

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Битюцкий Александр Дмитриевич

Применение аддитивных технологий в литейном производстве для изготовления художественных и ювелирных изделий с целью повышения их качества и художественной привлекательности

2.6.3 – «Литейное производство»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Кандидат технических наук, доцент
Ивлева Лидия Петровна

Москва – 2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Литьё по выплавляемым моделям позволяет получать высокоточные отливки с минимальной шероховатостью поверхности, что уменьшает количество этапов постобработки по получению качественного изделия. Особое внимание при реализации ювелирных и художественных изделий уделяют созданию узора и структуры, которые позволяют повысить художественную привлекательность и подчеркнуть оригинальность разрабатываемого продукта.

До 80-х годов XX века применялись субтрактивные автоматизированные (фрезерование на ЧПУ-станке) и ручные (токарная обработка, резка) методы для создания выплавляемых и мастер-моделей. Данные методы основаны на механической обработке восковой заготовки, согласно конфигурации разрабатываемого изделия.

Технологическое отличие аддитивного метода заключается в послойном наращивании материала по контурам трехмерной модели до получения готового изделия. Первым запатентованным устройством для трехмерной печати является стереолитографическая установка, разработанная Чарльзом Халлом в 1986 году.

Внедрение аддитивных технологий в производственный процесс по реализации литейных моделей, изложенное в научных публикациях, охарактеризовано совершенствованием разновидностей ЭВМ, печатного оборудования и активным развитием программного обеспечения по трехмерному моделированию и подготовке моделей к 3D-печати.

Исследованы методы генеративного дизайна и топологической оптимизации, позволяющие в ходе многочисленных итераций создавать различные структуры в моделях, исключая шаблонность и плагиат в получаемом результате.

В 2019 году был издан Указ Президента Российской Федерации № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации», согласно которому утверждена Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года.

Активное внедрение искусственного интеллекта и нейросетей для эскизирования и проектирования повысило темпы реализации конструкций и изделий под задачи государственных программ.

Топологическая оптимизация формирует геометрическую структуру изделия, математически рассчитываются прочностные характеристики и проводится симуляция интеграции объекта в рабочую среду. Перед запуском в производство моделируют испытания на прочность, определяют напряжения и геометрические отклонения в математической модели изделия.

В работе рассматривается применение топологической оптимизации как инструмента для создания конфигураций ювелирных и художественных изделий на основе

математических вычислений и базы данных результатов экспериментов, обрабатываемых искусственным интеллектом.

Актуальной проблемой является отсутствие исследований и опытно-промышленного опробования способа создания ювелирных и художественных отливок, отвечающих требованиям по снижению расходов затрачиваемого материала с повышением качества изготавливаемой продукции и требованиям по реализации сложных геометрических структур, низкой шероховатости поверхности, высокой точности передачи тонкостенных и текстовых узоров на поверхности изделия.

Разработка эффективных алгоритмов оптимизации топологии является актуальной задачей, ввиду расширения областей применения 3D-печати. Для художественных и ювелирных изделий топологическая оптимизация также актуальна, с одной стороны может выступать основой дизайна, с другой — обеспечивать заданные эксплуатационные характеристики.

Цель работы.

Разработка методики применения топологической оптимизации для проектирования конфигураций выплавляемых моделей и реализация цифровой системы по автоматизации выбора аддитивной технологии, материала и алгоритма топологической оптимизации при изготовлении художественных и ювелирных изделий для повышения их качества и художественной привлекательности на основе результатов исследования применения аддитивных технологий и компьютерного моделирования в литейном производстве.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать алгоритм формообразования и постобработки поверхности и формы ювелирных и художественных изделий при топологической оптимизации в специализированном программном обеспечении;
2. Установить оптимальный способ плавления и заливки сплавов CrM925 и M67/33 для минимизации недолива и усадочных дефектов в ювелирных и художественных отливках;
3. Исследовать формовочные материалы и способы приготовления формовочных смесей при литье по выплавляемым моделям. Установить оптимальный состав формомассы для устранения дефектов на поверхности отливок из сплавов CrM925 и M67/33 ;
4. Провести опытно-промышленное опробование по изготовлению образцов изделий из сплавов CrM925 и M67/33 с применением топологической оптимизации по технологии литья по выплавляемым моделям;
5. Разработать справочно-рекомендательное программное обеспечение по подбору технологии, материала и алгоритма топологической оптимизации выплавляемых моделей ювелирных и художественных изделий.

Научная новизна.

1. Исследованы процессы топологической оптимизации художественных отливок и описаны зависимости полученной оптимизированной геометрической структуры с алгоритмом постобработки изделия;
2. Разработана методика изготовления изделий из сплавов CrM925 и M67/33 с применением топологической оптимизации методом литья по выплавляемым моделям на основании исследования закономерностей формообразования литейных моделей, влияния способа заливки расплава, температуры опоки и количества питателей на проливаемость сложногогеометрических полостей литейной формы;
3. Установлены оптимальные пропорции формовочных материалов, обеспечивающие отсутствие геометрической деформации, пригара и пористости на поверхности отливок из сплавов CrM925 и M67/33 — составы, содержащие от 50% до 55% кристобалита, от 25% до 35% кварца, от 20% до 25% гипса, и содержание воды в смеси от 32 до 40 мл на 100 г сухой формомассы;
4. Разработана единая цифровая система по подбору алгоритма топологической оптимизации, технологии и материала изготовления ювелирных и художественных изделий на основании исследования закономерностей формообразования литейных моделей, трехмерной печати и литья по выплавляемым моделям топологически оптимизированных изделий.

Практическая значимость.

1. Предложен автоматизированный способ разработки конфигураций ювелирных и художественных отливок, обеспечивающий снижение их массы при сохранении эксплуатационных характеристик;
2. Разработаны алгоритмы по топологической оптимизации моделей ювелирных и художественных изделий, получаемых методом быстрого прототипирования и литья по выплавляемым моделям, а также предложения по рациональному выбору результата оптимизации и его постобработке;
3. Сформированы практические рекомендации по трехмерной печати выплавляемых моделей с элементами литниково-питающей системы и созданию пресс-форм для увеличения выхода годной продукции при изготовлении ювелирных и художественных отливок с топологически оптимизированной структурой;
4. Применение разработанного метода подтверждено опытно-промышленным опробованием — изготовлением партии кулонов и браслета из сплавов CrM925 и M67/33 по технологии литья по выплавляемым моделям;
5. Результаты диссертационной работы внедрены в деятельность предприятия высокоточного литья, полного цикла производства и обработки ООО «АВ-Металл». Успешное внедрение в производственный процесс разработанной методики, рекомендаций и программного обеспечения отмечено повышением художественной привлекательности

разрабатываемых изделий и снижением затрачиваемого материала на этапах 3D-печати восковых моделей и получения отливок по технологии литья по выплавляемым моделям.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Метод изготовления бионических ювелирных и художественных отливок из сплавов SrM925 и M67/33 с применением топологической оптимизации;
2. Классификация моделей ювелирных и художественных изделий по способу их получения с описанием этапов, параметров, ограничений оптимизации;
3. Правила постобработки моделей топологически оптимизированных ювелирных и художественных изделий на основе установленных геометрических закономерностей и особенностей построения оптимизированной структуры;
4. Матрица значений параметров топологической оптимизации ювелирных и художественных изделий, реализованная в цифровой форме.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях, конгрессах и заседаниях, представленных в таблице 1.

