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

На правах рукописи

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»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Кандидат технических наук
Ивлева Лидия Петровна

Москва - 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1 Аналитический обзор научных публикаций в исследуемой области 12
1.1 Применение литья по выплавляемым моделям для изготовления ювелирных и художественных изделий 11
1.1.1 Актуальное состояние, преимущества и недостатки ЛВМ 11
1.1.2 Вакуумная индукционная плавка 16
1.1.3 Жидкотекучесть сплава и литниково-питающие системы (ЛПС) 17
1.1.4 Образование пригара 25
1.1.5 Формовочные материалы 29
1.2 Актуальное состояние и перспективы развития аддитивного производства 31
1.3 Топологическая оптимизация, бионический и генеративный дизайн 38
1.4 Применение программного обеспечения для проектирования изделий, топологической оптимизации и симуляции литейных процессов 41
1.5 Оценка качества, эстетической функции и художественной привлекательности изделий 45
1.6 Выводы по литературному обзору 48
2 Материалы и методы исследования 51
2.1 Формирование технического задания на изготовление изделий 51
2.2 Методика проектирования литейных моделей 53
2.3 Методика 3D-печати литейных моделей 57
2.4 Методика изготовления и прокаливания литейных форм 59
2.5 Оборудование и методика для приготовления и заливки расплава 61
3 Проектирование и топологическая оптимизация конфигураций ювелирных и художественных изделий 65
3.1 Применение топологической оптимизации для проектирования конфигураций ювелирных и художественных изделий 65
3.2 Разработка правил постобработки поверхности и формы ювелирных и художественных изделий при топологической оптимизации 66
3.3 Формирование алгоритмов топологической оптимизации ювелирных и художественных изделий 71
3.4 Разработка программного обеспечения по подбору алгоритма топологической оптимизации ювелирных и художественных изделий для последующего аддитивного и литейного производства 80
3.4.1 Описание программы 80
3.4.2 Параметры и принцип подбора алгоритма оптимизации 83
3.4.3 Перспективы расширения функционала приложения 86
4 Разработка методики подбора аддитивной технологии и материала изготовления литейных моделей ювелирных и художественных изделий 88
4.1 Разработка принципов классифицирования моделей ювелирных и художественных изделий для цифровизации литейного производства 88
4.2 Определение параметров подбора аддитивной технологии и материала изготовления литейной модели 90
4.3 Систематизация рекомендаций по подбору аддитивной технологии и материала литейной модели в специализированном программном обеспечении 95
5 Разработка рекомендаций по изготовлению ювелирных и художественных изделий

с применением топологической оптимизации методом литья по выплавляемым моделям 98
5.1.1 Исследование проектирования литниково-питающих систем и описание закономерностей их реализации для топологически оптимизированных моделей 98
5.1.2 Исследование толщины сечения питателей для создания литниковой системы при реализации бионических моделей 104
5.2 Анализ формовочных материалов и приготовления формомассы 108
5.3 Приготовление сплавов СрМ925 и М67/33 117
5.4 Анализ способов заливки расплава и выбивки литейной формы 122
5.5 Исследование этапов механической обработки топологически оптимизированных отливок 131
5.6 Проведение оценки выхода годного при механической обработке топологически оптимизированных отливок из сплава СрМ925 136
5.7 Анализ применения пресс-форм для тиражирования восковых моделей 139
ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ 142
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ 144
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ 159
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ 160
ПРИЛОЖЕНИЕ В. СВИДЕТЕЛЬСТВА НА ПРОГРАММЫ 161
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ 163
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. АКТ О ВНЕДРЕНИИ 164
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. АКТ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ОПРОБОВАНИЯ 165

ВВЕДЕНИЕ

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, исключающие 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 изготовляемой 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 СрМ925 и М67/33 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 СрМ925 и М67/33;

4. Провести опытно-промышленное опробование по изготовлению образцов изделий из сплавов СрМ925 и М67/33 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 СрМ925 и М67/33 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 сложногеометрических полостей литейной формы;

3. Установлены оптимальные пропорции формовочных материалов, обеспечивающие отсутствие геометрической деформации, пригара и пористости на поверхности отливок из сплавов СрМ925 и М67/33 — 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 СрМ925 и М67/33 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 СрМ925 и М67/33 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»

Продолжение таблицы 1.

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	XI Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные литейные технологии», г. Москва, 2022 г.	«Разработка справочно-рекомендательного приложения по топологической оптимизации художественных изделий»
6	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»
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»

Продолжение таблицы 1.

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:

1. 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
2. О технологии изготовления моделей в ювелирном и художественном литье / Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. // Литейное производство. 2020. № 12. С. 30-34
3. 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
4. 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
5. Реализация прототипа бионического светильника с применением технологии топологической оптимизации / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева // Дизайн. Материалы. Технология. – 2023. – № 1(69). – С. 89-95

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

7. 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

8. 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

9. 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

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 ГОСТов. 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.

