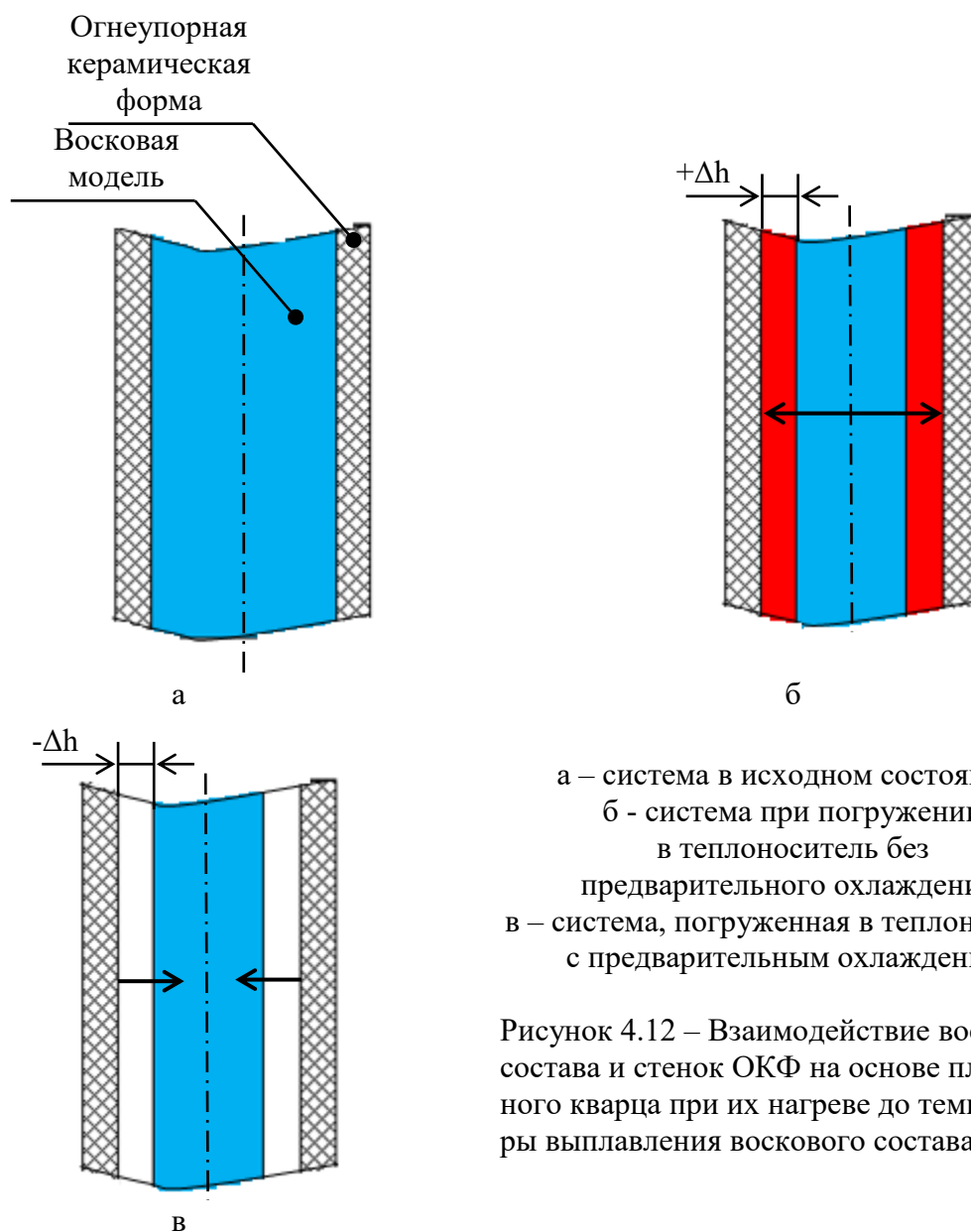
а – величина зазора; б – доля треснувших ОКФ при выплавлении

Рисунок 4.11 – Закономерность взаимодействия в системе «восковая модель – огнеупорная керамическая форма»

На рис. 4.12 представлена схема взаимодействия в системе «восковая модель – огнеупорная керамическая форма» в зависимости от состояния системы перед выплавлением (рис. 4.12, а). В зависимости от температуры системы установлены следующие закономерности взаимодействия в процессе выплавления модельного состава из ОКФ на основе плавленного кварца:

1. При температуре системы перед выплавлением в интервале $(+15) \div (+25) ^{\circ}\text{C}$ расширяющийся модельный состав будет оказывать давление на стенки ОКФ (рис. 4.12, б).

2. При температуре системы перед выплавлением в интервале $(-5) \div (+10) ^\circ\text{C}$ за счет усадки воскового состава формируется зазор величиной $0,10 \div 0,15$ мм между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ (4.12, а).
3. Воздушный зазор, образовавшийся в системе, подготовленной по схеме (рис. 4.12, а), при нагревании до температур выплавления ($90 \div 100^\circ\text{C}$) служит компенсатором теплового расширения и снижает давление на стенки ОКФ.



С целью предотвращения растрескивания ОКФ на основе плавленного кварца на практике перед операцией выплавления модельного состава необходимо обеспечивать следующее условие:

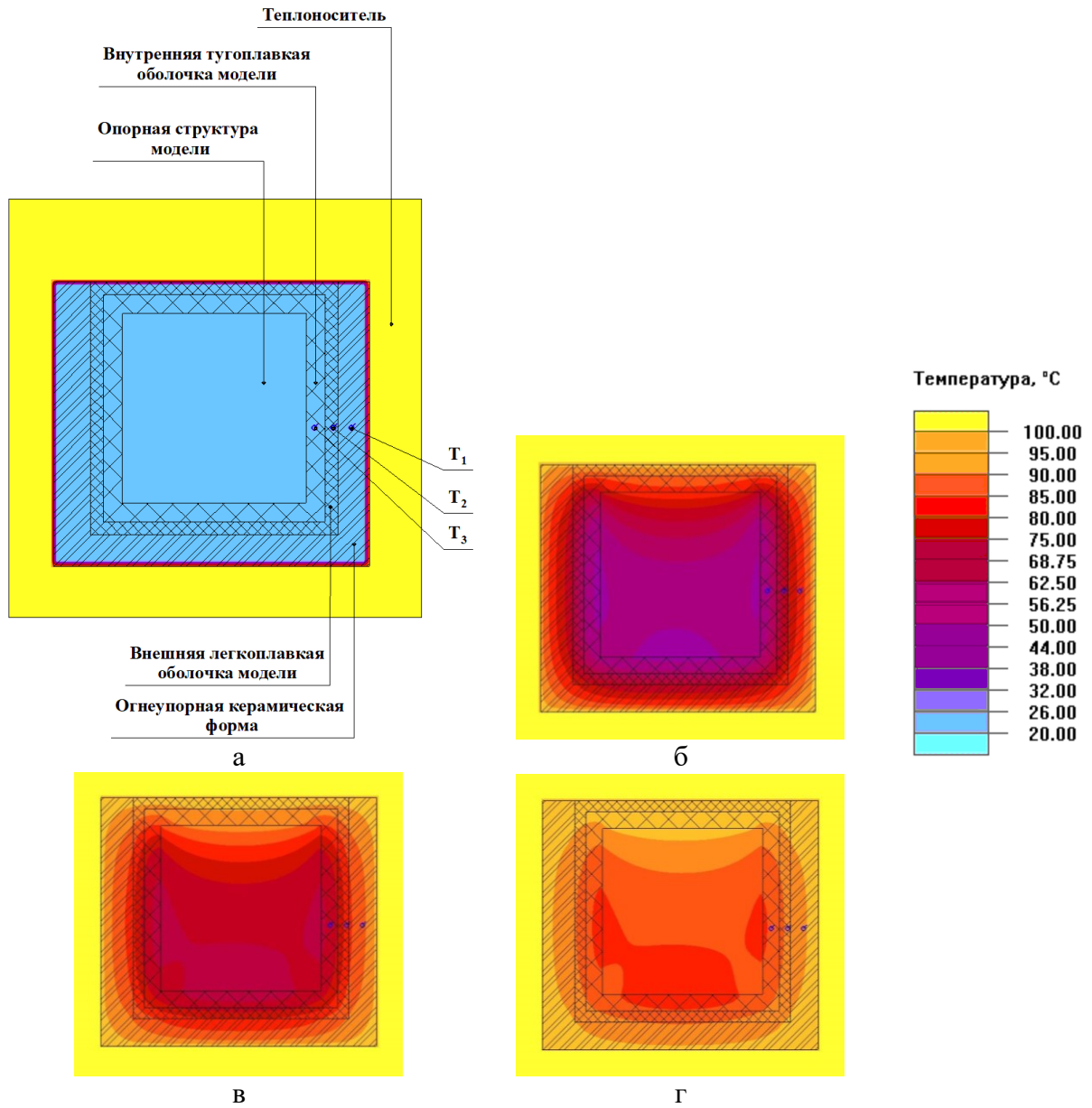
$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T = (T_{\phi 1} - T_{\phi 2}); \\ \Delta T \sim 10 \div 15^{\circ}\text{C} \text{ – для наполненных восков;} \\ \Delta T \sim 15 \div 20^{\circ}\text{C} \text{ – для ненаполненных восков,} \end{array} \right. \quad (4.6)$$

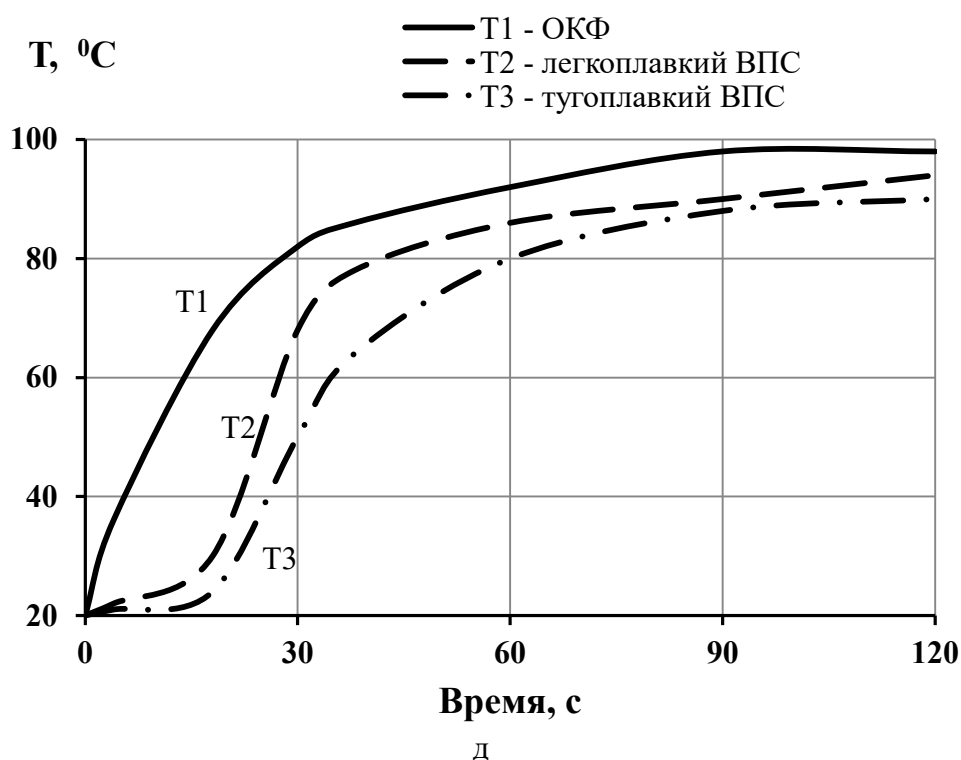
где ΔT – требуемая величина охлаждения системы «восковая модель – огнеупорная керамическая форма» относительно текущей температуры ($^{\circ}\text{C}$); $T_{\phi 1}$ и $T_{\phi 2}$ – текущая и требуемая температуры ОКФ ($^{\circ}\text{C}$).