Таблица 1 — Перечень мероприятий и докладов по теме исследования

№	Научное мероприятие	Тема доклада
1	X Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные литейные технологии», г. Москва, 2020 г.	«Выбор материала для трехмерной печати моделей в ювелирном и художественном литье»
2	Российская научно-техническая конференция с международным участием «Инновационные технологии в электронике и приборостроении» («РНТК ФТИ – 2020»), г. Москва, 2020 г.	«Преимущества применения аддитивных технологий над фрезерованием при создании моделей для литья художественных и ювелирных изделий»
3	XXII Всероссийская научно-практическая конференция и смотр-конкурс творческих работ студентов, магистров и аспирантов по направлению «Технология художественной обработки материалов», г. Санкт-Петербург, 2020 г.	«Разработка рекомендаций по подбору аддитивной технологии и материала модели для литья художественных и ювелирных изделий»
4	Российская научно-техническая конференция с международным участием «Инновационные технологии в электронике и приборостроении» («РНТК ФТИ – 2021»), г. Москва, 2021 г.	«Биомимикрия: возможность применения аддитивных технологий при создании моделей для художественного литья»
5	Конференция «High-Tech Design» от Фонда поддержки инноваций и молодежных инициатив Санкт-Петербурга, г. Санкт-Петербург, 2022 г.	«Генеративный дизайн как технология создания бионических художественных изделий»
6	XI Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные литейные технологии», г. Москва, 2022 г.	«Разработка справочно-рекомендательного приложения по топологической оптимизации художественных изделий»

Продолжение таблицы 1.

7	Конференция «Перспективные материалы и технологии» («ПМТ - 2022»), г. Москва, 2022 г.	«Перспективы развития топологической оптимизации как средства создания ювелирных и художественных изделий»
8	XXV Всероссийская научно-практическая конференция и смотр-конкурс творческих работ студентов, магистров и аспирантов по направлению «Технология художественной обработки материалов», г. Санкт-Петербург, 2022 г.	«Топологическая оптимизация как технология создания бионических художественных изделий»
9	Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, г. Магнитогорск, 2023 г.	«Применение топологической оптимизации как технологии создания художественных изделий»
10	Наука и образование в области технической эстетики, дизайна и технологии художественной обработки материалов: материалы XV международной научно-практической конференции вузов России, г. Санкт-Петербург, 2023 г.	«Алгоритм проведения топологической оптимизации художественных изделий»
11	XXVI Всероссийская научно-практическая конференция и смотр-конкурс творческих работ студентов, магистрантов и аспирантов по направлению «Технология художественной обработки материалов», г. Ростов-на-Дону, 2023 г.	«Применение топологической оптимизации для разработки ювелирных изделий на примере создания бионического кулона»
12	Национальная научно-техническая конференция с международным участием «Перспективные материалы и технологии» («ПМТ - 2024»), г. Москва, 2024 г.	«Программная, механическая и ручная постобработка топологически оптимизированных моделей и отливок ювелирных изделий»
13	VII Международный конгресс «Дизайн. Материалы. Технология», г. Санкт-Петербург, 2024 г.	«Разработка моделей топологически оптимизированных ювелирных изделий и их 3D-печать с литниками для последующего получения качественной отливки»
14	Научные семинары кафедры ЛТиХОМ НИТУ МИСИС (2020-2024 гг.)	Доклады по теме исследования

Публикации.

По результатам диссертационной работы опубликовано 7 статей в рецензируемых печатных изданиях, входящих в перечень ВАК, 12 тезисов докладов конференций (РИНЦ) и получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Достоверность научных результатов.

Достоверность научных результатов подтверждается использованием современных методик исследования с применением специализированного программного обеспечения, успешным получением опытных образцов по разработанной методике, высокой оценкой

представленных результатов на многочисленных профильных конференциях и конгрессах, подтвержденных дипломами за I место в номинациях «Инновационные технологии в дизайне», «Технология художественной обработки материалов», «Информационные технологии», опубликованием научных результатов в журналах, входящих в перечень ВАК, и защитой полученных данных в цифровом виде двумя свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020661780 и № 2024616416.

Все испытания были проведены в соответствии с рекомендациями действующих ГОСТ. Текст диссертации и автореферат были проверены на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературных источников из 177 наименований и 6 приложений. Общий объем работы составляет 165 страниц машинописного текста, включая 75 рисунков, 29 таблиц и 23 формулы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится актуальность, цели и задачи выбранного направления исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен анализ литературных источников по тематике диссертационного исследования.

Рассмотрены различия в механических свойствах, производительности и себестоимости изделий, произведенных по технологии быстрого прототипирования и литья по выплавляемым моделям (A. Vevers, A. Kromanis, E. Gerins, J. Ozolins) и перспективы 3D-печати в области литейного производства (Jin-wu Kang, Qiang-xian Ma).

Изложены принципы вакуумной индукционной плавки (В.М. Карпенко, Л.Т. Жукова, В.Б. Лившиц), жидкотекучести сплавов и проектирования литниково-питающих систем (М.В. Пикунов, А.И. Вальтер). Описаны применяемые в ювелирном литье формовочные материалы (В.М. Карпенко, В.Б. Лившиц, Г.Ф. Баландин, П.П. Берг) и взаимосвязь свойств литейной формы с образованием пригара на поверхности отливок (В.А. Аммер, Г.Ф. Баландин, М.В. Пикунов).

Разработка бионических структур аддитивным методом применяется при создании архитектурных объектов как Trabeculae Pavilion (Roberto Naboni, Luca Breseghello, Anja Kunic), атрибутов интерьера на примере стула Generico (Marco Hemmerling, Ulrich Nether). Отмечен потенциал разработки «правил проектирования» бионических изделий, чтобы использовать их в инженерных и дизайн-решениях (Anton du Plessis et al.). Разработка бионических структур при создании ювелирных и художественных изделий и реализация их путем применения аддитивных технологий и последующего литья не распространена.

