

На правах рукописи



**Дворянкин Александр Олегович**

**Совершенствование технологии изготовления  
оснастки для изделий машиностроения за счет  
применения 3D-печати**

Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» на кафедре «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин»

**Научный  
руководитель:**

**Баурова Наталья Ивановна**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

**Официальные  
оппоненты:**

**Северюгина Надежда Савельевна**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технический сервис машин и оборудования» ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева)»

**Бекренев Николай Валерьевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техническая механика и мехатроника» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

**Ведущая  
организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН).

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: 8-499-263-66-33 доб. 36-28.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.331.02  
кандидат технических наук, доцент



А.В. Богданов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования** обусловлена появлением инновационных технологий изготовления и повышения сроков эксплуатации технологической оснастки при производстве изделий машиностроения или внесением изменений в уже существующие технологические процессы.

К инновационным следует отнести аддитивные технологии (3D печать) на сегодняшний день широко инкорпорируемые в различные отрасли производства, такие как: машиностроение, автомобилестроение, авиастроение, медицина, производство бытовых товаров. Преимуществами аддитивных технологий по сравнению с традиционными являются: сокращение себестоимости, трудоёмкости, сроков проектирования и изготовления деталей.

В качестве сырья для производства, аддитивные технологии используют полимерные композиционные материалы (ПКМ), такие как ABS или PLA-пластики, фотополимерные смолы, песок и др. В зависимости от используемого материала режимы печати изготовления 3D моделей могут меняться.

Характеристики моделей из ПКМ зависят от выбранных технологических режимов печати. При этом режимы печати должны быть функционально взаимосвязаны с режимами производства детали на всех этапах технологического процесса. Одним из направлений производства, где применение 3D печати является наиболее актуальным, является машиностроение, так как проблема быстрого изготовления, а также увеличение срока эксплуатации деталей машин при создании новой продукции, в опытном производстве становится ключевой. В промышленном производстве преимущественно используются традиционные методы изготовления технологической оснастки (вручную или с использованием механообрабатывающего оборудования). Это связано с тем, что на этапе проектирования, когда итоговый результат не известен, конструкция изделия ещё не отработана и не утверждена, для изготовления образцов нецелесообразно создавать технологическую оснастку под серийное производство. Следовательно, такая оснастка является разовой, и в дальнейшей работе над изделием не используется. Поэтому каждое изменение конструкции требует новой технологической оснастки. Правка старой конструкции является весьма трудоёмким процессом и не всегда возможна. В связи с этим традиционные методы являются дорогостоящими из-за высокой материалоемкости и трудоёмкости.

Таким образом, диссертационная работа, направленная на разработку и совершенствование технологических процессов изготовления оснастки изделий машиностроения с использованием методов 3D печати, позволяющих сократить материалоемкость, трудоёмкость, время проектирования и изготовления, а также увеличить сроки эксплуатации, является актуальной для производителей и потребителей техники.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами применения аддитивных технологий при изготовлении и ремонте деталей машин различного назначения, а также в других отраслях промышленности занимались Беломестнов А.В., Зленко М.А., Зорин В.А., Нефёлов И.С., Карташова В.В., Перевертов В.П., Маренков И.Г., Севрюгина Н.С. и другие ученые. Вопросами применения полимерных композиционных материалов при изготовлении и ре-

монте машин занимались Баурова Н.И., Башкирцев В.И., Бекренев Н.В., Галиновский А.Л., Гладких С.Н., Гуцин И.А., Зорин В.А., Кононенко А.С., Косенко Е.А., Кравченко И.Н., Лапина Н.В. и другие ученые. Методам совершенствования технологий изготовления машиностроительной оснастки и деталей различных типов машин посвящены труды Андерсона В.А., Воронцова Б.С., Григорьева Е.И., Григорьянца А.Г., Нестерова Н.В. и других ученых.

**Объектом исследования** являются детали машин, изготовленные с использованием технологической оснастки, выполненной с применением 3D печати.

**Предметом исследования** является способ и технология производства деталей машин, с использованием технологической оснастки, изготовленной методами 3D-печати.

**Целью работы** является снижение себестоимости производства деталей машин и повышение их качества за счет использования 3D печати при изготовлении технологической оснастки.

**Задачи исследования:**

1. Исследовать влияние технологических факторов на физико-механические свойства мастер-моделей деталей машин, изготовленных методами 3D печати.

2. Разработать теоретические основы расчета технологических режимов изготовления силиконовых форм на основании 3D мастер-моделей деталей машин.

3. Разработать технологию, увеличивающую сроки эксплуатации технологической оснастки и деталей машин за счет применения методов 3D печати.

4. Провести оценку технико-экономической эффективности разработанной технологии производства технологической оснастки.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. На основании полученных в ходе выполнения работы результатов теоретически и экспериментально доказана целесообразность применения способа изготовления технологической оснастки изделий машиностроения методом 3D печати с применением слоистых полимерных материалов.

2. Разработан и апробирован алгоритм проектирования оснастки для изготовления мастер-моделей по технологии послойного наплавления с учетом деформационно-прочностных свойств используемых полимерных материалов, позволяющий снизить себестоимость изготовления изделий машиностроения.

3. Теоретически и экспериментально установлена причинно-следственная связь между кинетикой процесса послойного наплавления, геометрическими особенностями формуемых деталей и технологическими режимами 3D печати, что позволит расширить номенклатуру применяемых полимерно композиционных материалов при создании технологической оснастки.

4. Представлена и научно обоснована методика оптимизации технологических режимов 3D-печати с учетом кинетики процессов растекания и отверждения полимерных материалов, что позволило исключить возникновение технологических дефектов (усадки, коробления и др.) оснастки.