В случае использования моделей, полученных средствами АП механизм взаимодействия в системе «разовая модель – огнеупорная керамическая форма» будет иметь свои особенности. С целью выявления особенностей взаимодействия в системе «воско-полимерная модель – огнеупорная керамическая оболочка» выполнили моделирование процесса нагрева системы до температур удаления модельного блока.

На рис.4.13 приведены результаты моделирования распределения температурных полей в системе «воско-полимерная модель – огнеупорная керамическая форма». В качестве внешней легкоплавкой оболочки выступает состав Р325ПЭ10, а в качестве тугоплавкой стержневой части Р325ПЭ50. До погружения в теплоноситель ($T \sim 100^{\circ}\text{C}$) система находится при комнатной температуре (рис. 4.13, а, д). После погружения в теплоноситель наиболее интенсивно прогревается ОКФ (рис. 4.13, д, линия Т1). Однако, из-за низкой теплопроводности материала ОКФ температурные поля в ВПС распределяются неравномерно (рис. 4.13, б, в). В течение первых 30 с температура внешней легкоплавкой оболочки (рис. 4.13, д, линия Т2) еще не достигает значений каплепадения, т.е. модельный состав только начинает прогреваться. Соответственно, еще ниже температурные значения во внутренней тугоплавкой оболочке (рис. 4.13, д, линия Т3). При дальнейшей выдержке системы в теплоносителе (рис. 4.13, в, г) внешняя легкоплавкая оболочка модели достигает температур каплепаде-

ния ($T_k = 80 \div 83^\circ\text{C}$), что позволяет прогнозировать переход легкоплавкого ВПС в вязко-подвижное состояние. При этом, расширяющаяся центральная часть модели начинает выдавливать легкоплавкую составляющую, снижая давление на внутренние стенки ОКФ.



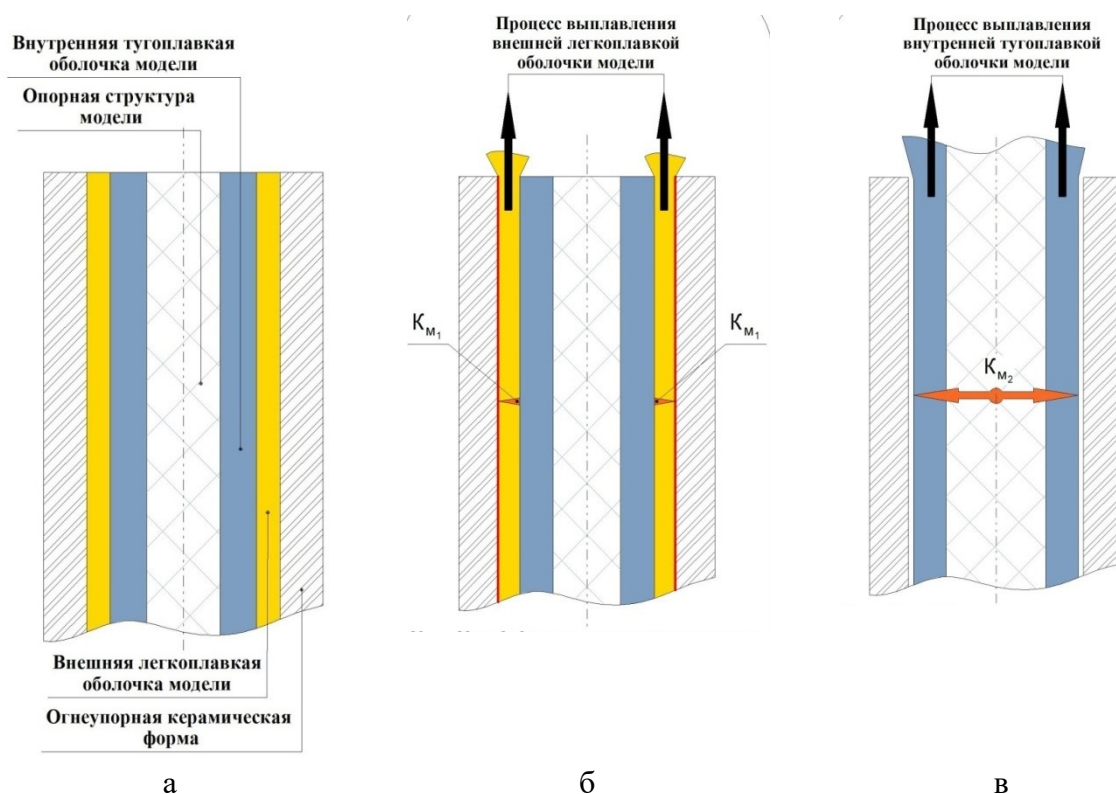


а - допогружения в теплоноситель; б - при выдержке в теплоносителе; в - в период выплавления легкоплавкой внешней оболочки; г - в период выплавления тугоплавкой центральной части; д - изменение температур в течение времени

Рисунок 4.13 - Распределение температурных полей в системе «воско-полимерная модель – огнеупорная керамическая форма» при нагревании до температуры выплавления

На основании результатов моделирования представлен механизм взаимодействия в системе «воско-полимерная модель – огнеупорная керамическая оболочка» (рис. 4.14) для случая использования 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 (рис. 4.14, б). После удаления легкоплавкой составляющей между тугоплавкой составляющей и ОКФ образуется воздушный за-

зор, обеспечивающий свободное удаление тугоплавкой части модели без дополнительного давления на стенки формы (рис. 4.14, в).



а – система при комнатной температуре;

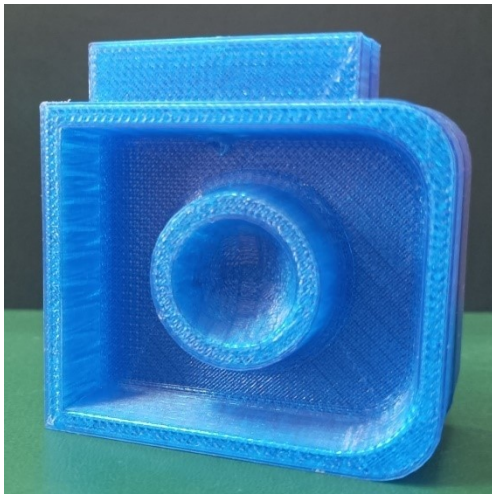
б – при погружении в теплоноситель;

в – выдержка в теплоносителе

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

Рисунок 4.14 – Взаимодействие в системе «воско-полимерная модель – огнеупорная керамическая форма»

С целью подтверждения результатов моделирования на практике была выполнена серия натуральных экспериментов. Средствами аддитивного производства были получены тестовые образцы, разработанной конструкции (рис. 4.15, а), по которым сформированы огнеупорные керамические формы (рис. 4.15, б). Удаление модели и прокалку ОКФ производили по совмещенному линейному режиму нагрева (рис. 4.16).

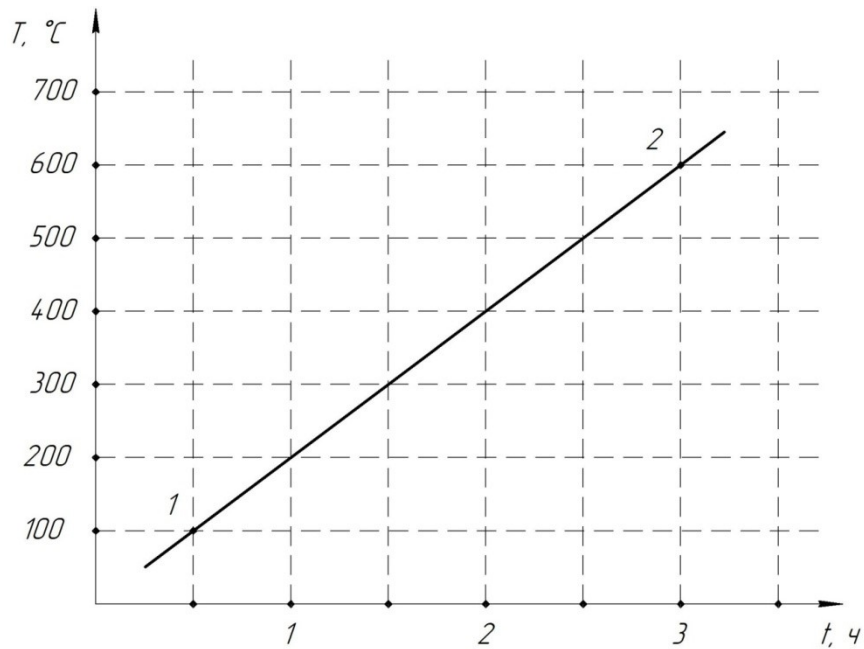


а



б

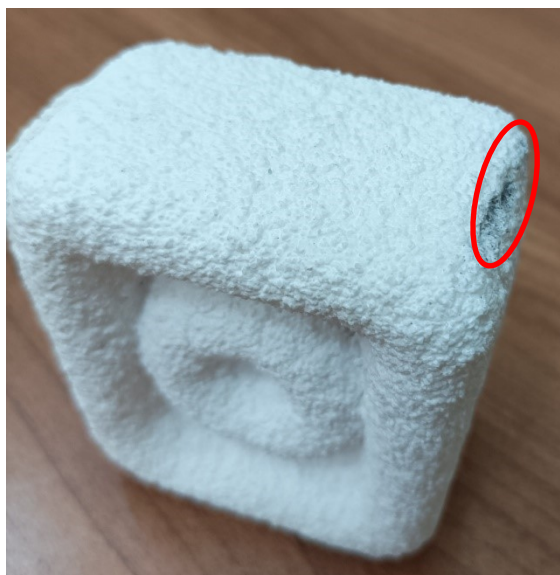
Рисунок 4.15 – Модель из ВПС (а) и огнеупорная керамическая форма (б)



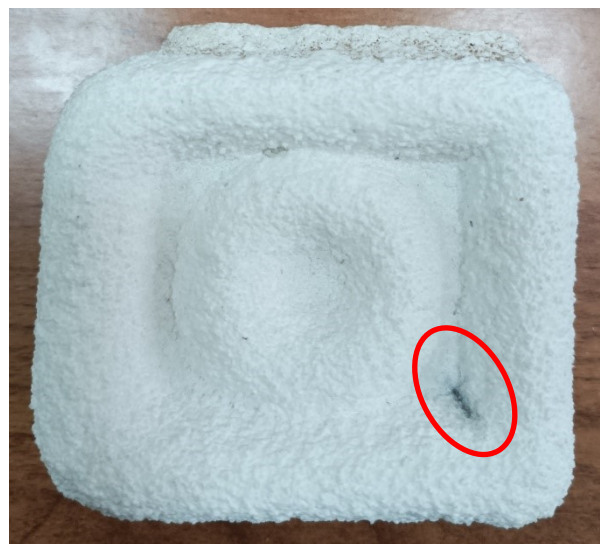
1- Загрузка керамических блоков; 2 – извлечение керамических блоков

Рисунок 4.16 – Совмещенный линейный режим нагрева и прокалики

После удаления моделей из ОКФ была произведена оценка их целостности. Было установлено, что из 20 тестовых экспериментов 65% ОКФ имели трещины в острых углах сопряжения поверхностей (рис. 4.17). Трещины идентифицировались по характерному закопчению поверхности ОКФ.