Продemonстрированы методики художественно-конструкторской экспертизы (Г.Г. Азгальдов, Е.А. Севостьянова), оценки качества генерируемых моделей (В.В. Дронов) и художественных изделий (Л.Б. Богданович, Р.Г. Варламов) и их эстетических свойств (ГОСТ 22851-77, В.В. Бычков, Я.Ю. Ленсу, В.Ф. Рунге). Приведена классификация изделий по сложности формы (Н.Д. Дронова), показателям технологичности и эстетичности (В.Л. Глазычев, В.В. Дронов, Я.Ю. Ленсу).

На основании литературного обзора сделаны выводы, определены термины «качества» и «художественной привлекательности» ювелирных изделий и поставлены задачи исследования.

Во второй главе описаны методики, оборудование и материалы исследования. В таблице 2 представлена разработанная форма технического задания на изготовление ювелирных изделий в рамках данной работы.

Таблица 2 — Техническое задание на изготовление изделий

Изделие	Кулон-1	Кулон-2	Браслет
Форма	Изделие должно имитировать естественные очертания и структуру листа растения	Полусфера с бионическим паттерном и контурным рельефом, соответствующим векторному логотипу (размер логотипа: не менее 16 мм в диаметре)	Монолитная конструкция с элементами, имитирующими природные формы (например, ветви, корни)
Размеры (ДхШхВ), мм	18,4 x 28 x 6,5	22,5 x 22,5 x 6,9	103 x 103 x 12,9
Масса, г	< 4		< 40
Максимальная толщина стенки, мм	0,8		1,2
Точность изготовления	Допуск по линейным размерам: ±0,5 мм. (ГОСТ 26645-85)		
Чистота поверхности (шероховатость)	Не ниже 10 класса по ГОСТ 2789-73. (Rz < 0,64 мкм; Rmax < 0,16 мкм; рекомендуемый Ra = 0,1 мкм)		
Цвет	Золотистый, серебристый		Серебристый
Общие требования			
Поверхность	Глянцевая, высокая светоотражательная способность		
Ажурные элементы	Предусмотреть сквозные ажурные элементы, имитирующие бионику, для обеспечения изящности и оригинальности дизайна		
Прочность	Устойчивость к деформациям при механических воздействиях, в том числе при ношении на шее (кулоны) и руке (браслет)		
Весовые характеристики	Снижение массы изделия для комфортного ношения на цепочке (кулоны) и руке (браслет)		
Эргономичность	Обеспечение комфорта при ношении, отсутствие острых краев или элементов, вызывающих дискомфорт		
Долговечность	Изделие должно быть устойчиво к коррозии и механическим воздействиям		
Контроль качества	Визуальный осмотр; измерение размеров штангенциркулем; проверка эргономичности при физическом взаимодействии с изделием (тактильные ощущения, удобство фиксации цепочки для кулонов); взвешивание изделий; проверка прочностных характеристик при механических воздействиях с помощью компьютерной симуляции; рентгенофлуоресцентный анализ.		
Критерии приемки	Соответствие заданным размерам; цвет и светоотражательная способность поверхности; малый вес изделий; целостность конфигураций; отсутствие пригара и усадочных дефектов на поверхности изделий.		

Обосновано применение метода литья по выплавляемым моделям для изготовления ювелирных изделий, для проектирования выплавляемых моделей — топологической оптимизации, для производства выплавляемых моделей — 3D-печати.

Представлены примеры алгоритмов проведения оптимизации в программных продуктах Ansys Mechanical, Autodesk Fusion 360, Solidworks для формирования матрицы оптимизации ювелирных и художественных изделий.

Подготовка к 3D-печати проводилась в программе 3D Sprint. Пост выплавляемых моделей производился из воскодержающего материала Visijet Icast Real Wax, который имеет низкую зольность ($<0,05\%$), линейную усадку ($<0,8\%$) и низкую температуру плавления ($65\text{ }^{\circ}\text{C}$). Поддержки напечатаны из VisiJet S300 — специального легкоплавкого материала ($55\text{--}65\text{ }^{\circ}\text{C}$).

3D-печать проведена на ProJet CPX 3510 в режиме высокого разрешения ($375\times375\times790\text{ dpi}$): толщина слоя печати в 32 мкм , скорость печати — 5 мм/ч . Объем рабочей камеры в данном режиме составляет $290\times185\times200\text{ мм}$.

В рамках данной работы исследуется влияние заполнения расплавом формы, изготовленной по сложногогеометрическим тонкостенным конфигурациям моделей, за счет разработки специальной системы питателей и заливки при избыточном давлении для предотвращения недолива, усадки и образования прочих дефектов.

Для исследования пропорций материалов формовочной смеси в качестве основных компонентов использовались: кристобалит, пылевидный кварц и гипс. Составы смеси варьировались следующим образом: содержание кристобалита от 40% до 70% , содержание кварца от 20% до 40% , содержание гипса от 20% до 35% . Фракция зерна компонентов, просеянных через сито и используемых в работе, не превышает $0,08\text{ мм}$.

Для изготовления изделий и исследования способов заливки сплавов CrM925 и M67/33, а также анализа зависимости температуры опоки и количества питателей на недолив в отливках из CrM925 применялась индукционная вакуумная литейная машина Indutherm VC 600.

Indutherm VC 600 имеет запорные устройства, отделяющие камеру с тиглем (плавильная камера) и камеру с опокой (рабочая камера). Рабочая камера герметично отделена от плавильной камеры. Термопара размещена в стенке тигля для контроля интенсивности и температуры нагрева расплава.

В данной работе для изготовления партии ювелирных изделий, исследования способов заливки и установления зависимости недолива от температуры опоки и количества установленных питателей на восковой модели, плавление металлической шихты для приготовления сплава CrM925 проводилось в вакууме, а для приготовления латуни M67/33 — в защитной среде аргона.

В главе представлены вводные параметры для исследования способов заливки сплавов CrM925 и M67/33 и анализа зависимости температуры опоки и количества питателей на недолив в отливках из CrM925.

В третьей главе раскрывается основная идея и принципы применения топологической оптимизации и генеративного дизайна как технологии для создания оригинальных ювелирных и художественных изделий. Для производства художественной модели с применением топологической оптимизации определён универсальный алгоритм с поиском паттерна оптимизации, представленный на рисунке 1.



Рис. 1. Алгоритм поиска паттерна оптимизации художественного изделия

В главе описаны этапы изготовления опытных образцов изделий с применением технологии топологической оптимизации. Реализация исходной формы кулонов и браслета началась с создания чертежа (рисунок 2) и 3D-моделей объемных болванок, по которым проводилась оптимизация.