**Теоретическая и практическая значимость:**

1. Разработаны рекомендации по совершенствованию технологии 3D печати, обеспечивающие повышение качества и увеличение сроков эксплуатации изделий машиностроения

2. Разработано информационное обеспечение, включающее разработку базы данных по материалам и оборудованию с учетом возможностей их редактирования и пополнения.

3. Разработана программа по расчету технологических режимов изготовления силиконовых форм с учетом индивидуальных параметров применяемых полимерных материалов, типа оборудования и особенностей конструкции 3D мастер-модели на основании которой изготавливается силиконовая форма.

4. Получены результаты экспериментальных исследований по установлению причинно-следственных связей между свойствами мастер-моделей и, созданных на их основе, деталей машин и технологическими режимами 3D печати с использованием технологии послойного наплавления.

**Методы исследования:** для решения поставленных задач использовалась оценка качества предлагаемых новых технических решений, включающая в себя экспериментальные методы определения зависимости качества поверхностей и прочностных характеристик, изготовленных методами 3D печати, мастер-моделей деталей, используемых при изготовлении деталей и узлов машин, от режимов 3D печати. Теоретические и экспериментальные исследования были проведены автором в МАДИ на кафедре «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» в период с 2020 по 2024 гг.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Область исследования соответствует пунктам паспорта специальности 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки), в частности, паспорту специальности по пункту 2 – Технологические процессы, операции, установки, позиции, технологические переходы и рабочие ходы, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости и пункту 5 – Методы проектирования и оптимизации технологических процессов.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Результаты оценки технологических, деформационно-прочностных и эксплуатационных свойств полимерных материалов, используемых при технологии 3D печати, мастер-моделей деталей машин.

2. Алгоритм и программа, позволяющие в автоматизированном режиме определять технологические режимы 3D печати.

3. Технология производства оснастки деталей машин методом 3D печати, с использованием технологии послойного наплавления, которая позволяет сократить себестоимость и трудоемкость изготовления, а также повысить качество и увеличить сроки эксплуатации деталей машин.

4. Техничко-экономическое обоснование эффективности предлагаемой технологии изготовления технологической оснастки с использованием методов 3D печати.

**Достоверность и обоснованность научных положений и выводов,** контроль достоверности полученных результатов осуществляется сопоставлением теоретических положений с экспериментальными данными, полученными при проведении лабораторных испытаний большого количества серий опытных образцов. Предлагаемые методы и подходы базируются на основных положениях теории надежности машин, методах планирования эксперимента и на экспериментальных исследованиях деформационно-прочностных свойств.

И оценке влияния внешних факторов на свойства образцов, изготовленных с применением 3D печати.

**Апробация результатов работы.** Результаты работы использованы в материалах НИР, выполняемой по заказу Минобрнауки РФ №FSFM-2020-0011 (за 2020-2023 гг.) и №FSFM-2024-0001 (за 2024 год).

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: Научно-методических и научно-исследовательских конференциях МАДИ (Москва, 2018-2025), XXI Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2018» (Москва, 2018), XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» (Москва, 2019), XXIV Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (Москва, 2020), Международном научно-техническом семинаре «Современные материалы и технологии в машиностроении» (Москва, 2020), Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2020» (Самара, 2020), Международной конференции «Наука и техника в дорожной отрасли» с участием молодых ученых (Москва, 2021), XXV Международной научной конференции «Наука России: цели и задачи» (Екатеринбург, 2021), Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2021» (Москва, 2021), III Международном форуме «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии» (Москва, 2021), 26 Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы» (Москва, 2022); XVIII Международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения» (Эльбрус, 2022), V Международном форуме «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии» (Москва, 2022), Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2022» (Ярославль, 2022), 27 Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 95-летию подготовки инженеров-механиков МИСИ-МГСУ «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы» (Москва, 2023), Международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте» – ИИТТ'2024 (Липецк, 2024), Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2024» (Самара, 2024 г).

**Реализация результатов исследования.** Разработанная технология апробирована и внедрена в ГБУ города Москвы «Корпорация развития Зеленограда», а также в учебный процесс Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ).

**Публикации.** По результатам выполненной работы опубликовано 17 научных работ, в том числе 5 публикаций в изданиях, включенных в систему Scopus и Web of Science, 5 публикаций в рецензируемых научных изданиях из

перечня ВАК Минобрнауки. По результатам работы получено свидетельство о государственной регистрации базы данных. Общий объем публикаций составляет 5,81 п.л / 4,11 п.л.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 159 страниц машинописного текста, в том числе 146 страниц основного текста, 63 рисунка, 24 таблицы и 4 приложения на 13 страницах. Диссертация содержит библиографию из 180 наименований из них 17 на иностранном языке.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность дана общая характеристика проблемы. Показаны научная новизна, практическая значимость результатов исследований и сформулированы основные положения диссертации, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится обзор литературы по теме исследования. Проводится анализ работ в области производства технологической оснастки и деталей машин. Рассмотрены традиционные технологии, применяемые при изготовлении деталей машин, их особенности, а также возможность совместного использования с технологической оснасткой, изготовленной по технологиям 3D печати.

Проанализированы пути повышения точности деталей машин. Приведен анализ технологий, применяемых при изготовлении деталей машин и технологической оснастки, их особенности, преимущества и недостатки. Проведен анализ особенностей технологий 3D печати применяемых в производстве, а также факторов, влияющих на физико-механические свойства 3D моделей из полимерных материалов. Изучены основные свойства материалов, применяемых при изготовлении силиконовых форм, для изготовления деталей машин. Показано, что в настоящее время известно довольно большое число научных трудов, касающихся теоретических и экспериментальных исследований в области производства деталей различных машин традиционными технологиями, а также отсутствие научных трудов в области применения методов 3D печати при изготовлении оснастки для деталей машин. В результате проведенного в работе анализа, намечены направления расчетно-теоретических и экспериментальных исследований, сформулирована цель и задачи исследования.