а



б

а – на внешнем остром сопряжении; б – на внутреннем остром сопряжении

Рисунок 4.17 – Трещины в ОКФ при совмещенном линейном режиме

Для опытного, штучного и мелкосерийного производств невозможно применить какой-то универсальный технологический прием при интеграции технологий АП и стандартного процесса литья по выплавляемым (выжигаемым) моделям. В зависимости от габаритов и геометрической сложности модели отливок возможны следующие варианты, включающие элементы технологий АП:

- модели ЛПС и отливки изготовлены по технологии 3D-печати из ВПС;
- модели отливки изготовлены по технологии 3D-печати из полимеров (PLA), а модели ЛПС – из восковых составов по серийной технологии;
- модели ЛПС и отливки изготовлены по технологии 3D-печати из полимеров (PLA).

На основании результатов моделирования и натурных экспериментов удаление моделей, полученных по технологии 3D-печати из ВПС, и прокатку ОКФ целесообразно проводить по ступенчатому режиму, который будет обеспечивать следующие условия (рис. 4.18):

- выплавление легкоплавкой оболочки воско-полимерной модели (I этап);

- выплавление тугоплавкой каркасной воско-полимерной оболочки модели (II этап);
- выжигание остаточной доли воско-полимерной модели, совмещенное с прокалкой ОКФ (III этап).

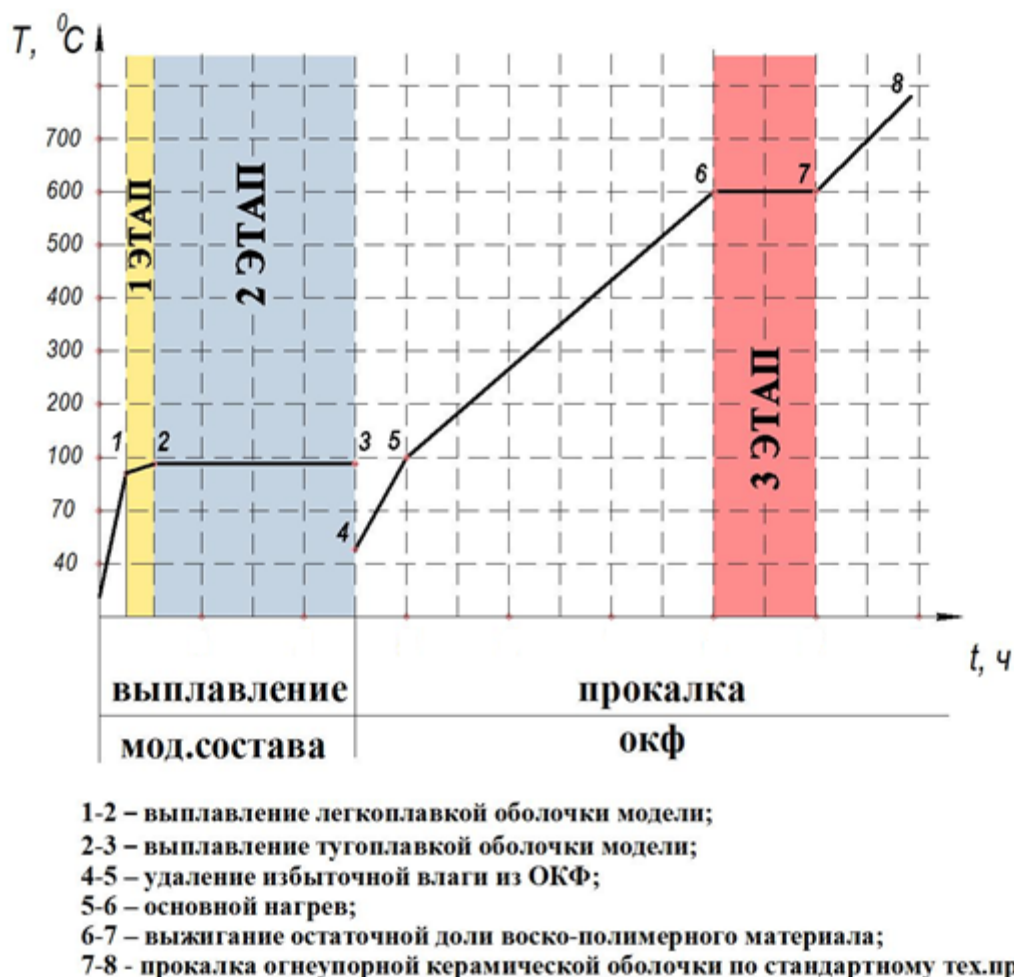


Рисунок 4.18–Ступенчатый режим подготовки ОКФ к литью с использованием воско-полимерных моделей, полученных средствами АП

При прокалке опытных образцов по ступенчатому режиму было установлено, что из 20 тестовых экспериментов все ОКФ не имели брака по растрескиванию.

Этот же режим прокалки можно использовать при сочетании «модель отливки из PLA - модели элементов ЛПС из восковых составов».

При использовании полимерных моделей, полученных средствами АП на основе PLA, совмещенный ступенчатый режим также является целесообразным (рис. 4.19).

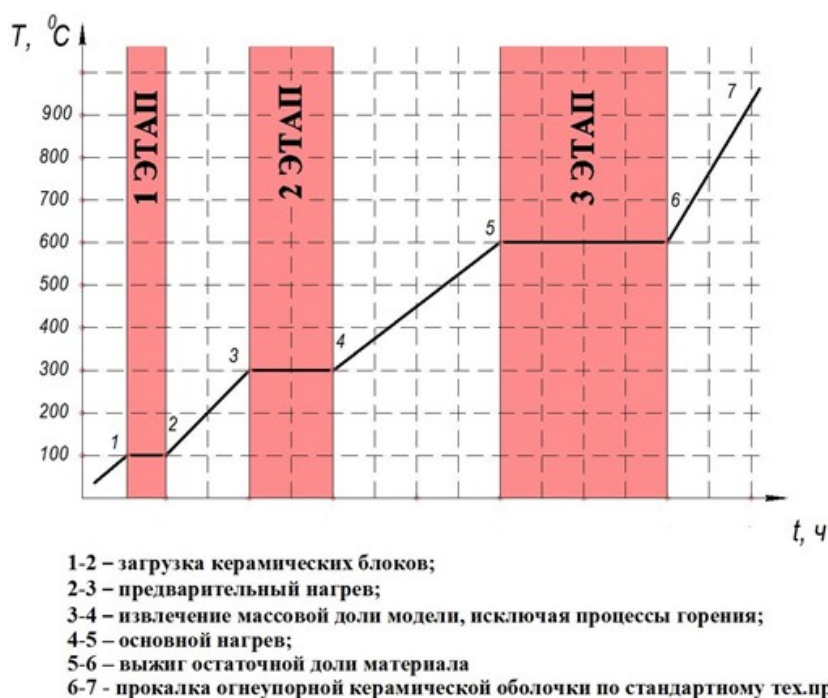


Рисунок 4.19 – Ступенчатый режим подготовки ОКФ к литью с использованием полимерных моделей, полученных средствами АП

Особенности температурного режима удаления полимерных моделей в совмещенном режиме прокалки ОКФ приведены в табл.4.5

Таблица 4.5 – Температурные режимы совмещенного процесса удаления моделей и прокалки ОКФ

| № Этапа | Температурный интервал, °C | Процесс |
|---------|----------------------------|--|
| 1 | 80-120 | Термостабилизационный нагрев |
| 2 | 260-310 | Извлечение массовой доли полимерной модели исключая процессы открытого горения |
| 3 | 580-650 | Выжиг остаточной доли полимерного материала |

*Меньшие значения используются на малогабаритных моделях с простой геометрией, большие значения на крупногабаритных фасонных моделях

На основании проведенных исследований была разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-8 «Подготовка огнеупорных керамических

форм к литью при использовании воско-полимерных моделей» (Приложение Б).

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Определено содержание полиэтилена в качестве пластифицирующего агента в воско-полимерных составах, полученных на основе наполненных восков марок Romocast 252 и Romocast 325, при котором обеспечиваются оптимальные температуры каплепадения, что обеспечивает их возможность использования в 3D-печати по FDM-технологии. Установлено, что с повышением доли пластификатора температуры каплепадения увеличиваются.

2. Выполнена модернизация экструзионной линии и определены составы и температурные режимы, обеспечивающие получение филаментов требуемого качества. Установлена зависимость температуры экструзии филамента $T_{эф}$ при 3D-печати от температуры каплепадения воско-полимерного состава T_k : $T_{эф} \pm 5 = T_{ВПС} - (15 \div 25)$, °С.

3. Впервые исследованы усадочные процессы в воско-полимерных составах в зависимости от времени выдержки после печати. Установлено, что основные полимеризационные процессы в синтезированных воско-полимерных модельных составах проходят во временном интервале до 60 мин.

4. Технологическая усадка α образцов, полученных на основе Romocast252 в зависимости от времени выдержки изменяется в интервале $0,27 \div 0,47\%$. Увеличение доли пластификатора с 25 до 50% способствует снижению значений α . Усадка образцов, полученных на основе Romocast325 изменяется в интервале $0,20 \div 0,45\%$, а с увеличением доли пластификатора с 10 до 50% значения α_n снижаются. При одинаковом количестве пластификатора в составе ВПС значения α_n ниже в образцах, полученных на основе Romocast325.

5. Установлено, что увеличение доли пластификатора оказывает стабилизирующее воздействие на склонность образцов к изменению ли-

нейных размеров (ΔL) в зависимости от температуры в интервале 30÷60 мин. Образцы из ВПС на основе Romocast252 при содержании пластификатора 50% изменяют свою длину в исследованном интервале температур с 0 до 0,13%. Длина образцов на основе Romocast325 при содержании пластификатора 25 и 50% изменяется практически одинаково в интервале от 0 до 0,074%. Сделан вывод о том, что ВПС на основе Romocast325 будут оказывать меньшее давление на внутренние стенки огнеупорной керамической формы при нагревании системы до температур выплавки модельных блоков.