1 Аналитический обзор научных публикаций в исследуемой области

1.1 Применение литья по выплавляемым моделям для изготовления ювелирных и художественных изделий

Перечень тематик научных публикаций, отобранных для проведения литературного обзора: прецизионное литье, изготовление ювелирных и художественных изделий, топологическая оптимизация в литейном производстве, генеративный дизайн художественных изделий, биомимикрия, литейное производство, аддитивные технологии, бионические модели в аддитивном производстве, зависимость геометрии модели и способа 3D-печати, дизайн и проектирование художественных изделий, применение трёхмерной печати при производстве моделей для литья по выплавляемым моделям, использование современных программных средств в процессе подготовки восковых моделей к литью, аддитивные технологии высокого разрешения в художественном литье, развитие технологий быстрого прототипирования в ювелирной промышленности [1-110].

1.1.1 Актуальное состояние, преимущества и недостатки ЛВМ

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) является одной из ключевых технологий для производства высокоточных ювелирных и художественных отливок. Преимущество метода характеризуется изготовлением высокоточных отливок сложной конфигурации с высоким качеством поверхности (низкая шероховатость: R_z = 40…10 мкм), что позволяет сократить временные затраты на механообработку (припуск на механическую обработку для художественных изделий составляет менее 0,2 мм при использовании восковых моделей) и активно используется для изготовления высококачественных изделий из драгоценных металлов. Актуальное состояние данного метода в значительной степени обусловлено развитием аддитивных технологий, модернизацией материалов для создания литейных моделей, совершенствованием оборудования и возможностью автоматизации технологического процесса [2-5, 8, 10].

Среди основных проблем ЛВМ выделяют высокую стоимость и длительность процесса подготовки восковых моделей. Демонстрируется проблема деформации линейных размеров и форм восковых моделей, изготовленных из определенных составов, что напрямую влияет на качество производимой отливки. Научные публикации указывают на необходимость разработки новых материалов, которые обеспечат лучшую стабильность размеров и форм, сократят зависимость восковых моделей от изменений температуры при

их хранении, а также на совершенствование технологий аддитивного производства с приоритетом на оборудование отечественных разработчиков для ускорения и удешевления процесса подготовки литейных моделей [5-7, 11].

Другой важной проблемой является контроль качества и точности отливок, получаемых по выжигаемым моделям. Традиционные методы контроля не всегда обеспечивают необходимую точность и требуют больших временных затрат на подбор формомассы, режима прокалки и конечное изготовление качественной партии высокоточных отливок. Ключевым ограничением выжигаемых моделей является их зольность, более высокие температуры и время удаления модели из формы на этапе прокалки. Для решения данной проблемы в зарубежных научных публикациях предлагается применение методов компьютерного зрения и цифровых двойников для мониторинга и контроля процессов прокалки и литья [7, 12].

Развитие литья по выжигаемым моделям сдерживается ограничениями в использовании экологически чистых и безопасных материалов. Фотополимерные модели содержат вредные вещества, образующие экологические проблемы при их утилизации. Отмечается, что экологичность и биоразлагаемость воска в сравнении с выжигаемым полимером делают литье по выплавляемым моделям более безопасным и менее трудоемким методом производства для сотрудников цеха.

Перспективным направлением исследований является изучение влияния различных примесей и легирующих элементов на свойства отливок. Путем экспериментов и моделирования определяют оптимальные составы сплавов, которые стремятся обеспечить повышение не только механических характеристик, но и художественной привлекательности отливок. Исследуются процессы окисления и патинирования, которые зачастую используются в художественном литье для создания уникальных цветовых эффектов и текстур [6, 9-12].

Аддитивные технологии также раскрыли новые возможности для литья по выплавляемым моделям топологически оптимизированных и бионических моделей. Данные методы проектирования позволяют существенно снизить вес изделий при сохранении их прочностных характеристик. Стоит отметить, что существует необходимость дальнейших исследований в области расчета и построения литниково-питающих систем для подобных литейных моделей, чтобы обеспечить стабильно высокое качество изготавливаемых отливок [15, 19].

Применяя для создания художественных и ювелирных украшений драгоценные металлы, стремятся к повышению выхода годного продукции, что является выполнимой

задачей за счёт применения современных программных продуктов, предоставляющих функции компьютерного моделирования и анализа.

В зарубежной литературе данный подход называется «цифровой поток» (digital thread) и внедряется производственными компаниями по причине сокращения длительности разработки и модификации технологического процесса в сравнении с традиционным способом — через пробы и ошибки, который зачастую упускает многие научно-теоретические обоснования [12].