**Во второй главе** проводится математическое описание параметров, влияющих на технологические режимы изготовления силиконовых форм, используемых при производстве изделий машиностроения.

Для оптимизации процесса изготовления силиконовых форм, необходимо учитывать временные показатели, к которым относится время полного заполнения силиконовым компаундом всех полостей литейной формы, а также время отверждения материала. Данные показатели зависят от следующих параметров: вязкость материала, время полимеризации силиконового компаунда, плотность материала, основа отвердителя, время жизнеспособности

силиконового компаунда, твердость по Шору. Для определения времени, необходимого для изготовления силиконовой формы, на основании индивидуальных характеристики мастер-модели были разработаны алгоритмы программы, которые помимо указанных параметров также учитывают объем компаунда необходимый для заполнения резервуара с помещённой внутрь мастер-моделью, объем резервуара без мастер-модели, объем мастер-модели, объем и массу компаунда, характеристики машин для дозировки компаунда (к которым относится объем бака, предельное давление на концах труб, диаметр и длина труб, а также вязкость материала).

На основании данных характеристик по закону Хагена-Пуайзеля (1) алгоритмы программы рассчитывают скорость вытекания компаунда с определенной вязкостью при индивидуальных параметрах оборудования.

$$Q = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \eta \cdot L} \quad (1)$$

где  $r$  и  $L$  – радиус и длина труб машины дозирования соответственно,  $\Delta P$  – предельное давление на концах труб,  $\eta$  – вязкость материала.

Программа расчёта технологических режимов (времени и объема необходимого для изготовления силиконовой формы) позволяет осуществлять управление базами данных с возможностью добавления, поиска и корректировки параметров применяемых композитных материалов; мастер-моделей изделий машиностроения, использующихся в качестве основы для создания силиконовых форм; расчет оптимальных параметров заливки для точной передачи габаритных размеров исходных моделей при создании формы, а также формирование и просмотр отчетов с результатами проведенных расчётов.

Для отображения вышеперечисленных функций программа разделена на несколько модулей: модуль базы данных, модуль выполнения расчетов, модуль создания отчетов (Рисунок 1).

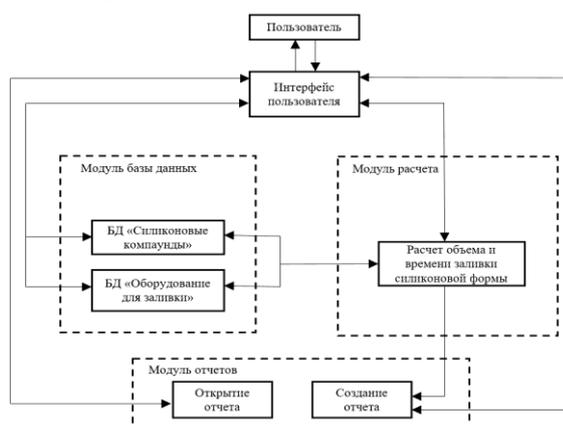


Рисунок 1 – Структура модулей программы и связей между ними

Перед запуском программы, осуществляется ввод исходных данных. Процедура начинается с выбора характеристик силиконового компаунда, характеристик мастер-модели, характеристик резервуара куда будет помещена деталь, а также параметров используемого оборудования. В случае отсутствия применяемого компаунда, характеристик оборудования в базе данных программы, предусмотрен ввод основных характеристик в программу. Блок схема процедуры работы программы представлена на Рисунке 2