6. Установлено, что синтезированные ВПС по показателям, обеспечивающим геометрическую точность модели (α , %) и степень ее давления на стенки ОКФ (ΔL , %) при удалении, синтезированные ВПС (P325ПЭ25 и P325ПЭ50) 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.

7. С применением САПР «PolygonX» разработаны принципы проектирования воско-полимерных комбинированных моделей, состоящих из внешней легкоплавкой оболочки на основе ВПС P252ПЭ25 или P325ПЭ10 ($T_k \sim 79\div 82^\circ\text{C}$) и внутренней тугоплавкой части – на основе P252ПЭ50 или P325ПЭ50 ($T_k \sim 90\div 95^\circ\text{C}$). Разработаны режимы аддитивного производства моделей из филаментов на основе синтезированных марок ВПС.

8. Исследовано взаимодействие в системах «восковая модель – огнеупорная керамическая форма» (I) и «воско-полимерная модель – огнеупорная керамическая форма» (II).

9. Для обеспечения целостности огнеупорной керамической формы в системе 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 «восковая модель – огнеупорная ке-

рамическая форма» относительно текущей температуры; $T_{\phi 1}$ и $T_{\phi 2}$ – текущая и требуемая температуры ОКФ (причем для наполненных восков: $\Delta T \sim 10 \div 15^{\circ}\text{C}$; для ненаполненных восков $\Delta T \sim 15 \div 20^{\circ}\text{C}$).

10. В системе «воско-полимерная модель – огнеупорная керамическая форма» (II) нивелирование давления на внутренние стенки ОКФ 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.

11. На основании результатов моделирования и натуральных экспериментов разработаны ступенчатые режимы нагрева ОКФ, совмещенные с удалением моделей и прокалкой ОКФ для следующих основных вариантов: модели ЛПС и отливки изготовлены по технологии 3D-печати из ВПС; модели отливки изготовлены по технологии 3D-печати из полимеров (PLA), а модели ЛПС – из восковых составов по серийной технологии; модели ЛПС и отливки изготовлены по технологии 3D-печати из полимеров (PLA).

12. На основании проведенных исследований разработаны технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-7 «Получение воско-полимерных моделей средствами аддитивного производства по FDM-технологии» и ТИ-ЛВТ-8 «Подготовка огнеупорных керамических форм к литью при использовании воско-полимерных моделей».

5 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1 Опытные-промышленные испытания технологии получения отливок литьем в огнеупорные керамические формы с применением воско-полимерных моделей, изготовленных средствами аддитивного производства

Для изготовления отливок в единичных и мелкосерийных экземплярах с применением аддитивного производства в Центре литейных технологий СамГТУ разработаны технологии изготовления отливок единичной и мелкой серийности с применением технологии АП по FDM-процессу [109, 120-126].

Разрабатывали технологию получения отливки «Корпус» из сплава АК9ч (табл. 5.1). На этапе подготовки производства был выполнен следующий комплекс технологических решений:

- разработка конструкции литниково-питающей системы с применением программного комплекса моделирования литейных процессов LVMFlow 2.92;
- изготовление воско-полимерных моделей по FDM-технологии на отечественных машинах АП Designer XL;
- контроль размеров полученных моделей с помощью 3D-сканера RengeVisionSpectrum;
- сборка комбинированных модельных блоков и создание ОКФ; подготовка ОКФ к литью и получение опытных отливок в количестве 30 шт.

Таблица 5.1 - Химический состав сплава АК9ч (ГОСТ 1583-93)

| Основные легирующие, % | | | Примеси, %, не более | | | | |
|------------------------|-----------|---------|----------------------|-----|-----|-----|-------|
| Si | Mg | Mn | Fe | Cu | Zn | Ni | Ti+Zr |
| 8,0-10,5 | 0,20-0,35 | 0,2-0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 0,12 |

На рис. 5.1 представлена математическая модель отливки «Корпус», спроектированная с учетом значений коэффициентов линейных усадок

ВПС марок P252ПЭ25 (внешняя легкоплавкая оболочка) и P325ПЭ50 (внутренняя тугоплавкая основа) и сплава АК9ч.

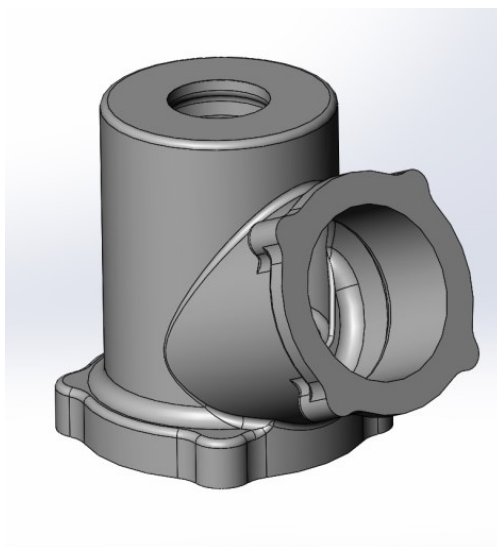


Рисунок 5.1 – Модель отливки «Корпус»

Технологичность разработанной конструкции литниково-питающей системы (рис. 5.2) и параметров заполнения формы расплавом проверяли с применением САМ ЛП LVMFlow 2.92. По результатам моделирования было установлено, что разработанная конструкция ЛПС обеспечивает питание отливки и направленное затвердевание во всех сечениях, что обуславливает отсутствие дефектов усадочного характера в теле отливки (рис. 5.3).

Воско-полимерные модели отливок и элементы литниково-питающих систем были получены средствами аддитивного производства по FDM-технологии (рис. 5.4).

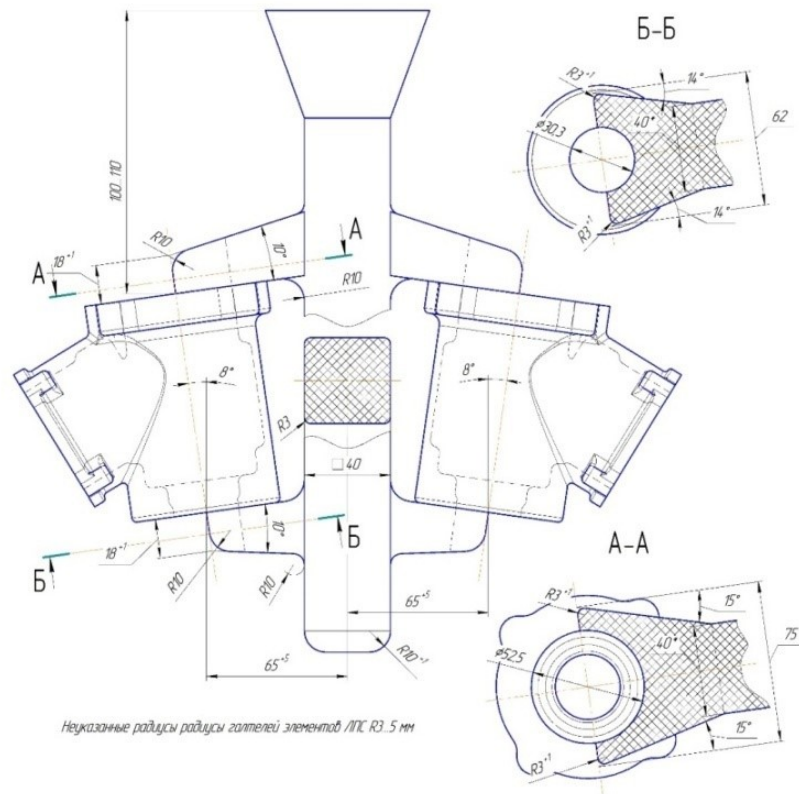


Рисунок 5.2 – Конструкция модельного блока для получения отливки «Корпус»

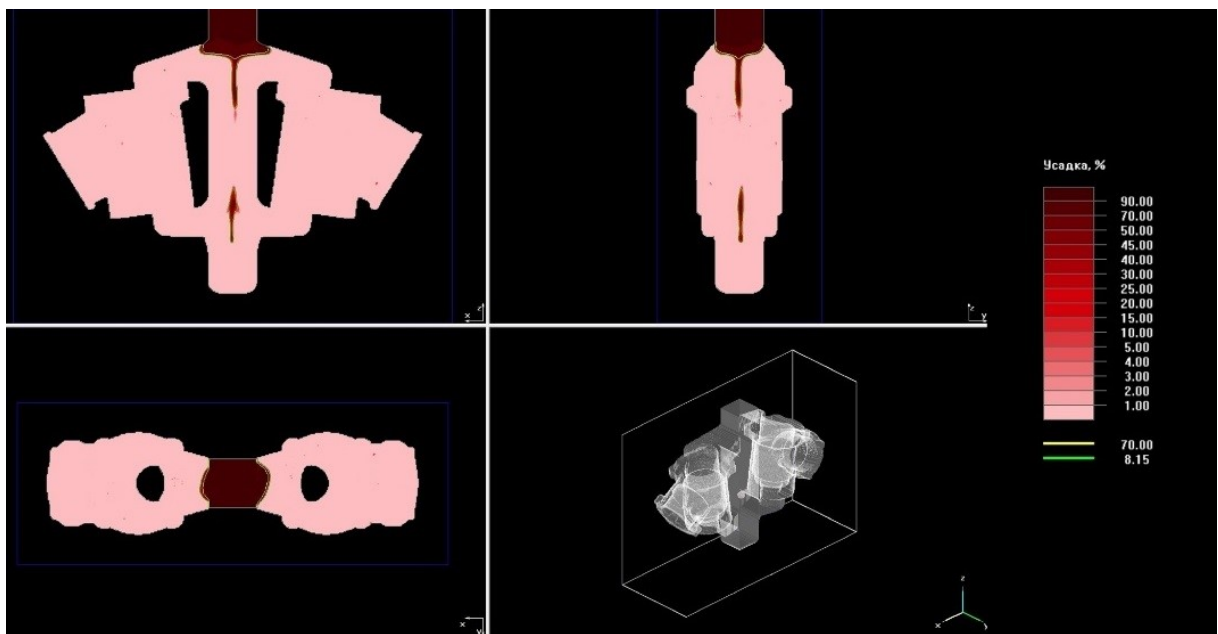


Рисунок 5.3 – Результаты моделирования разработанной конструкции ЛПС отливки «Корпус»

Огнеупорную керамическую форму изготавливали с использованием плавленого кварца «Кефрон», связующего «Сиалит-20» по разработанному технологическому процессу. Модельный блок удаляли из ОКФ по совмещенному ступенчатому режиму разработанному для моделей из ВПС. Совмещенный режим реализовывали в электрической печи сопротивления при температуре 850°C в течение 4 ч. По результатам визуального контроля все ОКФ после прокали брака по растрескиванию не имели.