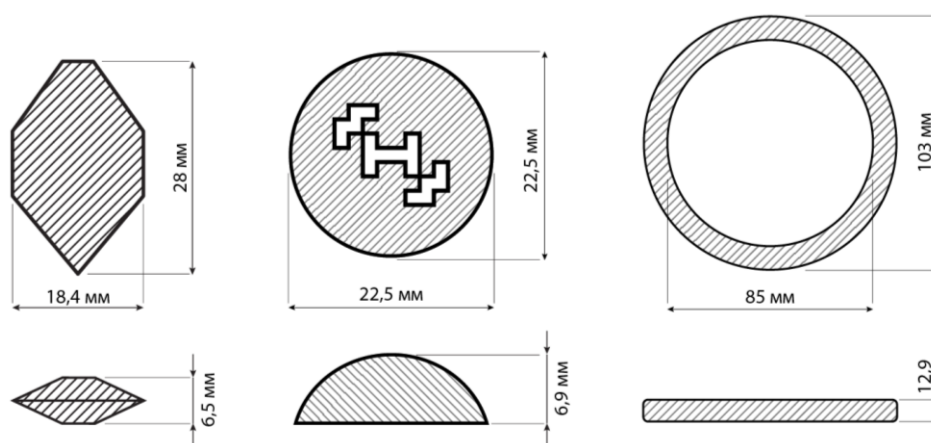


Рис. 2. Эскизы кулонов и браслета для оптимизации

Целью оптимизации кулонов являлось снижение массы изделия до 80%. При поиске необходимого паттерна к модели прикладывались нагрузки при создаваемой вертикальной силе в интервале от 20 до 150 Н, а также при приложении вращающих сил в диапазоне от 2,5 Н·м до 25 Н·м.

Для реализации топологически оптимизированных изделий с логотипом в процессе определения условий и задач оптимизации поверхность логотипа указывается как неизменяемая (зарезервированная) область проектирования.

Для разработки бионического браслета изучен ОСТ 117-3-002-95, согласно пункту 1.1.34 браслеты должны выдерживать статическое усилие на разрыв не менее 29,4 Н (3 кгс).

Целью оптимизации браслета являлось снижение массы изделия до 60%. При поиске необходимого паттерна к модели прикладывались нагрузки при создаваемой направленной силе в интервале от 20 до 120 Н, а также при приложении вращающих сил в диапазоне от 2,5 Н·м до 25 Н·м.

При получении бионической структуры литейной модели необходимо учитывать несколько технологических ограничений: минимальная толщина стенок модели должна быть не менее 0,8 мм (для модельного блока с малыми моделями [$V_m < 500 \text{ мм}^3$] допускается 0,7 мм); необходимо избегать нависающих элементов на тонком основании; сократить перепады в толщине сечений, переходы из толстого сечения в тонкое и наоборот; при наличии малых отверстий требуется увеличить их размер и расположить вдали от краёв модели.

В главе описывается разработка программного обеспечения «TechOpt», предназначенного для подбора алгоритма топологической оптимизации и аддитивной технологии создания моделей ювелирных и художественных изделий для литья по выплавляемым моделям. Актуальность и новизна программы заключаются в разработке и систематизации алгоритмов реализации ювелирных и художественных изделий с применением топологической оптимизации.

В первом модуле программы алгоритм оптимизации формируется в виде руководства для пользователя, исходя из заданных им параметров. Программа разработана для освоения метода бионического проектирования и реализации исходных 3D-моделей в оптимизированном виде и является ассистентом в изучении данной технологии для начинающих специалистов.

Второй модуль программы предназначен для подбора наиболее эффективного варианта аддитивной технологии для производства литейной модели в результате оптимизации её геометрической структуры.

В четвертой главе представлена разработка методики подбора технологии и материала для выплавляемых и мастер-моделей ювелирных и художественных изделий, реализованной в виде зарегистрированного справочно-рекомендательного программного обеспечения для ЭВМ.

Определена необходимость в индивидуализации параметров подбора для каждого из исследуемых видов аддитивной технологии по причине различий процессов печати. Критерии и границы их значений сформированы на основании компьютерного моделирования в программном обеспечении 3D Sprint, Modelworks, Preform, Ultimaker Cura

для симуляции процесса 3D-печати, литературного обзора и практического опыта в разработке художественных изделий.

Классификация параметров выбора технологии и материала производимой модели, способствует снижению получения брака при производстве отливок ювелирного и художественного характера. По результатам анализа, ключевые параметры для подбора технологии 3D-печати литейных и мастер-моделей и их значения приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Сравнительная таблица параметров аддитивных технологий

Вид технологии	Скорость печати	Детализация печати	Сложность геометрии модели	Наибольшие габариты модели*	Объем производства	Вид модели
FDM	Средняя	(120+) μm	Низкая	$V_M > 100 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$ $X < 450 \text{ мм}$	Серийное, Единичное	Выжигаемая, выплавляемая
SLA	Средняя	(10+) μm	Высокая	$V_M < 15000 \text{ мм}^3$ $X < 250 \text{ мм}$	Массовое, Серийное	Выжигаемая, Мастер-модель
SLS	Средняя	(200+) μm	Высокая	$V_M > 900 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$ $X < 800 \text{ мм}$	Единичное	Выжигаемая
MJP	Высокая	(16+) μm	Высокая	$V_M < 8500 \text{ мм}^3$ $X < 200 \text{ мм}$	Массовое, Серийное	Выплавляемая
DLP	Высокая	(35+) μm	Средняя	$V_M > 15000 \text{ мм}^3$ $X < 150 \text{ мм}$	Массовое, Серийное, Единичное	Выжигаемая, Мастер-модель
* V_M — рекомендуемый объем модели, X — рекомендуемая максимальная длина стороны модели						

Реализация справочно-рекомендательного приложения позволяет осуществить эффективное применение структурированной и классифицированной информации в производственных целях на предприятиях художественного и ювелирного литья, а также может использоваться в качестве единой образовательной базы данных по применению аддитивных технологий для студентов и молодых специалистов в литейном производстве.

В пятой главе на основании проведенных исследований сформированы рекомендации по изготовлению ювелирных и художественных изделий с применением топологической оптимизации методом литья по выплавляемым моделям из сплавов CrM925 и M67/33.

В работе предложен метод трехмерной печати моделей с питателями с целью исключения риска повреждения модели с бионическими структурами, текстовыми и декоративными рельефами при установке литниково-питающей системы (ЛПС).

Установка питателей производится в наиболее толстые и широкие места модели, которые возможно определить через программные продукты, например, Materialise Magics или NetFabb.

Площадь сечения питателя зависит от нескольких факторов: сечения стенки модели в зоне крепления питателя; различия в объеме элементов изделий в модельном блоке; места крепления модели на восковом стояке. Рекомендуемая длина моделируемого питателя — 5-10 мм, что обусловлено способом демонтажа ЛПС.