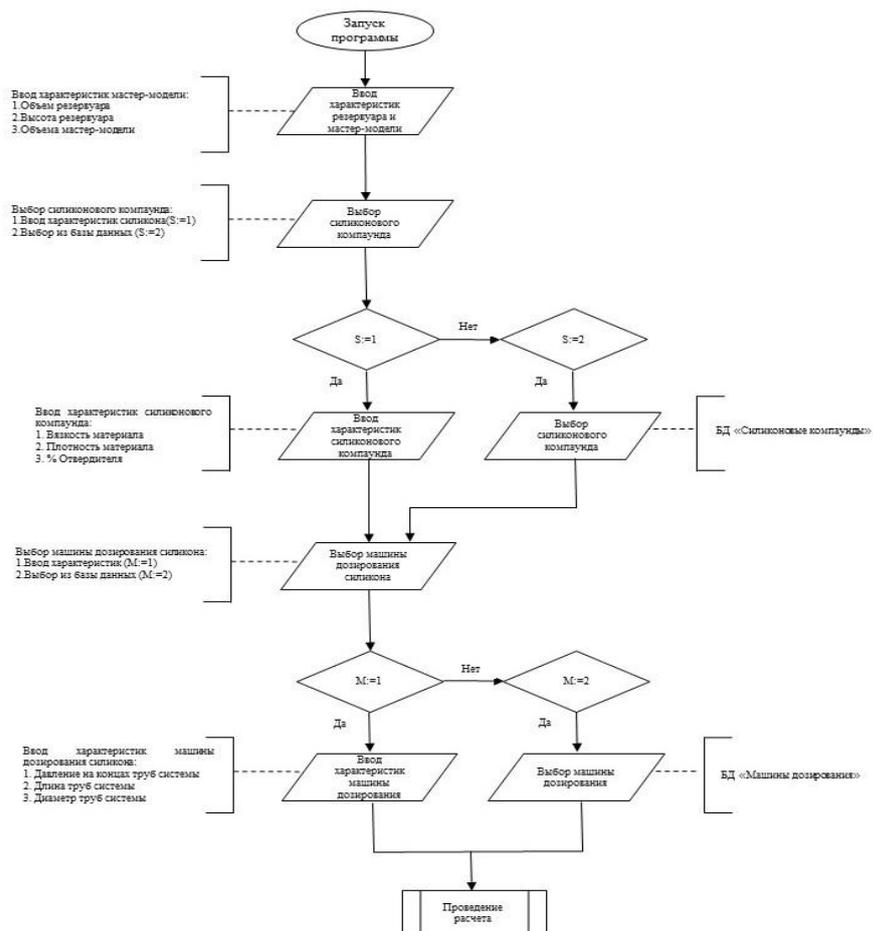


Рисунок 2 – Блок-схема работы программы

Ключевым моментом проверки исходных данных является сравнение полученной в ходе расчёта временной характеристики с временем жизнеспособности силиконового компаунда. В случае, если время заливки силиконовой формы превышает данный показатель, необходимо вновь повторить выбор оборудования или выбрать материал с более длительным временем жизнеспособности. Это обусловлено тем фактом, что если время жизнеспособности силикона закончится в процессе литья, то форма не успеет застыть и не сможет удержать нужное количество материала. В результате, форма будет испорчена, а процесс литья придется начинать заново с новыми материалами.

После завершения расчёта, программа выводит все рассчитанные параметры, и пользователь может выбрать наиболее подходящую комбинацию, учитывая различные факторы. Разработанная программа позволяет быстро и точно определить оптимальные параметры изготовления силиконовых форм на основании индивидуальных характеристик мастер-моделей.

Также разработана математическая модель выбора оптимальной стратегии снижения трудоёмкости этапа создания силиконовой формы.

Для достижения цели снижения трудоёмкости этапа создания силиконовой формы осуществлен выбор оптимальных управлений  $X_1, X_2, \dots, X_n$  из областей  $Y_{X1}, Y_{X2}, \dots, Y_{Xn}$  допустимых значений, которые обращали бы в минимум критерий оптимальности  $K$ , при заданных значениях контролируемых детерминированных факторов  $P_{f1}, \dots, P_{fn}$  (прочность силиконовой формы на разрыв), с учетом определенных параметров при изготовлении

$(V_{\text{мод}1} \dots, V_{\text{мод}M}); (V_{\text{рез}1} \dots, V_{\text{рез}U}); (C_{\text{компл}1} \dots, C_{\text{компл}P}), (M_{\text{доз}1} \dots, M_{\text{доз}S})$ , объем мастер-модели, объем резервуара для мастер-модели, индивидуальные характеристики силиконового компаунда и машины для дозирования силикона.

В качестве критерия эффективности при оптимизации принят показатель трудоёмкости – вероятность снижения затрачиваемого времени и материала на изготовление. В данном случае этим показателем является снижение трудоёмкости изготовления силиконовой формы  $P(H_T)$  (низкая трудоёмкость). Стратегии изготовления силиконовой формы с требуемой прочностью для снижения трудоёмкости в виде матрицы представлена в Таблице 1.

Таблица 1 – Матрица принятия оптимальной стратегии

Исход Стратегия	$S_1$	$S_2$	...	$S_i$	...	$S_r$	Математическое ожидание показателя эффективности
$X_1$	$P_{11}$	$P_{12}$	...	$P_{1i}$	...	$P_{1r}$	$F_1 = M[P(H_T)_{1i}] = \sum_{i=1}^r P(H_T)_{1i} P_{1i}$
$X_2$	$P_{21}$	$P_{22}$	...	$P_{2i}$	...	$P_{2r}$	$F_2 = M[P(H_T)_{2i}] = \sum_{i=1}^r P(H_T)_{2i} P_{2i}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$X_k$	$P_{k1}$	$P_{k2}$	...	$P_{ki}$	...	$P_{kr}$	$F_3 = M[P(H_T)_{ki}] = \sum_{i=1}^r P(H_T)_{ki} P_{ki}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$X_m$	$P_{m1}$	$P_{m2}$	...	$P_{mi}$	...	$P_{mr}$	$F_m = M[P(H_T)_{mi}] = \sum_{i=1}^r P(H_T)_{mi} P_{mi}$

Для каждой  $n$ -й стратегии  $X_n$  определяется математическое ожидание показателя трудоёмкости (2).

$$F_k = M[P(H_T)_{ki}] = F(X_n) = \sum_{i=1}^r P(H_T)_{ki} P_{ki}, n \in \overline{1, m} \quad (2)$$

В качестве наилучшей стратегии  $\bar{X}$  необходимо выбрать такую стратегию из  $m$  возможных стратегий  $X_1, X_2, \dots, X_n$  для которой значение в столбце  $F$  – математическое ожидание показателя эффективности максимально удовлетворяет условию:

$$\bar{F} = F[\bar{X}] = \max_{1 \leq n \leq m} [F(X_n)] = \min_{1 \leq n \leq m} \sum_{i=1}^r P(H_T)_{ki} P_{ki} \quad (3)$$

Использование разработанных алгоритмов и математических моделей, позволит оптимизировать и снизить трудоёмкость технологических процессов изготовления оснастки с применением 3D печати.

**Третья глава** посвящена экспериментальным исследованиям влияния технологических режимов 3D печати на эксплуатационные свойства технологической оснастки.

Первоначально, по результатам испытаний образцов методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК), определялись данные по температурным переходам филамента и осуществлялся выбор материала для 3D печати мастер-моделей. В процессе измерения происходило сравнение теплового потока эталона и исследуемого материала. Измеряемыми величинами являлись абсолютная температура образца и разница температур, возникающая между образцом и эталоном, которая пропорциональна разности теплового потока между ними. На основе ДСК-анализа выбран материал 3D Printer Filament ABS (Black) Strong.

Для определения наиболее оптимального сочетания факторов, влияющих на физико-механические свойства, мастер-модели, проводились испытания на

сжатие на основании ГОСТ 4651-2014. Для подготовки задания на печать использовалась программа Repetier Host совместно со слайсером Cura.

Было изготовлено 3 группы образцов, с различными значениями толщины слоя печати (1 группа) процента заполнения (2 группа) и скорости печати (3 группа). Параметры 3D печати образцов приведены в Таблице 2.