В статье A. Vevers, A. Kromanis, E. Gerins, J. Ozolins «Сравнение аддитивного производства и литейных технологий: механические свойства, производительность и себестоимость» [1] изучены различия между изделиями, произведенными аддитивным способом и литьем. Целью эксперимента было определение возможных производственных областей для замещения литейного процесса на аддитивный, учитывая качество получаемого продукта.

Все эксперименты были проведены в соответствии с актуальными стандартами ISO. Согласно результатам, полученным авторами в ходе работы, химический состав и микроструктура изделий, полученных обоими способами практически идентична. При испытании на растяжение результаты обоих образцов также были аналогичны. Рассматривая параметры как твердость и гладкость поверхности, аддитивные технологии показали лучшие результаты, но наибольшая разница отражена при анализе времени и стоимости производства. Авторы отметили, что наибольшее время при литейном производстве затрачивается на создание оснастки, в то время как аддитивное производство времязатратно именно в процессе печати. Наибольшие финансовые затраты в литье характеризуются подготовкой оснастки, что накладывает значительные ограничения на производство малых партий продукции, в то время как цена на аддитивное производство фиксирована и не зависит от объемов производства.

Согласно авторам, аддитивное производства может заменить литье во многих областях по причине схожих механических свойств, однако цена и время производства больших партий менее выгодна по причине длительного процесса печати и необходимости больших первоначальных инвестиций в рабочее оборудование. Аддитивные технологии находят свое применение в областях, где требуется оригинальный дизайн в дополнение к высоким прочностным характеристикам и особым технологическим свойствам [1].

Из публикации Равочкина А.С., Чибирновой Ю.В., Петушковой А.В. «Получение отливок с топологической оптимизацией конструкции методом литья по выплавляемым моделям» [13] можно выделить возможности использования гибридных технологий и новых материалов для получения отливок сложной оптимизированной геометрии. За

пример взята конструкция авиационного кронштейна. Оптимизация конструкции была проведена с использованием системы автоматизированного проектирования Autodesk Inventor Professional. В результате была получена сеточная модель проектируемой конструкции, представленная на рисунке 1.

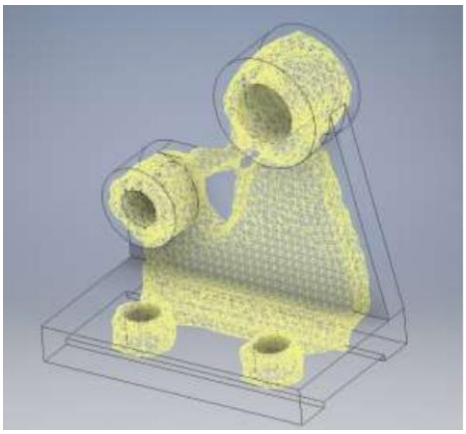


Рис. 1. Сеточная модель кронштейна [13, с. 4]

Авторами указывается, что для данной детали также был проведен анализ напряженного состояния при аналогичных исходных данных, что и для первичной детали, где по результатам оптимизации детали «Кронштейн» исходная масса уменьшилась с 1063 до 752 грамм. Также был описан этап формовки полученной детали [13].

Новые направления проектирования изделий являются актуальным направлением для исследования. Когда речь идет о промышленном применении новых подходов к созданию конструкций и деталей, необходимо удостовериться в ряде характеристик, которые позволят гарантировать безопасное применение данных изделий при работе и эксплуатации.

В работе Урвачева В.П., Кочеткова В.В. и Гориной Н.Б. «Ювелирное и художественное литье по выплавляемым моделям сплавов меди» [26] подчеркивается значение отделки ювелирных и художественных изделий для улучшения их декоративных свойств, коррозионной стойкости и долговечности. Для достижения высокого качества поверхности отливок, особенно при литье сплавов меди в керамические формы, рекомендуется использование принудительной заливки, что позволяет снизить температуру расплава и форм, а также улучшить точность воспроизведения рисунка. Важное значение придается конструкции изделия и литниково-питающей системы, где использование моделей с равномерной толщиной и дополнительными питателями способствует улучшению качества поверхности. Отмечается также важность применения тонкодисперсных формовочных материалов, что позволяет достичь высокого класса

шероховатости отливок. Однако при несоблюдении водомассового соотношения или недостаточной вакуумной обработке формовочной массы возможно ухудшение качества поверхности из-за образования корольков и пригара [26].

В книге Карпенко В.М. и Маруковича Е.И. «Художественное литье: материалы, технологии, оборудование» [15] демонстрируются результаты богатого практического опыта работы по изготовлению художественных изделий из сплавов на основе меди и драгоценных металлов. Детально описываются технологии изготовления ювелирных и художественных отливок в разовых песчано-глинистых формах, по выплавляемым моделям, в керамические формы, в резиновые и металлические формы (кокиль). Подробно описаны режимы плавки серого и высокопрочного чугунов, бронзы, латуни, медно-никелевых сплавов, сплавов на основе драгоценных металлов различных марок.