При работе с моделями ювелирных изделий, расположенными в центральной части модельного блока, толщина питателя соотносится как 1–1,2:1 к толщине стенки выплавляемой модели. Модели представлены на рисунках 3-5.

Для сферических и эллипсоидных конфигураций требуется моделирование коллектора на этапе 3D-моделирования по причине труднодоступности установки модели со стандартными прямыми питателями к стояку.

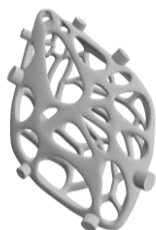


Рис. 3. Кулон-1
(18,37 x 28 x 6,47 мм)

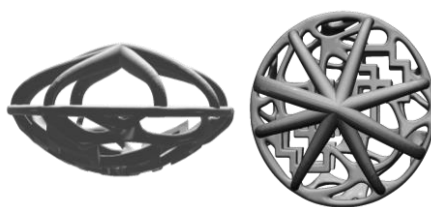


Рис. 4. Кулон-2
(22,49 x 22,47 x 6,88 мм)



Рис. 5. Браслет
(103,05 x 103 x 12,92 мм)

Модели браслета и кулона-2 с элементами ЛПС и без них были напечатаны на принтере ProJet CPX 3510 по технологии MJP из воскодержущих материалов VisiJet M2 ICast RealWax и SETWAX CAST3 по технологии многоструйной печати, результаты представлены на рисунке 6. Модели кулона-1 из SETWAX CAST3 обладают схожими характеристиками: зольность — 0,05-0,08%, температура плавления — 65-69 °С, плотность — 0,84 г/см³, объемная усадка — 1,8%, линейная усадка — 0,7% (рисунок 7).



Рис. 6. Модели браслета и кулона-2

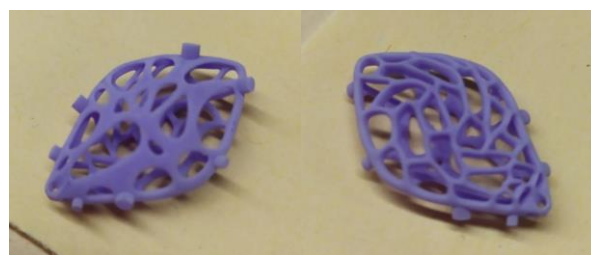


Рис. 7. Напечатанная модель кулона-1

Данные модели были использованы для сборки модельного блока.

Влияние температуры нагрева гипсовой формы на её прочностные характеристики отражено на рисунке 8. При нагреве прочность гипсовых форм с кристобалитовым наполнителем понижается. Для сравнения формомасса с содержанием 25% кварца продемонстрировала лучшие показатели прочности на изгиб: 0,8375 МПа при комнатной температуре (20 °С) и 0,7575 МПа при прокаливании до 600 °С. Испытание проводилось на установке для трехточечного изгиба, оборудованной двумя опорами и верхним пуансоном, который создает вертикальную нагрузку в центральной точке образца.

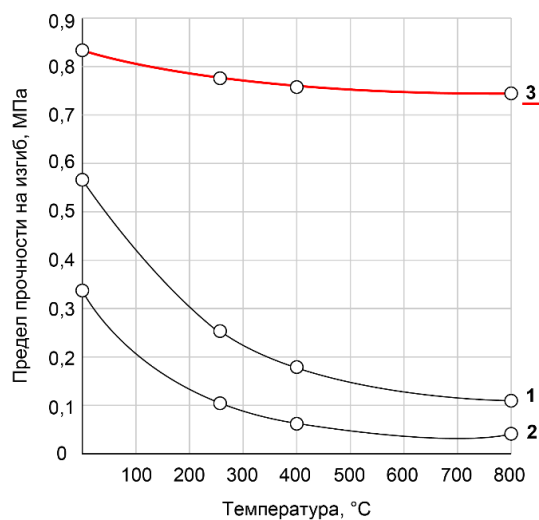


Рис. 8. Влияние температуры на прочность гипсовых форм при изгибе: (1) — 50% гипса + 50% кристобалита; (2) — 30% гипса + 70% кристобалита; (3) — 25% гипса + 25% кварцевого песка + 50% кристобалита

Можно сделать вывод, что существенной проблемой гипсокристобалитовых форм является их малая прочность, в связи с чем, при приготовлении формомассы необходимо добавление пылевидного кварца, который является хорошим огнеупором и повышает прочностные характеристики смеси.

При схватывании гипсовая масса расширяется, что обеспечивает хороший отпечаток с модели. Контроль расширения формовочных смесей необходим для минимизации внутренних напряжений в форме, предотвращения ее деформации и обеспечения точности воспроизведения геометрии восковых моделей.

Определены показатели расширения гипсовых смесей различного состава в зависимости от времени выдержки, результаты представлены на рисунке 9.

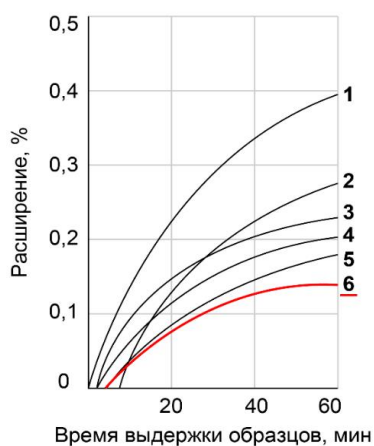


Рис. 9. Расширение гипса и гипсовых смесей при схватывании: (1) — высокопрочный гипс марки 500; (2) — высокопрочный гипс марки 300; (3) — 80% гипса + 20% асбеста; (4) — 50% кварцевого песка + 40% гипса + 10% асбеста; (5) — 67% кварцевого песка + 3% асбеста + 30% гипса; (6) — 25% гипса + 25% кварцевого песка + 50% кристобалита

Однако значительные изменения размеров гипсовых форм в процессе изготовления и подготовки к заливке металлом снижают точность формы и способствуют образованию трещин, что неблагоприятно сказывается на качестве отливки. Наличие в гипсовых формах наполнителей таких как асбест, диас или кристобалит снижает усадку форм.

Образец гипсовой смеси заформовали и поместили в камеру дилатометра. Прибор фиксирует исходные размеры образца с помощью измерительных датчиков. Выдерживали при комнатной температуре и измеряли линейные размеры образца на протяжении 60 минут. Дилатометр фиксировал изменение длины образца по мере его затвердевания и расширения с точностью до 0,001 мм. Показания дилатометра обрабатывались для расчета процента расширения. Полученные данные позволили рассчитать процентное расширение гипсовой смеси.