По результатам испытания было установлено, что прочность напрямую зависит от двух параметров: толщина слоя печати и процент заполнения. Определено, что в случае увеличения толщины слоя печати с 0,06 мм до 0,2 мм прочность существенно снижается с 70 МПа до 61 МПа, также с увеличением процента заполнения с 40% до 100% прочность существенно увеличивается с 33 МПа до 70 МПа, но при этом увеличивается время печати. Параметр скорости печати не влияет на прочностные свойства мастер-модели.

Таблица 2 – Режимы 3D печати образцов для прочностных испытаний

№ группы	Толщина слоя, мм	Процент заполнения, %	Скорость печати, мм/с	Коэффициент подачи	Время печати, мин
1	0,06	100	45	1,05	75
	0,12				38
	0,2				22
2	0,06	80	15		68
		60			60
		40			54
3	0,06	100	30		210
			60		108
			60		58

Для определения влияния технологических режимов 3D печати на влагостойкость и антиадгезионные свойства поверхностей мастер-моделей на основании ранее проведенных исследований на 3D принтере Magnum Creative 2 Pro из ABS-пластика марки 3D Printer Filament ABS (Black) Strong были напечатаны образцы с габаритными размерами 30x30x10 при различных режимах печати (Таблица 2).

Параметр толщины слоя, являлся фиксированным, так как на основе ранее проведенных исследований было выявлено, что его увеличению выше указанного значения приведет к ухудшению качества изготавливаемой модели. При чрезмерном увеличении толщины слоя ухудшается сплавление слоев и точность проработки модели, при уменьшении толщины слоя качество увеличивается, но при этом возрастает время печати. Таким образом выбор режимов печати был обусловлен влиянием одного из двух параметров 3D печати, а также с целью охватить все возможные варианты режимов печати.

Перед началом испытаний было проведено контрольное взвешивание напечатанных образцов, которые затем были погружены в емкость с водой на 90 суток. По окончании выдержки было произведено взвешивание образцов для определения изменения массы. Результаты изменения массы образцов представлены в Таблице 4. Структура образцов из ABS пластика до и после испытаний представлена на Рисунках 3-9 (нумерация серий образцов в соответствии с Таблицей 3).

По результатам проведенного исследования определено, что наиболее важным параметром, который нужно учитывать для получения мастер-моделей с наилучшими антиадгезионными свойствами поверхности и влагостойкостью, является процент заполнения и скорость печати.

Таблица 3 – Режимы 3D печати образцов для испытаний на влагостойкость и антиадгезионные свойства поверхности

№ серии образцов	Толщина слоя, мм	Процент заполнения, %	Скорость печати, мм/с	Коэффициент подачи
1	0,06	100	45	1,05
2		80		
3		60		
4		40		
5		100	15	
6			30	
7			60	

Таблица 4 – Изменения массы образцов до и после испытаний

№ серии образцов	Масса образца, гр			
	до испытания	после антиадгезионных испытаний	после выдержки 90 дней в воде	$\Delta m$ , %
1	9,03	9,03	9,1	0,78
2	7,56	7,56	7,59	0,4
3	5,90	5,98	6,11	2,11
4	4,44	4,56	4,59	0,66
5	8,89	8,89	8,98	1,01
6	9,03	9,03	9,13	1,11
7	9,13	9,13	9,33	2,19

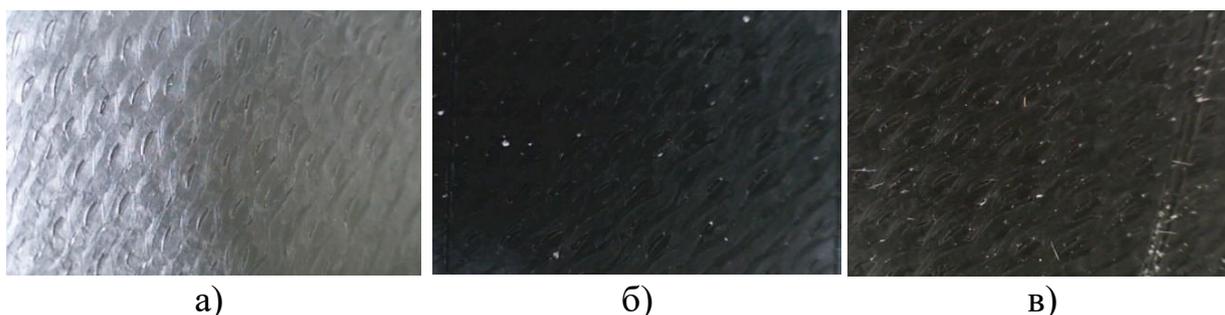


Рисунок 3 – Фото поверхности образца серии № 1 до испытаний (а), после антиадгезионных испытаний (б) и после испытаний на влагостойкость (в)

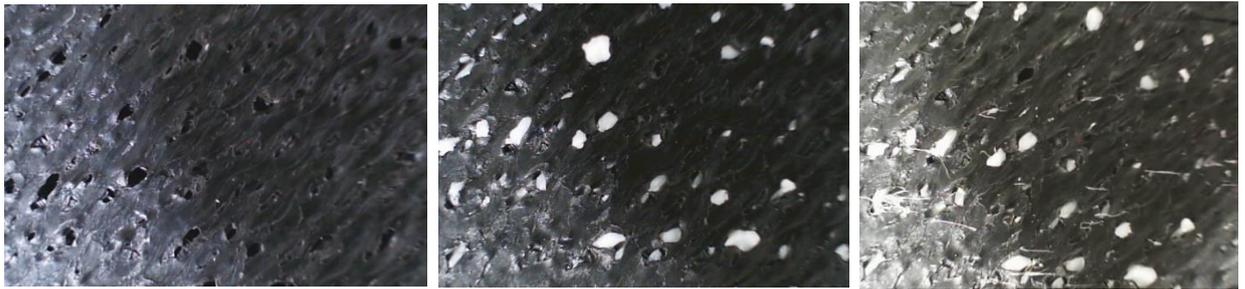


а)