Рассматриваются способы приготовления формовочных смесей под различные виды моделей, учитывая как материал, так и их геометрию. Представлены виды и особенности литниково-питающих систем, их проектирование и расчет под поставленную задачу. В заключительной главе уделено внимание очистке и отделке художественных отливок, где описываются такие этапы механической обработки как крацевание, шлифование, галтовка, полирование, пескоструйная обработка, чеканка [15].

В работе Жуковой Л.Т. «Технология художественного литья» [14] тезисно изложены технологические процессы получения ювелирных и художественных отливок в песчано-глинистые, виксинтовые, гипсокаменные, гипсокристобалитовые формы. Приводятся примеры изготовления различных ювелирных изделий (монолитных и сборных), скульптур и элементов декора. Исследуется влияние состава сплава и режима литья на свойства отливок, где особое внимание уделено рассмотрению влияния температуры перегрева и состава сплава на его жидкотекучесть для дальнейшего применения в художественном литье. Также проводится анализ влияния теплофизических свойств формомасс на скорость затвердевания и шероховатость поверхности отливок [14].

В книге Халилова И.Х. и Халилова М.И. «Ювелирное литье» [47] уделяется ключевое внимание свойствам драгоценных металлов, их взаимодействию с газами и материалом формы, способам их аффинажа. Представлены основные технологии изготовления восковых моделей, резиновых пресс-форм, технологические циклы получения литейных форм и отжига формомасс. Демонстрируются плавильные установки, вакуумные литейные машины, центробежные литейные установки и разновидности тиглей. В заключительной главе разбирается способ литья с драгоценными камнями, способы их закрепки, химическая и механическая обработка полученных отливок [47].

В работе Груздевой И.А. «Проектирование и изготовление ювелирных изделий» [48] приводится классификация ювелирных изделий и их разработка через компьютерное моделирование, изготовление восковой модели и гипсовой литейной формы по ней. Представлены режимы прокаливания формы и плавки драгоценных металлов. Отличительной чертой работы является описание контроля изделий в отделе технического контроля (ОТК) [48].

В литературе, посвященной вопросам художественного и ювелирного литья, мало внимания уделено применению современных аддитивных технологий, в публикациях в основном освещаются технологические аспекты, касающиеся изготовления моделей, их формовки, заливки металла и последующей обработки. В большинстве публикаций подробно описывается практическая часть, однако информационные и аддитивные технологии освещаются поверхностно и, как правило, актуальность излагаемых материалов по данной тематике оспорима.

На основании данного раздела литературного обзора можно сделать вывод, что высоким потенциалом обладают гибридные технологии, которые представляют из себя совмещение аддитивных технологий и литейного производства для получения различных изделий, деталей, конструкций. Отливки со сложной конфигурацией преимущественно получают литьем по выплавляемым моделям [1-2, 4-8, 10, 12-19].

Проведение обзора литературных источников также показало актуальность исследования получения бионических, топологически оптимизированных отливок как нового технологического подхода к созданию ювелирных и художественных изделий с комплексной конфигурацией в рамках литейного производства [13-17, 47].

1.1.2 Вакуумная индукционная плавка

Вакуумная плавка представляет собой безокислительный нагрев металлов и сплавов, обеспечивающий высокую степень их очистки от газов и вредных неметаллических включений. Данный вид плавки применяется для борьбы с газовой пористостью в отливках.

Например, в условиях плавки благородных металлов на открытом воздухе труднодостижимо получение точного состава сплава с малыми допусками по легирующим элементам. Наиболее эффективным способом защиты расплава от взаимодействия с воздухом и газами является плавка в вакуумной среде. Низкий вакуум — 0,1…13 Па, нормальный вакуум — 10^{-3} до 10^{-1} Па, глубокий вакуум — 10^{-5} до 10^{-3} Па, сверхглубокий вакуум имеет значение $<10^{-5}$ Па. Вакуум характеризуется остаточным давлением, которое определяется наличием остаточных газов в системе [16, 46, 54].

Вакуумные тигельные индукционные печи позволяют выплавлять практически все сплавы на основе цветных и благородных металлов. Из ключевых преимуществ данных печей на производстве отмечают следующие: высокая производительность (возможность интенсивной плавки, выраженная удельной мощностью печи), интенсивная циркуляция расплавленного металла в тигле (выравнивание температуры и химического состава сплава), простота перехода между выплавками сплавов разных марок, удобство обслуживания и управления печью [14, 16, 55].

Однако низкая температура металла на поверхности жидкой ванны ограничивает возможность обработки сплавов при индукционной плавке.