Расширение гипса при схватывании колеблется от 0,1 до 0,5%. Наименьший показатель расширения зафиксирован для исследуемой в данной работе формомассы 25/25/50.

Проведен эксперимент по определению оптимальных пропорций компонентов формомассы для получения отливок без дефектов, зависящих напрямую от литейной формы — пригара, трещин, газовых раковин и деформации конфигурации отливки.

Каждая формовочная смесь использовалась для изготовления отдельных разовых литейных форм. Начальные пропорции для исследования взяты на основании состава формомассы К-90: кристобалит — 40%, кварц — 35%, гипс — 30%. Формомассы 1-7 подобраны в пропорциях 100 г на 40 мл воды, общее содержание формомасс 8-14 превысило 100 г, что позволило оценить влияние воды на качество литейной формы и полученных отливок. Серии изготовления форм и заливок представлены в таблице 4.

Таблица 4 — Результаты исследования пропорций формомассы

№	Крб, мг	Квр, мг	Гипс, мг	Результат				
1	35	45	20	Деформация формы, гребешки (наросты)				
2	45	35	20	Отливка без видимых дефектов				
3	50	30	20	Отливка без видимых дефектов				
4	55	25	20	Отливка без видимых дефектов				
5	60	20	20	Пригар, горячие трещины				
6	55	20	25	Пригар, горячие трещины				
7	50	25	25	Отливка без видимых дефектов				
Общее содержание формомассы свыше 100 мг на 40 мл воды								
№	Крб, мг	Квр, мг	Гипс, мг	Крб, %	Квр, %	Гипс, %	В/Ф, %	Рез-т
8	55	25	25	52	24	24	38	+
9	60	30	25	52	26	22	34	+
10	65	35	25	52	28	20	32	+
11	70	40	25	52	30	18	30	-
12	70	30	25	56	24	20	32	+
13	70	35	30	52	26	22	30	-
14	70	35	35	50	25	25	28,5	-
Крб — кристобалит; Квр — пылевидный кварц; В/Ф — отношение содержания воды к общему объему формомассы; Рез-т — результат: «+» — качественная форма и отливка, «-» — брак								

На основании эксперимента установлены оптимальные пропорции формовочных материалов, обеспечивающие отсутствие пригара, трещин, деформации, газовых раковин и пористости на отливках — составы, содержащие от 50% до 55% кристобалита, от 25% до 35% кварца, от 20% до 25% гипса, и содержание воды в смеси от 32 до 40 мл на 100 г сухой формомассы.

Для оценки зависимости проливаемости сплавов CrM925 и М67/33 от способа их заливки в форму проведены экспериментальные заливки (гравитационная и под избыточным давлением) обоих сплавов.

Для проведения эксперимента использованы модели кулона-1, собранные в модельные блоки объемом 5 и 25 см³. В обоих модельных блоках объем стояка превышает суммарный объем всех моделей, коллекторов и питателей, что способствует качественному заполнению формы и минимизации дефектов в теле отливки изделия. Модели расположены по 2-4 образца на разных уровнях стояка (расстояние между уровнями — 3 см) для равномерного распределения расплава. Модели с питателями размещены под углом 45°. Образцы модельных блоков представлены на рисунке 10.

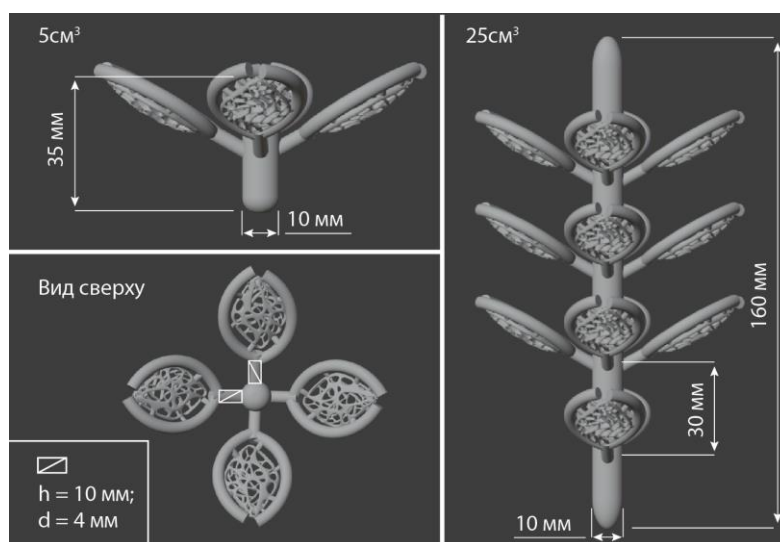


Рис. 10. Модельные блоки объемами 5 и 25 см³ для эксперимента

Проведено 8 серий заливок, варьировались сплавы, объемы модельных блоков и способы заливки. После затвердевания и извлечения отливок оценивалось наличие дефектов, таких как недолив и неслитины (для упрощения дальнейшего изложения оба дефекта будут объединены термином «недолив»). Процент недолива фиксировался для каждой серии заливок при помощи 3D-сканирования и компьютерного анализа. Результаты заливок представлены в таблице 5.

Заливка под избыточным давлением показала себя наиболее эффективным методом, обеспечивающим отсутствие недолива как при небольших (5 см³), так и при больших (25 см³) объемах модельных блоков. Это связано с улучшением проникновения расплава в

тонкие и сложногогеометрические участки формы, что особенно важно для изделий с бионическими структурами.

Таблица 5 — Результаты исследования способов заливки расплавов

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Сплав	СрМ925				М67/33			
Объем блока, см ³	5	25	5	25	5	25	5	25
Способ заливки	изб.д. (+3)	изб.д. (+3)	грав.	грав.	изб.д. (+3)	изб.д. (+3)	грав.	грав.
Недолив, %	0	0	6	14	0	0	0	6
изб.д. (+3) — под избыточным давлением (+3 бар), грав. — гравитационная заливка								

Гравитационная заливка продемонстрировала увеличение процента недолива с увеличением объема модельного блока. Для отливок из сплава СрМ925 процент недолива достигал до 14% при увеличении объема модельного блока. Для латуни М67/33 максимальный показатель недолива составил 6%. Это указывает на то, что гравитационная заливка менее эффективна для сложных фасонных отливок, её эффективность значительно снижается с увеличением объема модельного блока. В каждой заливке с браком наибольшая область недолива находилась в центральной части модельного блока.

После исследования способа заливки расплава, оценивалось влияние количества питателей на восковых моделях и температуры опоки на показатель проливаемости формы расплавом. Цель исследования заключалась в установлении зависимости между температурой опоки и количеством питателей на кулоне-1 при литье из сплава СрМ925 с использованием гравитационной заливки. Исследование направлено на определение оптимальных условий для минимизации процента недолива (и дальнейшей отбраковки отливок) в центральной части модельного блока, где наиболее вероятен непролив.