б)

в)

Рисунок 4 – Фото поверхности образца серии № 2 до испытаний (а), после антиадгезионных испытаний (б) и после испытаний на влагостойкость (в)



а)

б)

в)

Рисунок 5 – Фото поверхности образца серии № 3 до испытаний (а), после антиадгезионных испытаний (б) и после испытаний на влагостойкость (в)



а)

б)

в)

Рисунок 6 – Фото поверхности образца серии № 4 до испытаний (а), после антиадгезионных испытаний (б) и после испытаний на влагостойкость (в)



а)

б)

в)

Рисунок 7 – Фото поверхности образца серии № 5 до испытаний (а), после антиадгезионных испытаний (б) и после испытаний на влагостойкость (в)

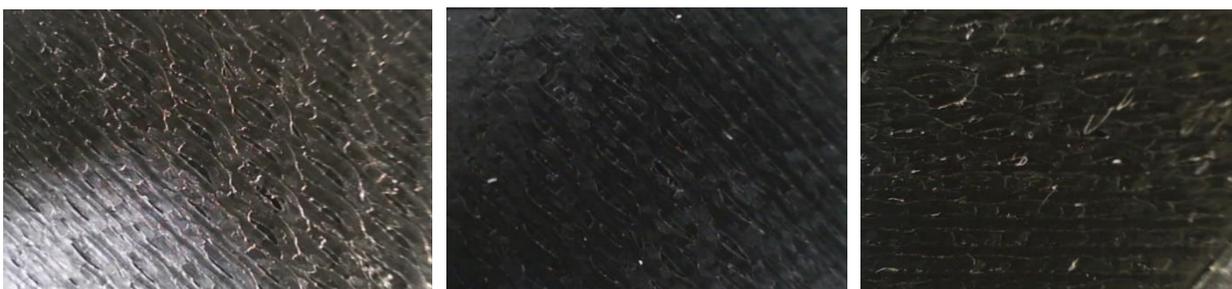


а)

б)

в)

Рисунок 8 – Фото поверхности образца серии № 6 до испытаний (а), после антиадгезионных испытаний (б) и после испытаний на влагостойкость (в)



а)

б)

в)

Рисунок 9 – Фото поверхности образца серии № 7 до испытаний (а), после антиадгезионных испытаний (б) и после испытаний на влагостойкость (в)

Образцы, при изготовлении которых процент заполнения варьировался от 60 % до 40 %, а скорость печати превышала 45 мм/с обладали высокой пористостью. Это впоследствии привело к плохим антиадгезионным свойствам образцов и к увеличению размеров и массы за счет скапливания в порах силикона и невозможности его последующего механического удаления. Также у данных образцов наблюдалась низкая влагостойкость. Таким образом, установлено что для обеспечения наилучшей влагостойкости и антиадгезионных свойств поверхности, необходимо выбирать режимы, в которых параметр процента заполнения будет от 80 до 100 % при скорости печати 45 мм/с.

Для эффективного применения 3D печати совместно с силиконовыми формами необходимо, помимо влагостойкости материала и антиадгезионных свойств поверхности, учесть показатель ударной вязкости, который в свою очередь определяет сопротивление материала к разрушению и деформации при динамических нагрузках.

Для определения зависимости показателя ударной вязкости 3D мастер-моделей, на основании результатов ранее проведенных исследований, из выбранного ABS пластика было создано 7 серий образцов с габаритными размерами 50x15x10 мм, в каждой серии варьировался процент заполнения и скорость печати (Таблица 5).

Испытания проводились на маятниковом копре Testsystems ТСКМ-300 в соответствии с требованиями ГОСТ 4647-2015. Образцы устанавливались на маятниковый копер таким образом, чтобы удар приходился параллельно слоям.

Условия, в которых могут быть использованы напечатанные модели, не ограничиваются комнатными температурами, в том числе возможно их хранение в условиях отрицательных температур. Поэтому далее были проведены экспериментальные исследования по определению ударной вязкости при отрицательных температурах. Для проведения экспериментальных исследований были повторно изготовлены серии образцов № 1-4 (в соответствии с Таблицей 5) с наилучшими показателями ударной вязкости. Изготовленные серии образцов были помещены в морозильную камеру PozisFH-258-1 и выдерживались в течение 30 суток при температуре  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Далее образцы, сразу же после извлечения, были направлены на маятниковый копер Testsystems ТСКМ-300 для проведения эксперимента. Режимы печати образцов и полученные результаты представлены в Таблице 5.

Таблица 5 – Результаты испытаний по определению ударной вязкости

№ серии образцов	Режимы печати: процент заполнения / скорость печати	Работа, Дж	Угол удара $^{\circ}$	Энергия, Дж	Средние значения ударной вязкости Дж/см <sup>2</sup> , после выдержки при температуре	
					+20 $^{\circ}\text{C}$	+20 $^{\circ}\text{C}$
1	100/45	3,13	145,80	150	2,09	1,92
2	80/45	4,39	144,26	150	2,93	5,13
3	60/45	6,61	141,66	150	4,40	4,24
4	40/45	5,02	143,49	150	3,35	3,45
5	100/15	2,93	146,06	150	1,95	-
6	100/30	2,63	146,44	150	1,76	-
7	100/60	2,67	146,39	150	1,78	-

По результатам исследований по определению вязкоупругих свойств мастер-модели при температурных показателях ( $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), установлено, что параметр процента заполнения существенно влияет на показатель ударной вязкости образцов. Таким образом, при формировании режимов печати особое внимание необходимо обращать на значение данного параметра для достижения у моделей наилучших показателей ударной вязкости.