а



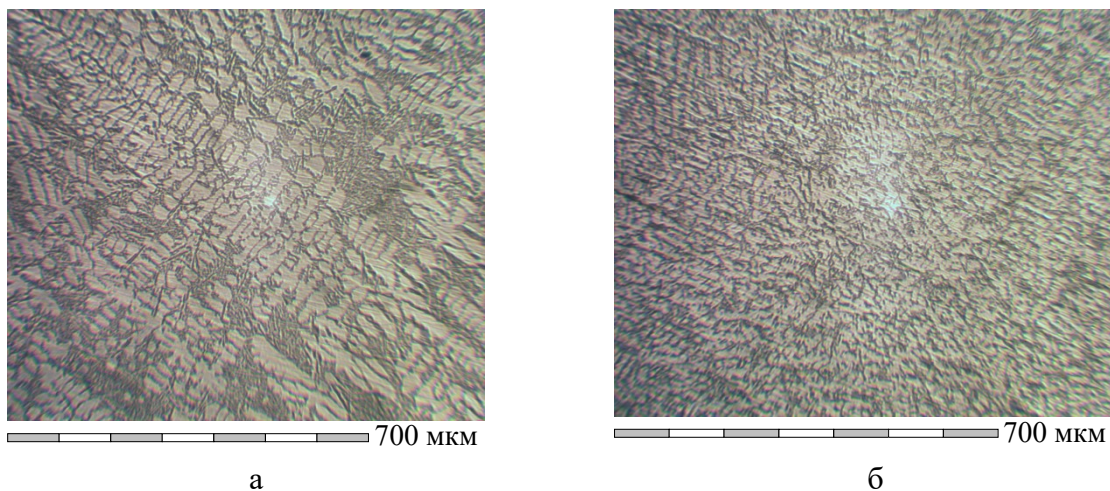
б

а – питатели; б – модели отливок

Рисунок 5.4 – Элементы ЛПС и модели отливок, полученные из ВПС по FDM-технологии

Состав шихты для приготовления рабочего сплава АК9ч представлен в табл. 5.2. Применяемые отходы перед загрузкой в плавильную печь предварительно очищали и обезжиривали. Баночные отходы после очистки подвергали прессованию в брикеты. Модифицирование расплава микрокристаллической лигатурой AlSr10 в количестве 0,06% по Sr производили при 720÷730 °С, после выдержки в течение 15 мин расплав рафинировали флюсовой комплексной композицией (ФКК) «Эвтектика» (ТУ-ВУ

100196035.018-2010). Микроструктура сплава до и после модифицирования представлена на рис. 5.5. Видно, что включение в состав шихты деформированных отходов и модифицирование микрокристаллической лигатурой оказывает положительное наследственное влияние и обеспечивает получение хорошо модифицированной структуры.



а – до модифицирования; б – после модифицирования
Рисунок 5.5 – Микроструктура рабочего сплава АК9ч

Температура заливаемого расплава – $730^{\pm 5}$ °С. Перед началом заливки формы имели температуру 200^{-20} °С. Полученные отливки остывали на воздухе. После охлаждения производили выбивку отливок и финишные операции по отделению элементов ЛПС и зачистке. По результатам входного контроля у заказчика все отливки в количестве 30 шт. были признаны годными (рис.5.6).

Таблица 5.2 - Шихтовые материалы для приготовления сплава АК9ч

| № п/п | Шихтовые материалы | Вид, характеристика |
|-------|---|--|
| 1 | Алюминий электротехнический марки А5Е | Электротехнические отходы в виде проволоки \varnothing 3-5 мм |
| 2 | Магний чушковый Мг90 ГОСТ 804-93 | Первичный чушковый магний |
| 3 | Лигатура AlSi20 ГОСТ 53777-2010 | Чушковая лигатура |
| 4 | Отходы сплава 3104 (система Al-Mn-Mg) ГОСТ 54564-2011 | Баночные отходы |
| 5 | Лигатура AlSr10 ГОСТ 53777-2010 | Микрокристаллическая лигатура для модифицирования структуры, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе |



Рисунок 5.6 – Отливка «Корпус» из сплава АК9ч

Разработанную технологию применяли для получения отливок «Крышка малая» из сплава АК9ч по заказу НКО «Музей внедорожных машин» (г. Самара). Математическая модель отливки представлена на рис. 5.7. В связи с простой геометрической конфигурацией отливки модель печаталась по FDM-технологии из легкоплавкого ВПС марки P252ПЭ25 (рис. 5.8). Отливки в количестве 4 шт. были получены по разработанной технологии и переданы заказчику (Приложение В).

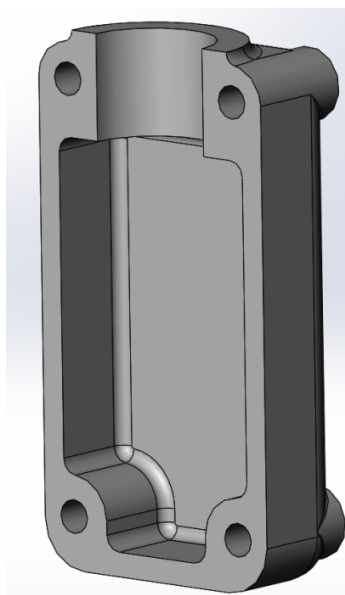


Рисунок 5.7 – Математическая модель отливки «Крышка малая»

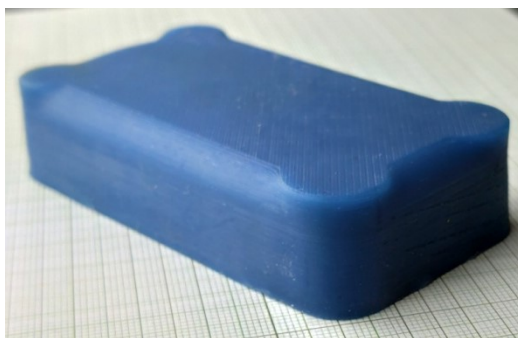


Рисунок 5.8 – Модель отливки «Крышка малая», полученная по FDM-технологии

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 трескиванию ОКФ при подготовке к литью.

5.2 Разработка технологии изготовления комбинированных воско-полимерных моделей, полученных средствами аддитивного производства

По заказу 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.

В целях оптимизации процессов АП произведено разделение получаемых моделей на 4 сегмента с последующей сборкой за счет применения специализированных крепежных элементов. Применение таких элементов позволило упростить последующую сборку комбинированных модельных блоков за счет возможности регулировки сегментов модели в технологическом процессе нанесения огнеупорного покрытия.

В связи с малыми объемами производимых филаментов из ВПС было принято решение выполнить печать моделей отливок по FDM-технологии из филамента на основе PLA (рис. 5.9).



а

б

а- модель отливки «Корпус камеры сгорания»; б- полимерная модель отливки «Корпус диффузора»

Рисунок 5.9 – Полимерные модели из PLA, полученные средствами АП

Остальной производственный цикл был реализован в производственных условиях АО «Металлист-Самара» 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 модельных составов регламентировано технологическими инструкциями предприятия.

На рис. 5.10 приведены этапы сборки комбинированного модельного блока отливки «Корпус диффузора».



а

б

в

а- установка моделей ЛПС на внутреннюю обечайку модели; б- установка моделей ЛПС на внешнюю обечайку модели; в- финишная сборка комбинированного модельного блока

Рисунок 5.10 – Этапы сборки комбинированного модельного блока
«Корпус диффузора»

При сборке комбинированного модельного блока отливки «Корпус камеры сгорания» крепежные элементы сегментов полимерной модели также выполняли функции ребер жесткости получаемой отливки с целью предотвращения коробления тонкостенных частей в результате термических деформаций при кристаллизации (рис.5.11) и последующей термообработке.



Рисунок 5.11 – Комбинированный модельный блок отливки «Корпус камеры сгорания»

Для изготовления ОКФ использовали плавеный кварц торговой марки «Кефрон». Для приготовления суспензии использовали готовое связующее марки ГС-20П-А. Сушку форм осуществляли в аммиачных камерах в установке мод. 2155А. Сушка оболочек производилась в течение 30 мин естественным путем, затем 45 мин в парах аммиака.

Удаление восковых моделей из ОКФ производили в водяных ваннах при температуре теплоносителя 90-95°С в течение 2,5-3 часа. По результатам предварительного контроля на этом этапе все ОКФ были признаны годными.

Выжигание полимерной модели и прокалку ОКФ проводили по разработанному ступенчатому режиму для комбинированных модельных блоков в прокалочной печи с выкатным подом. Финишная прокалка проводилась по стандартному технологическому режиму предприятия при температуре

1100⁻²⁰ °С с выдержкой в течение 6 ч. ОКФ для получения отливки «Корпус камеры сгорания» представлена на рис.5.12.



Рисунок 5.12 – Огнеупорная керамическая форма для отливки «Корпус камеры сгорания»

Заливку прокаленных ОКФ из стали ВНЛ-3 осуществляли на установке ВИАМ-24 при температуре 1570⁺¹⁰ °С. Температура ОКФ при заливке составляла ~ 850^{±50}°С. После заливки формы охлаждали естественным путем на воздухе в течение 12 часов. Контроль качества опытных отливок не выявил поверхностных и внутренних дефектов. На рис.5.13 представлена отливка «Корпус камеры сгорания» на этапе финишных операций.



а

б

а- отливка с элементами ЛПС; б – отливка

Рисунок 5.13 - 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 операции нагрева ОКФ под заливку. Достижение вышеперечисленных показателей при получении опытных отливок из стали ВНЛ-3 обеспечили снижение стоимости одной отливки на 45% по сравнению со стандартным технологическим процессом предприятия, за счет отсутствия необходимости изготовления дорогостоящей модельной оснастки. Полученные результаты подтверждены актом опытно-промышленных испытаний (Приложение Г).

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Опытные-промышленные испытания полностью подтвердили результаты экспериментальных исследований.
2. Филаменты, получаемые на основе синтезированных ВПС, обеспечивают требуемое качество моделей, производимых по FDM-технологии средствами аддитивного производства.
3. Впервые показана эффективность получения отливок единичной и мелкой серии литьем по выплавляемым моделям с использованием воско-полимерных и комбинированных моделей, изготовленных средствами аддитивного производства.
4. Внедрение разработанных технологий в ЦЛТ СамГТУ для получения отливок «Корпус» и «Крышка малая» из сплава АК9ч обеспечило: сокращение сроков производства ответственных отливок из алюминиевых сплавов способом ЛВМ на 80%; увеличение выхода годных отливок в 1,8 раза; устранение брака по растрескиванию ОКФ при подготовке к литью; снижение себестоимости получения отливок на 30%.
5. Внедрение разработанной технологии в производственный процесс АО «Металлист-Самара» при получении отливок «Корпус камеры сгорания» и «Корпус диффузора» из стали ВНЛ-3 в огнеупорные керамические формы с применением комбинированных воско-полимерных моделей, полученных средствами аддитивного производства, обеспечило следующие показатели: сокращение времени подготовки производства в 2 раза за счет отсутствия необходимости изготовления модельной оснастки; снижение себестоимости ОКФ на 15% за счет уменьшения количества слоев огнеупорного покрытия при создании ОКФ; устранение брака ОКФ по растрескиванию; устранение операции нагрева ОКФ под заливку; сокращение времени прокаливания ОКФ после технологических операций удаления модельного состава в 1,5 раза; повышение выхода годных отливок с 40 до 75%.