Опоки выдерживались в муфельной печи при температуре на 100 °С выше заданной для заливки (600°С, 650°С, 700°С, 750°С). Места крепления и удаления питателей на всех моделях были идентичны, благодаря установленным на этапе 3D-моделирования элементам ЛПС. Результаты заливок представлены в таблице 6.

Таблица 6 — Влияние температуры опоки, количества питателей на недолив

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Т _{оп.} , °С	500	550	550	600	600	650	650	650
Количество питателей, шт	7	7	6	7	6	7	6	5
Σ(Спит), см ²	0,549	0,549	0,471	0,549	0,471	0,549	0,471	0,393
Недолив, %	22	6	9	4	5	2	2	11

Результаты эксперимента демонстрируют, что недостаточное количество питателей можно компенсировать увеличением температуры опоки в адекватных пределах, не подвергая форму риску деформации или разрушения.

Сокращение более одного питателя приводит к резкому увеличению процента недолива, что указывает на важность правильного расчета суммарной площади сечений питателей для обеспечения качественного заполнения формы и минимизации дефектов.

Для получения итоговых изделий заливка расплава CrM925 в форму проводилась при избыточном давлении (+3 бар) в литейной вакуумной индукционной машине Indutherm VC600. С помощью встроенной термопары определялась температура расплава в зоне плавки. Заливка расплава CrM925 производилась при температуре 1010 °С, температура опоки составляла 550 °С. На рисунках 11 и 12 представлены полученные отливки кулонов.



Рис. 11. Кулон-1 из CrM925



Рис. 12. Кулон-2 с ЛПС из CrM925

Для улучшения заполнения полостей формы со сложной конфигурацией возможно применение коллектора. Количество креплений на восковом стояке остается прежним, при этом обеспечивается подвод металла в наиболее массивные узлы и области, где присутствует риск недолива, например, на вершине полусферы с логотипом для кулона-2.

Для заливки латуни M67/33 и получения итоговых изделий также использовалась индукционная вакуумная литейная машина Indutherm VC600. Плавка проводилась в защитной среде аргона, что обеспечило защиту расплава от окисления. Заливка осуществлялась при избыточном давлении (+3 бар). Температура формы при заливке также составляла 550°С, а температура расплава — 1030°С. Готовые отливки кулона с ЛПС из M67/33 представлены на рисунке 13 и 14.



Рис. 13. Кулон-1 с ЛПС из M67/33



Рис. 14. Кулон-2 с ЛПС из M67/33

Результаты эксперимента показали, что плавка CrM925 в вакууме, а M67/33 в защитной среде аргона и заливка обоих при избыточном давлении (+3 бар) являются оптимальными для изготовления ювелирных изделий, обеспечивая высокое качество

поверхности, механическую прочность и минимизацию дефектов отливок, таких как усадочная пористость и газовые включения.

На основании проведённых работ описаны этапы постобработки ювелирных отливок из сплавов CrMn925 и M67/33 для придания художественной привлекательности готовому изделию. Основные этапы и результаты постобработки представлены в виде схемы на рисунках 15 и 16 соответственно.

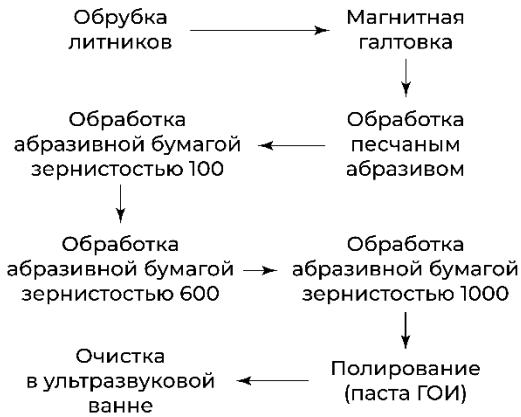


Рис. 15. Схема постобработки ювелирного изделия

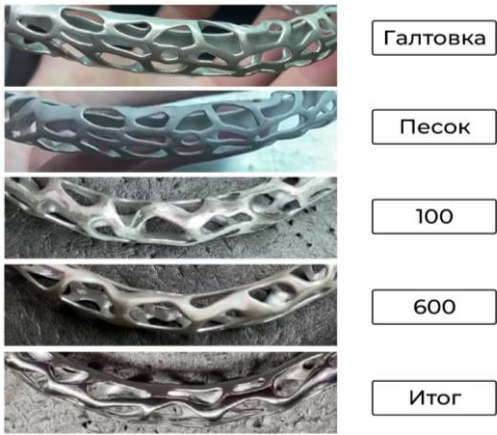


Рис. 16. Результаты постобработки бионического браслета

Этапы механической обработки кулонов 1 и 2 аналогичны. Сравнение отливок до механической обработки и готовых изделий представлены в таблице 7.

Таблица 7 — Результат механической обработки изделий из CrMn925 и M67/33

Отливка		Готовое изделие	
Кулон-1			
			
Кулон-2			
			
Браслет			
			

Проведен анализ возможностей и ограничений применения резиновых пресс-форм для серийного производства восковых моделей и создания по ним ювелирных отливок, продемонстрирована экономическая эффективность данного метода.

Основные выводы и результаты работы.

1. Установлены параметры подбора и их значения для применяемых аддитивных технологий, материалов литейных и мастер-моделей для повышения точности воспроизведения сложных геометрических форм и снижения образования дефектов поверхности при производстве ювелирных и художественных отливок. Функционал подбора и полученные данные реализованы в виде зарегистрированного справочно-рекомендательного программного обеспечения.

2. Определены ключевые параметры и условия оптимизации, необходимые для формообразования моделей ювелирных и художественных изделий. Доказана эффективность применения топологической оптимизации как технологии по проектированию конфигураций ювелирных и художественных изделий в результате снижения массы получаемых изделий при сохранении эксплуатационных характеристик. Сформирована матрица значений параметров по подбору алгоритма топологической оптимизации ювелирных и художественных изделий. Функционал подбора алгоритма оптимизации для последующего аддитивного и литейного производства реализован в разработанном и зарегистрированном программном обеспечении «TechOpt».

3. Установлены оптимальные пропорции формовочных материалов, обеспечивающие отсутствие геометрической деформации, пригара и пористости на поверхности отливок из сплавов CrM925 и M67/33 — составы, содержащие от 50% до 55% кристобалита, от 25% до 35% кварца, от 20% до 25% гипса, и содержание воды в смеси от 32 до 40 мл на 100 г сухой формомассы.