Результаты экспериментов можно использовать для определения оптимальных параметров процесса 3D печати для обеспечения требуемых прочностных характеристик компонентов. Применение корректно выбранных режимов печати дает возможность создания минимально деформируемых элементов, которые будут использованы для создания силиконовых форм при изготовлении изделий различных форм и размеров.

**Четвертая глава** посвящена вопросам разработки технологии производства оснастки для деталей машин с применением методов 3D печати.

На основании данных, полученных в предыдущих разделах работы, показано, что применение технологии FDM 3D печати, при создании силиконовых форм, позволяет расширить номенклатуру производимой продукции при этом исключив индивидуальный подход.

Блок-схема предлагаемой технологии производства изделий машиностроения с применением технологической оснастки изготовленной за счет использования метода FDM 3D печати представлена на Рисунке 10. Показано,

что контроль качества, проводимый на всех этапах технологического процесса, в том числе на этапе проектирования и изготовления технологической оснастки, является необходимой мерой, обеспечивающей заданные характеристики производимых деталей, позволяет добиться наилучшего качества продукции, а также исключить возможность возникновения дефектов.

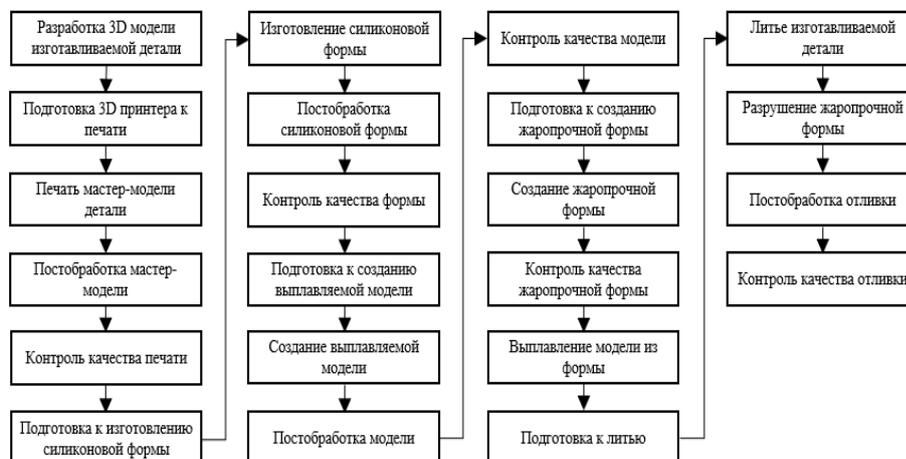


Рисунок 10 – Блок-схема разработанного технологического процесса

Расчет технико-экономической эффективности от внедрения технологической оснастки, произведенной с применением метода FDM 3D печати, проводился на примере изготовления изделий машиностроения, относящихся к классу 72 согласно классификатору ЕСКД – тела вращения с элементами зубчатого зацепления, к которым относится зубчатое колесо опорно-поворотного устройства автокрана КС-4572.

Проведенные расчеты показывают, что себестоимость изготовления деталей машин, по разработанной технологии с применением технологической оснастки, изготовленной по технологии FDM печати, незначительно превышает себестоимость традиционных технологий и существенно ниже технологий использующих в качестве материалов для производства технологической оснастки методами 3D печати фотополимерные смолы и полистирол.

Производство деталей машин по разработанной технологии позволит снизить трудоёмкость, а также повысить срок эксплуатации за счет снижения времени и объемов механической обработки.

## ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ традиционных технологий, применяемых при изготовлении оснастки деталей машин. Определено, что детали, изготовленные с применением оснастки изготовленной методами 3D печати, отличаются высокой точностью и чистотой поверхности, что исключает необходимость последующей механической обработки и позволяет увеличить качество и сроки эксплуатации деталей.

2. Проведен анализ технологий 3D печати, которые целесообразно использовать при изготовлении технологической оснастки изделий машиностроения. Установлено, что наиболее перспективной является технология FDM 3D печати, так как данная технология позволяет использовать широкий спектр полимерных композиционных материалов, с различными характеристиками.

3. Разработана программа по расчету технологических режимов изготовления силиконовых форм с учетом индивидуальных параметров применяемых компаундов, типа оборудования для дозирования компаунда, а также 3D мастер-модели на основании которой изготавливается силиконовая форма. Реализована возможность редактирования и пополнения баз данных содержащих индивидуальные характеристики силиконовых компаундов и оборудования для дозирования силикона.

4. Разработана математическая модель по определению оптимальной стратегии изготовления силиконовой формы, при которой трудоемкость этапа создания силиконовой формы будет снижаться за счет изменения параметров изготовления, таких как объем мастер-модели, объем резервуара для мастер-модели, а также индивидуальных характеристик силиконового компаунда.

5. Проведены исследования температурных переходов для ABS пластиков, применяемых при изготовлении, мастер-моделей. На основании проведенных испытаний методом ДСК, выбран материал с наиболее оптимальными показателями температуры стеклования. Установлено, что оптимальная величина температуры стеклования ABS пластиков с наполнителем составляет до 103,9°C, с теплоемкостью до 0,244 Дж/г·К, при этом оптимальная температура стеклования для ABS-пластиков с наполнителем на 4,5°C выше и составляет 107,3°C, с теплоемкостью до 0,310 Дж/г·К. Таким образом определено, что соблюдение температурных режимов позволит повысить точность и качество, а также расширить номенклатуру применяемых материалов при производстве мастер-моделей.