6. Результаты опытно-промышленных испытаний подтверждены актами приема-сдачи работ, использования и внедрения результатов работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Выполненные экспериментальные исследования и опытно-промышленные испытания доказали эффективность интеграции элементов аддитивных технологий на этапе подготовки производства фасонных отливок при литье по выплавляемым моделям.

Разработанный комплекс технологических решений для аддитивного производства воско-полимерных и комбинированных моделей способствует повышению качества фасонных отливок, снижению энерго- и трудоемкости, сокращению сроков освоения новых отливок, получаемых литьем по выплавляемым моделям.

На основании выполненных исследований сделаны следующие основные выводы.

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 $(-5) \div (+35)$ °C 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 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 (°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 23⁰С до температур близких к температурам стеклования T_c (65⁰С для PLA и 100⁰С для PMMA) значения α_L увеличиваются; в интервале рабочих температур (50÷65⁰С для PLA и 70÷100⁰С для PMMA) с увеличением K_0 значения α_L уменьшаются.

5. *Обосновано*, что по совокупности значений зольного остатка A (%), технологической свободной линейной усадки α_n (%) и коэффициента теплового линейного расширения α_L (⁰С⁻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 $T_{ВПС}$ (⁰С), снижается технологическая усадка α_n (%) 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 $T_{эф}$ при 3D-печати от температуры каплепадения воско-полимерного состава T_k : $T_{эф} \pm 5 = T_{ВПС} - (15 \div 25)$, °С.

8. *Установлено*, что синтезированные ВПС по показателям, обеспечивающим геометрическую точность модели (α_n , 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 $\Delta T = (T_{ф1} - T_{ф2})$, где ΔT – требуемая величина охлаждения системы относительно текущей температуры;

$T_{ф1}$ и $T_{ф2}$ – текущая и требуемая температуры ОКФ (для наполненных восков: $\Delta T \sim 10 \div 15^{\circ}C$; для ненаполненных восков $\Delta T \sim 15 \div 20^{\circ}C$).

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.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Специальные способы литья: Справочник [текст] / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич и др.; под общ.ред. В.А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
2. Pattnaik, S., Karunakar, D. B., Jha, P.K. Developments in investment casting process—A review [текст] / S. Pattnaik, D. B. Karunakar, P.K. Jha // Journal of Materials Processing Technology – 2012. - № 212. – С. 2332– 2348.
3. Иванов, В.Н. Литье по выплавляемым моделям [текст] / В.Н. Иванов, С.А. Казеннов, Б.С. Курчман и др.; под общ.ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. – 3 изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
4. Иванов, В.Н. Литье по выплавляемым моделям [текст] / В.А. Озеров; под общ.ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. – 2 изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1971 - 436 с
5. Репях, С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям [текст] / С.И. Репях. Днепропетровск: Лира, 2006. – 1056 с.
6. Братухин, А.Г. Расширение производства точных отливок литьем по выплавляемым моделям [текст] / А.Г. Братухин, Н.Л. Кривов, Е.Б. Качанов // ВИАМ/1993-201267. <http://viam.ru/public/files/1993/1993-201267.pdf>.
7. Оспенникова, О.Г. Модельные композиции на основе синтетических материалов для литья лопаток ГТД [текст] / О.Г. Оспенникова, А.Н. Шутов, Л.В. Пикулина, А.М. Душкин // Литейное производство. – 2003. - №1. С. 21-23.
8. Соколов, А.В. Особенности применения модельных составов на основе синтетических материалов при получении моделей лопаток газотурбинных двигателей при ЛВМ [Текст] / А.В. Соколов, К.В. Никитин // Литейное производство сегодня и завтра: труды международ-

ной научно-практической конференции. СПб.: Культ-информ-пресс, 2014, С.331-334.

9. 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.

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

11. Прокопчук, Н.Р. Исследование возможности использования модифицированной канифоли в модельных составах для точного литья [текст] / Н.Р. Прокопчук, Н.Д. Горщарик, А.Ю. Клюев, Н.Г. Козлов и др.// Труды БГТУ. – 2012. - №4. – С.106-118.

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

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

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

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

16. Заславская, О.М. Влияние модельного состава на трещинообразование форм в литье по выплавляемым моделям [текст] / О.М. За-

славская, В.К. Дубровин, Ф.М. Савин, Н.В. Низовцев // Технологии металлургии, машиностроения и металлообработки. – 2020. - №19. – С. 164-170.

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

18. Дубровин, В.К. Перспективы неорганических связующих на основе оксида кремния [текст] // Тр. XIII Съезда Литейщиков России. Челябинск: Издательский центр. ЮУрГУ. – 2017. – С.217-220.

19. Дубровин, В.К. Ускоренное изготовление керамических оболочковых форм ЛВМ на водных связующих [текст] // В.К. Дубровин, Б.А. Кулаков, А.В. Карпинский, О.М. Заславская // Тр. XV Съезда Литейщиков России. М.: Российская ассоциация литейщиков. – 2021. – С. 255-257.

20. Емельянов, В.О. Технологические характеристики водных связующих для ЛВМ [текст] / В.О. Емельянов, К.В. Мартынов, А.К. Наумова, Е.С. Екимова // Литейное производство. – 2013. - №6. – С.23-25.

21. Емельянов, В.О. Водный раствор кремнезоля как альтернатива этилсиликату в ЛВМ [текст] // В.О. Емельянов, К.В. Мартынов, В.Н. Мутилов, А.В. Соколов, В.П. Суханова // Литейное производство. – 2013. - №3. – С.27-28.

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

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

24. Селиванова, Е.А. Оптимизация прокаливания оболочковых форм для литья по выплавляемым моделям [текст] / Е.А. Селиванова, В.П. Чернов // Литейщик России. – 2010. - №1. – С.37-39.
25. Соболевский, В.М. Состав растворов, полученных при гидролизе ЭТС-32, ЭТС-40 и ЭТС-50 [текст] / В.М. Соболевский, С.И. Клещевникова, Г.А. Дубровская и др. // Литейное производство. – 1974. - №9. – С.27-29.
26. Трандофилова, В.А. Физико-химические явления при изготовлении и применении огнеупорных покрытий [текст] / В.А. Трандофилова // В сб. Современная технология точного литья по выплавляемым моделям. М.: МАШГИЗ. – 1954. – С.44-53.
27. Гуляева, Т.Б. Этилсиликатные суспензии для керамических форм [текст] / Т.Б. Гуляева, М.А. Иоффе, В.Н. Максимков, Г.И. Вечерская // Литейное производство. – 1992. - №6. – С.18.
28. Фирсов, В.Г. Живучесть этилсиликатных связующих [текст] / В.Г. Фирсов, В.Ф. Гаранин, В.А. Озеров // В сб. Повышение качества и эффективности литья по выплавляемым моделям. М.:МДНТП. – 1989. – С.36-42.
29. Лоханкин, А.В. Новое готовое связующее для точного литья [текст] / А.В. Лоханкин // Литейщик России. – 2012. - №5. – С.42-44.
30. Кулаков, Б.А. Пути снижения дефектности отливок из никелевых сплавов при ЛВМ [текст] / Б.А. Кулаков, В.К. Дубровин, А.Б. Кулаков // Литейное производство. – 1995. - №10. – С.24-25.
31. Савельев, Ю.Н. Применение связующего «Сиалит-20» в крупногабаритном литье по выплавляемым моделям [текст] / Ю.Н. Савельев, А.С. Грибанов, В.С. Кучеренко // Литейщик России. – 2006. - №5. – С.26-28.
32. Иванов, В.Н. Перспективы использования кремнезольного связующего [текст] / В.Н. Иванов, И.Н. Гагин // Литейное производство. – 2000. - №7. – С.42-43.

33. Никифоров, С.А. Отечественные кремнезоли для литейного производства [текст] / С.А. Никифоров, П.А. Никифоров, Ф.А. Закиров // Литейное производство. – 2001. - №1. – С.27-28.
34. Моисеев, В.С. Повышение качества литых лопаток ГТД [текст] / В.С. Моисеев, М.С. Варфоломеев, А.С. Муркина, Г.И. Щербакова // Литейщик России. – 2012. - №5. – С.36-38.
35. Рассохина, Л.И. Исследование свойств воднодисперсионного связующего REMAL 20 и суспензий на его основе для изготовления керамических форм в производстве отливок из γ -TiAl сплавов [текст] / Л.И. Рассохина, О.Н. Битюцкая, П.И. Парфенович, А.Р. Нарский // Новости материаловедения. Наукаитехника. – 2015. №4. – С.6
36. Болдин, А.Н. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: Справочник [текст] / А.Н. Болдин, Н.И. Давыдов, С.С. Жуковский и др. М.: Машиностроение, 2006. – 507 с.
37. Верцюх, С.С. Ресурсосберегающая технология формирования с применением алюмоборфосфатного концентрата в литье по выплавляемым моделям [текст] / С.С. Верцюх // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Челябинск. – 2014. – 20 с.
38. Рассказов, В.Д. Плавленый кварц в точном литье [текст] / В.Д. Рассказов, Н.М. Андреев // Литейное производство. – 1971. - №2. – С.39.
39. Матусевич, И.С. Плавленый кварц – термостабильный огнеупор для точного литья [текст] / И.С. Матусевич // В сб. Повышение качества и эффективности литья по выплавляемым моделям. М.:МДНТП. – 1989. – С.56-59.
40. Голанов, С.П. Керамические формы из плавленого кварца для литья крупногабаритных кольцевых заготовок [текст] / С.П. Голанов, Л.И. Ефимова // Литейщик России. – 2006. - №9. – С.36-37.

41. Голанов, С.П. Внедрение прогрессивных литых заготовок в газо-турбинных двигателях наземного применения [текст] / С.П. Голанов // Литейщик России. – 2007. - №6. – С.11-13.
42. Горшков, В.С. Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений: Учеб. для вузов по спец. «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» [текст] / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, Н.Ф. Федоров. М.: Высшая школа. – 1988. – 400 с.
43. Каблов, Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) [текст] / Е.Н. Каблов. М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
44. Чернов, Н.М. Технологические основы процессов изготовления тонкостенных стальных деталей транспорта [текст] / Н.М. Чернов, В.А. Аксенов. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2001. – 156 с.
45. Гуляев, Б.Б. Решенные и нерешенные задачи теории литейных процессов [текст] / Б.Б. Гуляев // Литейное производство. – 1990. -№9. – С. 2-3.
46. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации [текст] // Указ Президента РФ № 642 от 01.12.2016 г.
47. Стратегия развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года [текст] // Распоряжение Правительства РФ № 1913-р от 14.07.2021 г.
48. ISO/ASTM 52900 «Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology».[текст] // ASTM International. 2015. 19 с.
49. ГОСТ Р57558-2017 Национальный стандарт российской Федерации. «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения»[текст]/М.: Стандартиформ: Изд-воФГУП «Стандартиформ». 2018. – 12 с.