Вакуумная плавка в художественном литье целесообразна для сплавов на основе благородных металлов из-за высокой стоимости и сложности процесса. В вакуумных литейных установках также предусмотрена возможность плавки в атмосфере инертных и контролируемых газов.

1.1.3 Жидкотекучесть сплава и литниково-питающие системы (ЛПС)

Литейные (технологические) свойства определяют с помощью специальных проб или компьютерного моделирования. Значения литейных свойств сплава зависят от методики определения. В рамках художественного литья наибольший интерес представляют жидкотекучесть, линейная и объемная усадки сплава [16, 54, 19].

Жидкотекучесть отражает способность сплава заполнять литейную форму, что является одним из ключевых факторов для получения качественных отливок. Жидкотекучесть сплава определяют по заполнению канала специальной пробы (спиральной, U-образной и прочих).

Теплофизические характеристики сплава и материала литейной формы являются ключевыми при определении жидкотекучести. Температура заливаемого расплава и напор имеют решающее значение при определении жидкотекучести, которая необходима для точного расчета литниково-питающих систем.

Увеличение температуры заливки и напора позволяет обеспечить заполнение расплавом канала любой длины, тем самым повышая жидкотекучесть любого сплава. Условная жидкотекучесть определяется при проведении заливки всех сплавов при одинаковой температуре, но с различным перегревом [16, 47].

На основании многочисленных исследований установлено, что наибольшая жидкотекучесть характерна для чистых металлов и эвтектических сплавов (отсутствует

интервал кристаллизации). С увеличением интервала кристаллизации жидкотекучесть сплава снижается.

Способность сплавов заполнять тонкие каналы и воспроизводить рельеф на поверхности формы определяют клиновой или шариковой пробами — расплав протекает в узком клинообразном канале или в полости между шаром и плоской стенкой.

Линейную усадку учитывают при изготовлении фасонных отливок при помощи увеличения размеров литейных моделей и форм на величину линейной усадки сплава. Объемная усадка зависит от скорости и температуры заливки, материала формы, газонасыщенности расплава, размера кристаллов, что влияет на объем усадочных раковин и пор. Направленное затвердевание в художественном литье стремятся организовать так, чтобы оно протекало по всему объему отливки и завершалось в стояке или прибыли, где будет сконцентрирована вся объемная усадка.

Для получения сложногеометрических фасонных отливок проектируется специальная литниково-питающая система, которая должна обеспечивать надежное заполнение всей полости формы расплавом, задерживать шлак и неметаллические включения, имеющиеся в заливаемом расплаве, предотвращать образование и захват новых включений и газов при заливке, а также создавать оптимальные условия для затвердевания отливки. Стоит учитывать, изменение локальных условий теплоотвода и интенсивность затвердевания отдельных участков отливки из-за различного нагрева их заливаемым расплавом, что характеризуется образованием усадочных раковин, пористости и трещин. Для получения качественной отливки стремятся к оптимальному времени заполнения формы [15, 16, 19].

Течение жидкости может быть ламинарным и турбулентным. При ламинарном характере отдельные струи текут, не перемешиваясь. При турбулентном течении струи произвольным образом перемешиваются, частицы жидкости движутся не только вдоль, но и поперек общего потока. Характер течения жидкости определяется взаимодействием сил инерции и сил вязкости. Преобладание сил вязкости приводит к ламинарному движению. При усилении влияния инерционных сил течение становится турбулентным [16].

Очевидно, что характер течения должен зависеть от вязкости жидкости, линейной скорости движения и размера сечения канала, как элемента, воспринимающего силы трения. Эта связь выражается безразмерным критерием (числом) Рейнольдса:

$$Re = 4R_{\text{гидр}}v/\upsilon, \qquad (1.1)$$

где v — линейная скорость потока, υ — кинематическая вязкость жидкости, $R_{\text{гидр}}$ — гидравлический радиус канала, равный отношению площади поперечного сечения потока к смоченному периметру сечения канала [16].

Например, если канал имеет прямоугольную форму в поперечном сечении с размерами a и b и целиком заполнен потоком, то площадь $F = ab$, периметр, смоченный жидкостью, $P = 2(a+b)$, $R_{гидр} = F/P = ab/2\ (a+b)$. Для канала квадратного сечения $a = b$, $R_{гидр} = a/4$. Для цилиндрического канала диаметром d, $R_{гидр} = (\pi d^2/4)/(\pi d) = d/4$.

Для металлических расплавов не установлены критические значения числа Рейнольдса, при которых происходит переход от ламинарного к турбулентному течению. Практика показывает, что в производственных условиях течение металлических расплавов почти всегда имеет турбулентный характер [16].