6. Исследовано влияние технологических режимов 3D печати на эксплуатационные характеристики мастер-моделей изготовленных из ABS пластика, к ним относятся: антиадгезионные свойства поверхностей, влагостойкость, предел прочности на сжатие, ударная вязкость при различных температурах (от +20 °C до -30 °C) и др. Установлено, что для получения мастер-моделей с наилучшими эксплуатационными характеристиками ( шероховатостью поверхности до 10 мкм, показателем ударной вязкости от 3,85 Дж/см<sup>2</sup> до 4,40 Дж/см<sup>2</sup> и показателем влагопоглощения от 1 % до 0,4 %) при подборе режимов 3D печати особое внимание следует уделять параметрам толщины слоя, процента заполнения и скорости печати.

7. Разработан технологический процесс производства оснастки для деталей машин с учетом применения 3D печати и проведена оценка его технико-экономической эффективности. Установлено, что использование силиконовых форм позволяет исключить этап создания 3D мастер-моделей, что в условиях массового производства снижает себестоимость готовой продукции. Предлагаемая технология имеет на 96 % меньше себестоимость, чем технология, использующая фотополимерные смолы и на 68 % меньше себестоимости технологии QuickCast использующей полистирол в качестве материала для изготовления, мастер-моделей. Разработаны рекомендации по контролю качества технологической оснастки при использовании 3D печати. Показано, что контроль качества, проводимый на всех этапах технологического процесса,

позволяет обеспечить наилучшее качество готовой продукции и минимизировать риск возникновения дефектов, а также позволит увеличить сроки эксплуатации машин.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

1. Павлов А.П., Дворянкин А.О. Обеспечение надежности и работоспособности 3D-принтеров // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 8. С. 20-25. (0,38 п.л. / 0,15 п.л.).

2. Дворянкин А.О., Баурова Н.И. Влияние технологических режимов 3D-печати на показатель ударной вязкости мастер-моделей // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2022. № 4 (71). С. 36-41. (0,38 п.л. / 0,20 п.л.).

3. Дворянкин А.О., Баурова Н.И. Способы предотвращения усадки мастер-моделей, изготавливаемых методами 3D печати // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2023. № 4(75). С. 67-74. (0,5 п.л. / 0,33 п.л.).

4. Дворянкин А.О., Баурова Н.И. Особенности разработки технологии производства деталей подъемно-транспортных машин внедрением 3D печати в литейное производство // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2024. № 2(77). С. 11-17. (0,44 п.л. / 0,30 п.л.).

5. Дворянкин А.О., Баурова Н.И. Перспективы внедрения технологий 3D-печати в литейное производство // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 10. С. 649-651. (0,19 п.л. / 0,16 п.л.).

6. Dvoryankin A.O., Nefelov I.S., Baurova N.I. As study of the effect of 3D-printing process parameters on the antiadhesive properties of the surfaces of master models // Polymer Science. Series D. 2022. Vol. 15. №2. P. 245-248. DOI 10.1134/S1995421222020034. (0,25 п.л. / 0,21 п.л.).

7. Dvoryankin A.O., Nefelov I.S., Baurova N.I. Evaluation of the moisture resistance of products manufactured using various 3D-printing modes // Polymer Science. Series D. 2022. Vol. 15. №4. P. 644-647. DOI 10.1134/S1995421222040098. (0,25 п.л. / 0,23 п.л.).

8. Dvoryankin A.O., Baurova N.I. Application of 3D printing technologies for the manufacture of master models in mechanical engineering // Russian Metallurgy (Metally). 2022. №13. P. 1770-1773. DOI 10.1134/S0036029522130080. (0,25 п.л. / 0,24 п.л.).

9. Dvoryankin A.O., Nefelov I.S., Baurova N.I. The influence of 3D-printing technological conditions on the performance properties of master models // ERSME-2023. E3S Web of Conferences 376. 2023. 01018. P. 1-5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337601018>. (0,31 п.л. / 0,25 п.л.).

10. Dvoryankin A.O., Baurova N.I. Features of Applying Silicone Materials for Making Casting Molds Based on 3D Master Models // Polymer Science. Series D. 2024. Vol. 17. №4. P. 941-944. DOI 10.1134/S1995421224701600. (0,25 п.л. / 0,23 п.л.).

11. Дворянкин А.О., Нефёлов И.С., Баурова Н.И. Исследование влияния технологических режимов 3D-печати на антиадгезионные свойства поверхностей мастер-моделей // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. № 9. С. 8-12. (0,31 п.л. / 0,26 п.л.).

12. Дворянкин А.О., Баурова Н.И. Применение технологий 3D-печати при изготовлении мастер-моделей в машиностроении // Технология металлов. 2021. №9. С. 17-21. (0,31 п.л. / 0,24 п.л.).

13. Дворянкин А.О., Нефёлов И.С., Баурова Н.И. Оценка влагостойкости изделий, изготовленных на различных режимах 3D-печати // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. №3. С. 44-48. (0,31 п.л. / 0,25 п.л.).

14. Дворянкин О.А., Дворянкин А.О. Влияние режимов 3D-печати на усадку моделей, изготавливаемых методами FDM печати // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 101-4. С. 136-142. (0,44 п.л. / 0,10 п.л.).

15. Дворянкин А.О., Баурова Н.И. Особенности применения силиконовых материалов при создании литейных форм на основе 3D мастер-моделей // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 6. С. 37-41. (0,31 п.л. / 0,30 п.л.).

16. Дворянкин А.О., Баурова Н.И. Моделирование технологических режимов изготовления силиконовых форм на основе 3D мастер-моделей // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2025. № 1. С. 25-32. (0,5 п.л. / 0,41 п.л.).

17. Дворянкин А.О., Баурова Н.И. Потенциал применения силиконовых форм при изготовлении деталей наземных транспортно-технологических машин и комплексов технологией оболочкового литья // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2025. № 3. С. 23-27. (0,31 п.л. / 0,25 п.л.).

18. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2023623863 РФ. / Нефелов И.С., Баурова, Н.И., Дворянкин А.О.; № 2023623457 заявл. 20.10.2023; опубл. 09.11.2023, Бюл. № 11. 1 с.