50. ГОСТ Р 59184-2020 Национальный стандарт российской федерации. «Аддитивные технологии. Оборудование для селективного лазерного сплавления. Общие требования» [текст]// М.: Стандартинформ: Изд-во ФГУП «Стандартинформ». 2020. – 15 с.
51. ГОСТ Р 59037-2020 Национальный стандарт российской федерации. «Аддитивные технологии. Конструирование металлических изделий. Руководящие принципы» [текст]//М.: Стандартинформ: Изд-во ФГУП «Стандартинформ». 2020. – 12 с.
52. ГОСТ Р 59038-2020 Национальный стандарт российской федерации. «Аддитивные технологии. Подтверждение качества и свойств металлических изделий» [текст]//М.: Стандартинформ: Изд-во ФГУП «Стандартинформ». 2020. – 12 с.
53. ГОСТ Р 59036-2020 Национальный стандарт российской федерации. «Аддитивные технологии. Производство на основе селективного лазерного сплавления металлических порошков. Общие положения» [текст]//М.: Стандартинформ: Изд-во ФГУП «Стандартинформ». 2020. – 19 с.
54. ГОСТ Р 59183-2020 Национальный стандарт российской федерации. «Аддитивные технологии. Изделия, полученные методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции, стали марки 08X18H10T. Общие технические требования» [текст]//М.: Стандартинформ: Изд-во ФГУП «Стандартинформ». 2020. – 8 с.
55. ГОСТ Р 59185-2020 Национальный стандарт российской федерации. «Аддитивные технологии. Изделия, полученные методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции титанового сплава марки ВТ-6. Общие технические требования» [текст]//М.: Стандартинформ: Изд-во ФГУП «Стандартинформ». 2020. – 8 с.

56. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров [текст]/ М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. - М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
57. Wohlers Report. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report [текст], 2014. 276 p.
58. Сергеева, О.Ю. Аддитивные технологии и 3D-моделирование [текст] / О.Ю. Сергеева // Нанотехнологии в строительстве. – 2018. – Т. 10. - № 4. – С. 142–158.
59. Гончарова, О.Н. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство / О.Н. Гончарова, Ю.М. Бережной, Е.Н. Бессарабов, Е.А. Кадамов, Т.М. Гайнутдинов, Е.М. Нагопетьян, В.М. Ковина // Инженерный вестник Дона. - 2016. - №4. [Электронный ресурс] ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931.
60. Hopkinson, N. Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age. [текст] / N. Hopkinson, R. Hague, P. Dickens. - John Wiley & Sons, Ltd, 2006. 272 p.
61. Choudhari, C. M. Product development and its comparative analysis by SLA, SLS and FDM rapid prototyping processes [текст] / C. M. Choudhari, V. D. Patil // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. - № 149. С. 1-8.
62. Шишковский, И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения [текст] / И.В. Шишковский.- СПб.: Питер, 2016.- 400 с.
63. Суфияров, В.Ш. Селективное лазерное плавление жаропрочного никелевого сплава / В.Ш. Суфияров, А.А. Попович, Е.В. Борисов И.А. Полозов // Цветные металлы. 2015. № 1. С. 79–84.
64. Marcincinova, L.N. Application of Fused Deposition Modeling Technology in 3D Printing Rapid Prototyping Area [текст]/ L.N. Marcincinova // Manufacturing Technology. – 2012. - Vol. 11. - № 4. – С. 35-37.

65. Nagamatsu, H. Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining[текст]/ H. Nagamatsu, H. Sasahara, Y. Mitsutake, T. Hamamoto // Additive Manufacturing. - 2020. - Vol. 31. - P. 1-11.
66. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в опытном литейном производстве. Часть I. Литье металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм [текст]/ М.А. Зленко, П.М. Забеднов // Metallurgia машиностроения. – 2013. - №2. – С. 45-54.
67. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в опытном литейном производстве. Часть II. Литье металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм [текст]/ М.А. Зленко, П.М. Забеднов // Metallurgia машиностроения. – 2013. - №3. – С. 43-48.
68. Коротченко, А. Ю. Об использовании в литейном производстве аддитивных и гибридных технологий [текст]/ А. Ю. Коротченко, Д. Э. Хилков, М. В. Тверской, А. А. Хилкова // Литейное производство. - 2019. - № 6. - С. 26-28.
69. Vidyarthee, G. New Development in Investment Casting Process -A Review [текст]/ G.Vidyarthee, N Gupta.// International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2017. - Vol. 8. - Issue 12. P. 529-540.
70. Бычковский, Д. Аддитивные технологии и литейное производство [текст]/ Д. Бычковский, А. Неткачев // Умное производство. – 2018. - №3. – С. 40-44.
71. Толочко, Н. К. Применение технологии экструзионной 3D-печати в литейном производстве[текст]/ Н. К.Толочко, А. А. Андрушевич, П. Н. Василевский, П. С. Чугаев // Литье и металлургия. – 2018. - №4. – С.139-144.
72. Питерсков, П. Исследование влияния режимов 3D-печати керамикой и синтеризации на процесс усадки тонкостенных деталей / П. Питерсков, Д. Ережеп, А.А. Грибовский [текст]// Научно-технический

вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Том 20. - №4. – С. 52-57.

73. Никитин, К.В. Аддитивные технологии в литейном производстве. учеб. пособие [текст]// К.В. Никитин. Самара: СамГТУ. – 2022. – 86 с.

74. Никитин, В.И. Наследственность в литых сплавах [текст] / В.И. Никитин. Самара: СамГТУ, 1995. – 248 с.

75. Никитин, В.И. Наследственность в литых сплавах [текст] / В.И. Никитин, К.В. Никитин. Изд.2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение – 1, 2005. – 476 с.

76. Никитин, К.В. Управление качеством литых изделий из алюминиевых сплавов на основе явления структурной наследственности [текст] /К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин. М.: Радуница, 2015. – 228 с.

77. Nappi, C. The Global Aluminium Industry 40 Years from 1972. World Aluminium [Электронный ресурс] //C.Nappi.2013. http://www.worldaluminium.org/media/filer_public/2013/02/25/an_outlook_of_the_global_aluminium_industry-1972_-_present_day.pdf.

78. Dudin, M.N. Modern trends and challenges of development of global aluminum industry [текст] /M.N. Dudin, N.A.Voykova, E.E. Frolova, J.A. Artemieva, E.P.Rusakova, A.H.Abashidze // Metalurgija. – 2017. - vol. 56. - pp. 255–258.

79. Тимошкин, И.Ю. Основные проблемы и направления в производстве качественных алюминиевых сплавов из рециклируемых металлических отходов [текст] / И.Ю.Тимошкин, К.В.Никитин, В.И. Никитин // ЛитейщикРоссии. - 2010. - No. 8. - С. 24-26.

80. Selyanin, I.F. Resource-saving and environment-saving production technologies of secondary aluminum alloys / I.F. Selyanin, V.B. Deev,

A.V. Kukharenko // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. - 2015. - Vol. 56. - No. 3. - P. 272–276.

81. Деев, В. Б. Влияние температур перегрева и заливки расплава на качество отливок из алюминиевых сплавов при литье по газифицируемым моделям [текст] / В. Б. Деев, К. В. Пономарева, О. Г. Приходько, С. В. Сметанюк // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 3. С. 65–71.

82. Nikitin, V. I. Synthesis of aluminum alloys from dispersed waste based on aluminum [текст] / V. I. Nikitin, K. V. Nikitin, I. Yu. Timoshkin, R. M. Biktimirov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2020. - Vol. 61. - No. 6. pp. 632–640.

83. Никитин, К.В. Влияние структуры лигатур $AlFe_5$, полученных из рециклируемых стальных отходов, на свойства алюминиевых сплавов [текст] / К.В. Никитин, В.И. Никитин, В.Б. Деев, И.Ю. Тимошкин // Цветные металлы. – 2020. - № 8. – С. 75-81.

84. Деев, В.Б. Получение герметичных алюминиевых сплавов из вторичных материалов [текст] / В.Б. Деев. - М.: Флинта: Наука, 2006.

85. Эскин, Г.И. Влияние кавитационной обработки расплава на структуру и свойства литых и деформированных легких сплавов [текст] / Г.И. Эскин // Вестн. РАЕН. 2010. No. 3. С. 82–89.

86. Nikitin, K.V. Influence of various treatment types on the structure, density, and electrical conductivity of Al–Mg system wrought alloys [текст] / K.V. Nikitin, V.I. Nikitin, D.S. Krivopalov, V.A. Glushchenkov, D.G. Chernikov // Russ. J. Non-Ferrous Met. - 2017. - Vol. 58. - No. 5. P. 475–480.

87. Баум, Б.А. О связи свойств сталей и сплавов в твердом и жидком состояниях [текст] / Б.А. Баум, Г.В. Тягунов // Изв. АН СССР. Металлы. - 1969. - №1. - С. 229-223.

88. Баум, Б.А. Металлические жидкости – проблемы и гипотезы [текст] / Б.А. Баум. - М.: Наука, - 1979. - 120 с.

89. Баум, Б.А. Жидкая сталь: монография [текст] / Б.А. Баум, Г.А. Хасин, Г.В. Тягунов и др. - М.: Metallurgy, 1984. - 208 с.
90. Гельд, П.В. Связь свойств металлов в жидком и твердом состоянии [текст] / П.В. Гельд, Б.А. Баум, Г.В. Тягунов и др. // Свойства расплавленных металлов. - М.: Наука, 1974. - С. 7-10.
91. Гаврилин, И.В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов [текст] / И.В. Гаврилин. – Владимир: ВлГУ. – 2000. 260 с.
92. Дубровский, С.А. Гипотеза кластерной природы наследственности шихтовых материалов в металлургии черных сплавов [текст] / С.А. Дубровский, А.А. Шипельников, А.Н. Роговский // Вести высших учебных заведений Черногоземья. – 2008. - №1. – С. 89-96.
93. Замятин, В.М. К вопросу о металлургической наследственности и формировании свойств металлопродукции [Электронный ресурс] / В.М. Замятин, Б.А. Баум // Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства. Труды 3-й всеросс. научно-практ. конф. Самара: СамГТУ. 2010. – 1 электрон.опт диск (CD-ROM).
94. Крестьянов, В.И. Основные проблемы получения высококачественных чугунов для машиностроения [текст] / В.И. Крестьянов // Литейное производство. - 1997. - №5. - С.9-11.
95. Крестьянов, В.И. Роль наследственных факторов при получении ЧШГ с высокими свойствам в литом состоянии [текст] / В.И. Крестьянов // Генная инженерия в сплавах: Тез.докл. VI-й Междунар. науч.-практ. конф. - Самара: СамГТУ. - 1998. - С. 47-48.
96. Крестьянов, В.И. Структурная наследственность при получении отливок из ЧШГ [текст] / В.И. Крестьянов // Литейное производство. - 1999. - №1. - С. 18-20.
97. Курганов, В.А. Наследственность и новые технологии получения конструкционных чугунов [текст] / В.А. Курганов // Наследственность в литейных процессах: труды VII-го междунар. науч.-техн. симпозиума. Самара: СамГТУ. – 2008. - С. 64-68.