4. Предложен способ 3D-моделирования и печати восковых моделей с элементами литниково-питающей системы (ЛПС) для исключения риска повреждения моделей с бионическими структурами, текстовыми и декоративными рельефами при установке ЛПС, что позволило частично автоматизировать этап сборки воскового модельного блока и повысить выход годной продукции.

5. Установлено, что заливка литейных форм по модельному блоку объемом 5 и 25 см^3 сплавами CrM925 и M67/33 при избыточном давлении (до +3 бар) устраняет образование дефектов в виде недоливов и неслитин (0%) в сравнении с результатами, полученными гравитационной заливкой (6% и 14% для CrM925 , 0% и 6% для M67/33 , соответственно).

6. Проведено опытно-промышленное опробование методики: изготовлена партия опытных образцов — отливок трех конфигураций (два вида кулона и браслет) с применением топологической оптимизации — литьем по выплавляемым моделям из сплавов CrM925 и M67/33 .

7. Результаты диссертационной работы внедрены в деятельность предприятия высокоточного литья, полного цикла производства и обработки ООО «АВ-Металл»: методика изготовления и постобработки бионических художественных изделий по технологиям 3D-печати и литья по выплавляемым моделям; практические рекомендации по трехмерной печати моделей с элементами литниково-питающей системы и созданию пресс-форм для увеличения выхода годной продукции при изготовлении художественных отливок с топологически оптимизированной структурой; программное обеспечение «TechOpt» по подбору технологии изготовления и алгоритма топологической оптимизации художественных и ювелирных изделий.

Список опубликованных работ по теме диссертации.

Патенты и свидетельства регистрации программ для ЭВМ и БД:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661780 Российская Федерация. Справочно-рекомендательное программное обеспечение по подбору аддитивной технологии и материала при создании моделей для ювелирного и художественного литья : № 2020615894 : заявл. 11.06.2020 : опубл. 01.10.2020 / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024616416 Российская Федерация. Справочно-рекомендательное программное обеспечение по подбору алгоритма топологической оптимизации и аддитивной технологии для создания ювелирных и художественных изделий «TechOpt» : № 2024615337 : заявл. 14.03.2024 : опубл. 20.03.2024 / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК:

3. Реализация рекомендаций по изготовлению моделей для литья художественных и ювелирных изделий в справочном программном обеспечении / Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. // Дизайн. Материалы. Технология. 2020. № 3 (59). С. 41-46

4. О технологии изготовления моделей в ювелирном и художественном литье / Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. // Литейное производство. 2020. № 12. С. 30-34

5. Исследование состояния и перспектив биомимикрического подхода при создании художественных литых изделий с применением аддитивных технологий / Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. // Дизайн. Материалы. Технология. 2021. № 2 (62). С. 112-119

6. Анализ направлений постобработки художественных изделий при топологической оптимизации в специализированном программном обеспечении / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева // Дизайн. Материалы. Технология. – 2022. – № 1(65). – С. 169-175

7. Реализация прототипа бионического светильника с применением технологии топологической оптимизации / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева // Дизайн. Материалы. Технология. – 2023. – № 1(69). – С. 89-95

8. Разработка справочно-рекомендательного приложения по топологической оптимизации художественных изделий / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева // Литейное производство. – 2023. – № 4. – С. 33-36

9. Применение топологической оптимизации для разработки ювелирных изделий на примере создания бионического кулона / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева // Дизайн. Материалы. Технология. – 2024. – № 1(73). – С. 171-176

Статьи, опубликованные в сборниках научных трудов:

10. Выбор материала для трехмерной печати моделей в ювелирном и художественном литье / Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. // В сборнике: Прогрессивные литейные технологии. Труды X Международной научно-технической конференции. Москва, 2020. С. 404-408

11. Разработка рекомендаций по подбору аддитивной технологии и материала модели для литья художественных и ювелирных изделий / Л. П. Ивлева, А. Д. Битюцкий // Наука и образование в области технической эстетики, дизайна и технологии художественной обработки материалов : материалы XII международной научно-практической конференции вузов России, Санкт-Петербург, 20–25 апреля 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2020. – С. 198-205

12. Преимущества применения аддитивных технологий над фрезерованием при создании моделей для литья художественных и ювелирных изделий / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева // Инновационные технологии в электронике и приборостроении : сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием Физико-технологического института РТУ МИРЭА, Москва, 16–17 апреля 2020 года. Том 2. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2020. – С. 405-407

13. Биомимикрия: возможность применения аддитивных технологий при создании моделей для художественного литья / Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. // В сборнике: Инновационные технологии в электронике и приборостроении. Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием. Москва, 2021. С. 419-424

14. Топологическая оптимизация как технология создания бионических художественных изделий / Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. // Технология художественной обработки материалов. Материалы конференции: XXV Всероссийская научно-практическая конференция (27-29 октября). – Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО «СПбГУПТД», 2022. С. 352-359

15. Перспективы развития топологической оптимизации как средства создания ювелирных и художественных изделий / Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. // Сборник докладов конференции «Перспективные материалы и технологии» («ПМТ - 2022») – М.: РТУ МИРЭА, 2022. – С. 439-445

16. Разработка справочно-рекомендательного приложения по топологической оптимизации художественных изделий / Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. // ПРОГРЕССИВНЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.: ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ Под редакцией проф. В.Д. Белова и доц. А.В. Колтыгина — М.: МИСиС, 2022. — С. 459-465

17. Применение топологической оптимизации как технологии создания художественных изделий / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. Том 2. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – С. 168

18. Алгоритм проведения топологической оптимизации художественных изделий / Л. П. Ивлева, А. Д. Битюцкий // Наука и образование в области технической эстетики, дизайна и технологии художественной обработки материалов : материалы XV международной научно-практической конференции вузов России, Санкт-Петербург, 17–22 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – С. 11

19. Применение топологической оптимизации для разработки ювелирных изделий на примере создания бионического кулона / Л. П. Ивлева, А. Д. Битюцкий // Технология художественной обработки материалов : Материалы XXVI Всероссийской научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 2024. – С. 128-135

20. Программная, механическая и ручная постобработка топологически оптимизированных моделей и отливок ювелирных изделий / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева // Национальная научно-техническая конференция с международным участием. Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2024) : Сборник докладов конференции Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА, Москва, 12–16 апреля 2024 года. – Москва: МИРЭА – Российский технологический университет, 2024. – С. 554-558

21. Разработка моделей топологически оптимизированных ювелирных изделий и их 3D-печать с литниками для последующего получения качественной отливки / Л. П. Ивлева, А. Д. Битюцкий // Наука и образование в области технической эстетики, дизайна и технологии художественной обработки материалов : материалы XVI международной научно-практической конференции вузов России, Санкт-Петербург, 15–20 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2024. – С. 10