С учетом особенностей течения расплава ЛПС должна обеспечивать заполнение формы металлом за наименьшее время, минимизировать количество неметаллических и газовых включений в расплаве, создавать оптимальный режим затвердевания и охлаждения отливок, иметь небольшую массу, а также обеспечивать удобство формовки и её демонтажа.

При проектировании ЛПС важно правильно выбрать место подвода питателей к отливке. При одновременном затвердевании всех частей отливки металл следует подводить к её тонким сечениям, а при направленном затвердевании — к толстым. При подводе к тонким стенкам необходимо учитывать риск её возможного повреждения при демонтаже ЛПС [19, 45, 46].

Для расчета ЛПС используют различные зависимости, основанные на законах гидравлики и эмпирические формулы, которые сводятся к определению суммарной площади поперечных сечений питателей. Например, по формуле Озана-Диттера [19]:

$$\Sigma F_{пит} = \frac{Q}{\rho t v} = \frac{Q}{\rho t \mu \sqrt{2gH_p}}, \quad (1.2)$$

где Q — масса всех отливок в форме, включая прибыли;

ρ — плотность жидкого металла;

t — продолжительность заливки формы;

v — скорость истечения металла;

μ — коэффициент расхода металла, $0 < \mu < 1$;

g — ускорение свободного падения;

H_p — расчетный статический расчет.

Время заполнения формы Т можно рассчитать по формуле:

$$T = A\delta^m Q^n, \quad (1.3)$$

где δ - преобладающая толщина стенки отливки (мм);

A, m, n — коэффициенты (справочные значения, например из Дитерта Г., Дубицкого Г.М.) [11, 12]

Время заливки рассчитывают по формуле:

$$\tau = A\sqrt[3]{\delta Q} \quad (1.4)$$

Коэффициент расхода μ отражает суммарные гидравлические потери, которые зависят главным образом от конструкции литниковой системы, её сложности, характера местных сопротивлений, числа поворотов и прочего. Коэффициент расхода μ верхних ЛПС больше, чем у нижних [19].

Напор H_p зависит от способа заливки, типа литниковой системы, положения отливки в форме и других факторов. Для определения напора (H_p) при заливке через литниковую чашу учитывается уровень металла в ней, а при заливке через воронку — уровень металла в ковше [15, 16, 19].

Для распространенного случая подвода металла по разъему формы H_p, напор можно рассчитать по формуле:

$$H_p = H_0 - \frac{P^2}{2C}, \quad (1.5)$$

где H_0 — первоначальный максимальный напор, см;

P — расстояние от самой верхней точки отливки до уровня подвода, см;

C — высота отливки (по положению при заливке).

При литье по выплавляемым моделям применяют 3 типа ЛПС. Для ювелирных и малогабаритных художественных изделий применяют, представленную на рисунке 2, литниково-питающую систему типа I — центральный стояк компактного сечения, к которому через питатели присоединяют модели [15, 16, 19]. Он выполняет роль литникового хода и прибыли. Центральное расположение стояка обуславливает его медленное затвердевание и способствует направленному затвердеванию отливок. Размеры и формы стояка представлены в ГОСТ 19551-74 [163].

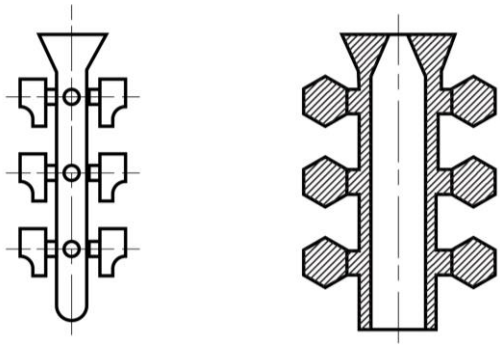


Рис. 2. Примеры ЛПС I типа

Для расчета размеров элементов ЛПС I типа используют методику, разработанную Хенкиным М.Л. Методика основана на выборе оптимальных соотношений приведенных толщин (модулей переохлаждения) питаемого массивного узла отливки и питающих элементов ЛПС [15, 19, 47], при которых соблюдается направленность затвердевания от отливки к питающему ее стояку и коллектору, т.е. при условии, что

$$\delta_{ст} > \delta_{п} > \delta_{о}, \quad (1.6)$$

где $\delta_{ст}$ — модуль охлаждения сечения стояка (отношение площади сечения стояка к его периметру);

$\delta_{п}$ — модуль охлаждения сечения питателя;

$\delta_{о}$ — модуль охлаждения отливки или его массивного узла.