98. Аникеев, В.В. Изменение наследственных свойств стали при полунепрерывном литье [текст] / В.В. Аникеев // Труды 5-го съезда литейщиков России. М.: Радуница. – 2001. С. 185-186.
99. Аникеев, В.В. Явление структурной наследственности специальных сталей в системе «электрод-слиток-прокат» [текст] / В.В. Аникеев // Генезис, теория и технология литых материалов: матер. 1-й междунар. науч.-техн. конф. Владимир: ВГУ. – 2002. – С. 92-96.
100. Аникеев, В.В. Наследственное влияние шихтовых материалов на структуру и свойства отливок из низколегированной стали [текст] / В.В. Аникеев, В.М. Гришин, О.В. Баракина, Л.Н. Елаева // Литейное производство. – 2002. - №10. – С. 22-23.
101. Шуб, Л.Г. Влияние состава металлошихты на качество стали 25Л [текст] / Л.Г. Шуб, Р.Г. Усманов, В.В. Макаров, О.П. Лялин // Литейное производство. – 2004. - № 6. С. 6-7.
102. Кондратюк, С.Е. Наследственность структуры и свойств стали [текст] / С.Е. Кондратюк // Литейное производство. – 2008. - №9. – С. 6-10.
103. Тихонов, А.К. Направление влияния технологических переделов на прочность стальных изделий [текст] / А.К. Тихонов // Наследственность в литейно-металлургических процессах: материалы 8-й всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Самара: СамГТУ. – 2018. С. 29-36.
104. Климов, В.Г. Восстановление лопаток газотурбинных двигателей за счет применения модифицирования и структурной наследственности присадочных материалов [текст] / В.Г. Климов, В.И. Никитин, С.С. Жаткин, К.В. Никитин, А.В. Когтева // Наследственность в литейно-металлургических процессах: материалы 8-й всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Самара: СамГТУ. – 2018. С. 294-305.

105. Батышев, К.А.. Получение сплава ЦАМ 4-1 из низкосортного вторичного сырья [текст] / К.А. Батышев, С.В. Колосков, Демьянов Е.Д., Семенов К.Г., Юсипов Р.Ф. // Наследственность в литейно-металлургических процессах: материалы 8-й всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Самара: СамГТУ. – 2018. С. 332-338.
106. Семенов, К.Г. Наследственность в металлургических процессах плавки низколегированных сплавов меди и железа [текст] / К.Г. Семенов, К.А. Батышев // Наследственность в литейно-металлургических процессах: материалы 8-й всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Самара: СамГТУ. – 2018. С. 178-183.
107. Мысик, Р.К. Управление процессом структурообразования в слитках из меди и медных сплавов [текст]/ Р.К. Мысик, С.В. Брусницын, А.В. Сулицин // Наследственность в литейно-металлургических процессах: материалы 8-й всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Самара: СамГТУ. – 2018. С. 236-245.
108. 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.
109. Nikitin, K.V. Improving the casting process in ceramic forms using additive technologies in manufacturing model kits[текст] / K.V. Nikitin, V.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. - pp. 675–681.
110. Никитин К.В. Исследование линейной усадки модельных составов и механизмов взаимодействия в системе «выплавляемая 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.
111. Nikitin, K.V. Influence of temperature conditions on the shrinkage of wax patterns for investment casting[текст] / K.V. Nikitin, V.N.

D'yachkov, V.I. Nikitin, A.Yu. Barinov, V.B. Deev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: CAMSTech. – 2020. - Том 919. - Выпуск 225. – 02204.

112. 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.

113. Maharanaa, T. Melt-solid polycondensation of lactic acid and its biodegradability [текст] / T. Maharanaa, B. Mohanty, Y.S. Negi. Progress in Polymer Science, 2009. - № 34. pp. 99—124.

114. Янчевский, Л.К. Определение комплекса релаксационных характеристик процесса стеклования полимеров по данным калориметрических исследований [текст] / Л.К. Янчевский, В.В. Левандовский // Высокомолекулярные соединения, 1991. – Т. 33. - №5. – С. 323-325.

115. Гиршфельдер, Дж. Молекулярная теория газов и жидкостей [текст] / Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд. – М.: Изд-во Ин.лит., 1961. – 929 с.

116. 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.

117. 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.

118. 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.

119. 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.
120. 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.
121. Баринов, А.Ю. Получение металлических отливок литьем по выплавляемым моделям с применением реверс-инжиниринга и аддитивных технологий [Текст] / А.Ю. Баринов, Тукабайов Б. Н., Демин А. А. // 2 Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых, Том 5. Юго-Зап.гос. ун-т, Курск: ЗАО Университетская книга, 2017, 341- 343 с.
122. 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 Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Наследственность в литейно-металлургических процессах", 8-11 октября 2018 г., г. Самара 550-561с.
123. 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 Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Наследственность в литейно-металлургических процессах", 8-11 октября 2018 г., г. Самара 561-567с.

124. 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. – 210 с. – С. 3–7.
125. 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. – 210 с. – С. 49–55.
126. 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.



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

УТВЕРЖДАЮ:
Первый проректор-проректор по НР

Ненашев М.В.

2021 г.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ТИ-ДВТ-7

Получение воско-полимерных моделей средствами аддитивного производства по
FDM-технологии

Разработали

Директор ЦЛТ, д.т.н.,
профессор

Декан, д.т.н., профессор

Ведущий инженер
кафедры
«Литейные и
высокоэффективные
технологии»

Никитин В.И.

Никитин К.В.

Баринов А.Ю.

Самара, СамГТУ 2021

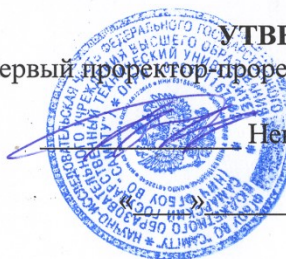


МИНОБНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

УТВЕРЖДАЮ:
Первый проректор-проректор по НР

Ненашев М.В.

2021 г.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ТИ-ЛВТ-8
Подготовка огнеупорных керамических форм к литью при использовании
воско-полимерных моделей

Разработали

Директор ЦЛТ, д.т.н.,
профессор

Декан, д.т.н., профессор

Ведущий инженер
кафедры
«Литейные и
высокоэффективные
технологии»

Никитин В.И.

Никитин К.В.

Баринов А.Ю.

Самара, СамГТУ 2021

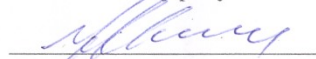
Частное Учреждение Культуры «Музей внедорожных машин»

446394, Самарская область, Красноярский район, п.г.т. Болжеский,
Сосновый бор Жилмассив, участок 35, ОГРН 1156313003373

06 апреля 2021г

Утверждаю: Директор ЧАСТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ КУЛЬТУРЫ
«МУЗЕЙ ВНЕДОРОЖНЫХ МАШИН»

Хрипунов Н.В.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

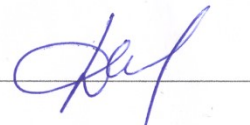
В производство деталей «Крышка» из алюминиевого сплава АК7ч (ГОСТ 1583-93) изготовленных литьем по выплавляемым моделям с использованием воско-полимерных моделей, полученных средствами аддитивного производства.

Комиссия, в составе нижеподписавшихся представителей от ЧУК «МУЗЕЙ ВНЕДОРОЖНЫХ МАШИН» и ФГБОУ ВО «СамГТУ» на основании положительных результатов испытаний деталей «Крышка» решила: Произвести внедрение в производство 4шт. вышеназванных деталей, изготовленных в центре литейных технологий ФГБОУ ВО «СамГТУ».

Председатель Комиссии:

Директор ЧУК «МУЗЕЙ ВНЕДОРОЖНЫХ МАШИН» Хрипунов Н.В. 

Члены комиссии:

Зам. директора ЦЛТ ФГБОУ ВО «СамГТУ» Дьячков В.Н. 

Гл. инженер ЧУК «МУЗЕЙ ВНЕДОРОЖНЫХ МАШИН» Марюшкин Д.Е. 

Нач. производства ЧУК «МУЗЕЙ ВНЕДОРОЖНЫХ МАШИН» Иванов П.Е. 





МЕТАЛЛИСТ
С А М А Р А

Акционерное общество «Металлист-Самара»
443023, Россия, г. Самара, ул. Промышленности, 278
ОГРН 1026301520035 ИНН 6318105574 КПП 631801001
тел.: (846) 246 90 05, факс: (846) 246 96 00

исх №

А К Т

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Барина Антона Юрьевича

Комиссия в составе: председатель: главный металлург Голубовский Е.Н., члены комиссии: зам.главного металлурга Каторгин В.А., инж-технолог Татаринцев М.С. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы

“Разработка комплекса технологических решений для аддитивного производства воско-полимерных моделей с целью повышения качества фасонных отливок при литье в керамические формы” использованы в стандартном технологическом процессе предприятия для изготовления отливок “Корпус диффузора” и “Корпус камеры сгорания” вспомогательной силовой установки ГТУ способом литья по выплавляемым моделям.

На основании оценки сделано следующее заключение:

Внедрение разработанного комплекса технологических решений в литейном производстве АО «Металлист-Самара» способствовало повышению эффективности производства крупногабаритных отливок ответственного назначения, таких как «Корпус камеры сгорания» и «Корпус диффузора» из стали марки ВНЛ-3 по следующим показателям: значительное сокращение времени и стоимости подготовки производства за счет отсутствия необходимости изготовления сложной и дорогостоящей модельной оснастки с последующей возможной ее доработкой.

Модели полностью соответствовали геометрическим параметрам цифровых моделей. Проведён визуальный контроль данных моделей. Поверхность моделей гладкая, отсутствовали несплавления материала и поры, поверхность ровная, без переходов и волн, что положительно сказывается на шероховатости и удовлетворяла по качеству.

При нанесении керамического (огнеупорного) покрытия на основе плавного кварца, данные модели показали положительные результаты, суспензия стекала равномерно, хорошо смачивая все поверхности, что очень важно для точного литья. После сушки первого слоя не произошло отслоения покрытия, отсутствовали дефекты, такие как растрескивание и вздутия, что свидетельствует о достаточной прочности сцепления с моделями и возможности получения заданных параметров шероховатости поверхности отливки и геометрических размеров.

Была проведена операция удаления модельной массы с последующим выжигом модельной и полимерной масс в электрической камерной печи.

После выжига керамических форм было отмечено полное удаление модели из внутренней полости формы без трещин и разрушения, с отсутствием зольности материала и разрушения керамической формы.

В соответствии с вышеизложенным можно отметить, что данная технология изготовления моделей соответствует ТТ КД и может быть использована для получения литых заготовок на предприятиях.

Председатель комиссии:



Голубовский Е.Н.

Члены комиссии:

Каторгин В.А.

Татаринцев М.С.

6204