Модуль охлаждения сечения питателя (отношение площади сечения питателя к его периметру) определяют по формуле

$$\delta_{п} = \frac{2 \cdot \sqrt[4]{\sigma_{о}^{3} \cdot G \cdot \sqrt[3]{l_{n}}}}{\delta_{ст}}, \quad (1.7)$$

где G — масса отливки, г;

l_n — длина питателя, мм;

$$\delta_{ст} = \frac{2 \cdot \sqrt[4]{\delta_{о}^{3} \cdot G \cdot \sqrt[3]{l_{n}}}}{\delta_{п}} \quad (1.8)$$

По массе отливки (из чертежа) определяют $\delta_{о}$ и выбирают значение l_n. В среднем при G < 0,5 кг l_n = 4…10 мм, при 0,5 < G < 1,5 кг, l_n = 8…12 мм.

Для расчетов приведенных толщин сечений питателя принято три характерных формы геометрии отливок: параллелепипед, шар, цилиндр.

Размеры сторон параллелепипеда, радиус шара, радиус основания цилиндра и их высоту рассчитывают по формулам из таблицы 2, исходя из их объемов:

Таблица 2 — Справочные формулы для расчетов [17]

Формула	Форма отливки		
	Параллелепипед	Шар	Цилиндр
Объем	$V = abc$	$V = \frac{4}{3}\pi R^3$	$V = \pi R^3 H$
Площадь	$S' = 2(ab + bc + ac)$	$S' = 4\pi R^2$	$S' = 2\pi RH + 2\pi R^2$

Сложные геометрические формы отливок требуют комплексного подхода для расчета приведенных толщин сечений питателя в литниково-питающей системе. Приведенные толщины для базовых геометрий, таких как параллелепипед, шар и цилиндр, могут быть адаптированы для сложных форм путем расчета на основе объема и охлаждающей поверхности каждой секции отливки.

Для сложных геометрий используется следующая формула, основанная на принципах, применяемых к простым формам:

$$M_c = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i}{S_i}, \quad (1.9)$$

где M_c — приведенная толщина для сложной формы;

V_i — объем i-ой секции сложной отливки;

S_i — эффективная площадь охлаждения i-ой секции.

Для каждой секции сложной формы отливки (разделенной на базовые геометрические фигуры) рассчитывается объем и эффективная площадь охлаждения. Такой подход позволяет учитывать особенности охлаждения и затвердевания различных частей сложной отливки, обеспечивая более точный расчет и предотвращая возможные дефекты, как усадочная раковина или ликвация.

Целью расчета литниковой системы является определение площадей поперечных сечений всех каналов системы. В первую очередь рассчитывается площадь поперечного сечения самого узкого участка системы: в сужающихся системах — суммарная площадь питателей, а в расширяющихся — площадь поперечного сечения стояка на стыке со шлакоуловителем [15, 16, 19, 54].

Площади поперечных сечений прочих каналов ЛПС находят из рекомендованных практикой соотношений [15, 16, 19, 54]:

– для сужающихся систем: $f_{ст}: f_{шл}: \Sigma f_{лит} = [(1{,}1 \ldots 1{,}2): (1{,}05 \ldots 1{,}1): 1]$,

– для расширяющихся систем: $f_{ст}: f_{шл}: \Sigma f_{лит} = [(1: (2 \ldots 4): (3 \ldots 5)]$.

Объемный расход должен быть обеспечен литниковой системой, имеющей коэффициент расхода μ, расчетный напор $\mathrm{H}_{\text{расч}}$, т.е.:

$$q = f_{\text{мин}}\mu\sqrt{2g\mathrm{H}_{\text{расч}}} \text{ или } M/\rho\tau = f_{\text{мин}}\mu\sqrt{2g\mathrm{H}_{\text{расч}}} \quad (1.10)$$

Отсюда:

$$f_{\text{мин}} = M/\rho\tau\mu\sqrt{2g\mathrm{H}_{\text{расч}}} \quad (1.11)$$

В этой формуле известны масса расплава M, его плотность ρ и ускорение свободного падения g. Принимают $\mu = 0{,}3\ldots0{,}6$ [16].

Чем более сложна будущая литниковая система, тем меньше должен быть коэффициент расхода. Расчетный напор точно известен и постоянен при верхнем подводе расплава: $H_{\text{рас}} = H_0$.

При нижнем подводе для его определения рекомендуется формула:

$$H_{\text{рас}} = H_0 - H_{\text{отл}}/2, \quad (1.12)$$

при боковом подводе:

$$H_{\text{рас}} = H_0 - H_B^2/2H_{\text{отл}}. \quad (1.13)$$

На основе расчетных данных проектируется литниковая система, для которой задаются конкретные линейные размеры каналов, их взаимное расположение и количество. Целесообразно провести проверочный расчет, который позволяет определить фактическое время заполнения формы и сравнить его с расчетным временем, определенным по эмпирическим формулам. Допустимы отклонения в 20-30%.

Общий принцип разработки литниково-питающей системы при ювелирном литье заключается в том, что стояк должен весить больше, чем все элементы (модели и питатели), которые прикреплены к нему. Основная задача заключается в том, чтобы расплав затвердел в полостях изделий и питателей раньше, чем в стояке, в котором будет происходить основное образование усадочных дефектов.

При выполнении данной задачи значительно сокращается риск получения дефектов в виде недолива, усадки, утяжин в отливке, так как все эти дефекты будут проявляться именно в стояке, который после отделения питателей отправляют в переплав вместе с остальным частями литниково-питающей системы. В случаях недостаточного питания отливки расплавом проявляется усадочная пористость в самом изделии [17, 19, 20].

Литниково-питающую систему проектируют также с целью наименьшего расхода материала на неё, так неоправданно большие (по диаметру сечения) питатели приводят к дополнительному расходу металла и возможному появлению пористости в зоне контакта с

изделием. В таблице 3 представлены основные виды геометрических тел будущей отливки и формулы для расчёта толщины элемента и его сечения.

Таблица 3 — Толщина элементов отливки и литниково-питающей системы [17, с. 56]

Конструктивный элемент				Приведенная толщина	
Вид	Толщина	Ширина	Длина	элемента по R = V/S	сечения по R = F/P
Пластина	*a*	-	-	*a*/2	*a*/2
Брус прямоуг. сечения	*a*	*b*	*l*	*abl*/ [2 (*ab*+*bl*+*al*)]	*ab* / [2 (*a*+*b*)]
Брус квадратного сечения	*a*	*a*	*l*	*al*/ [2(*a*+2*l*)	*a*/4
Цилиндр	*d*	*d*	*l*	*dl*/ [2(d+2*l*)	*d*/4
Сфера	*d*	*d*	*d*	*d* / 6	-
Куб	*a*	*a*	*a*	*a* / 6	-
Труба тонкостенная	*a*	-	*l*	*al* [2 (a+l)]	*a*/2

Стандартные литниково-питающие системы обладают прибылями, выпорами и прочими конструктивными элементами, необходимыми для получения отливок промышленного назначения. В таблице 4 представлены формулы расчета размеров ЛПС.

Таблица 4 — Формулы для расчета размеров ЛПС [17, с. 59]

Конструктивный элемент	Характерный размер	Расчетные формулы для узла	
		компактного	протяженного
Отливка, массивные узлы	Диаметр сферы $D_у$, вписанной в тепловой узел	Определяют по чертежу отливки	
Шейка прибыли	Толщина (диаметр) $a_ш$	$a_ш = (1 … 1,2)\ D_у$	
	Ширина $b_ш$	$b_ш = a_ш$	$b_ш = (3 … 4)\ D_у$
	Высота $h_ш$	$h_ш = (0,4 … 0,5)\ D_у$	
Прибыль	Толщина нижнего основания $a_п$	$a_п = k_1\ D_у$	
	Ширина нижнего основания $b_п$	$b_п = a_п$	$b_п = b_ш + (k_1 - 1)D_у$
	Угол конусности α	α = 10 … 15°	
	Высота закрытой приб.$h_п$	$h_п = (2,5 … 3)\ D_у$	
	Высота открытой приб.$h_п'$	$h_п' = (3 … 3,5)\ D_у$	
	Радиус действия прибыли	$r_д = k_3\ D_у$	
	Наименьшее расстояние между шейками приб. $l_п$	$l_п \leq 2\ r_д$	

Продолжение таблицы 4.

Выпор	Диаметр $d_{вып}$	$d_{вып} = (0{,}2 \ldots 0{,}3)a_п$	
Питатель	Толщина (диаметр) $a_{пит}$	$a_{пит} = (1 \ldots 1{,}2)\ D_y'$	
	Ширина $b_{пит}$	$b_{пит} = a_{пит}$	$b_{пит} = (3 \ldots 4)\ D_y'$
	Длина $l_{пит}$	$l_{пит} = 6 \ldots 8$ мм	
Литниковый ход	Ширина сечения b_x	$b_x = k_1\ D_y'$	
	Высота сечения h_x	$h_x = b_x$	
Стояк	Диаметр d_c	$d_c = k_2\ b_x$	

Для успешной работы ЛПС недопустимо вытекание расплава из литников с излишне малой линейной скоростью, так как такой поток может перемерзнуть. При получении ответственных художественных отливок вытекание расплава не должно подвергаться неконтролируемому наклону литейной формы, изменению шероховатости рабочей поверхности каналов, что может вызвать усиление течения расплава через одни литники и ослабление или отсутствие течения через другие.

При изготовлении отливок из латуни стремятся создавать расширяющиеся литниковые системы. При сужающихся литниковых системах, рекомендованных для сплавов, не подверженных образованию усадочных раковин, расплав подводят в тонкие сечения отливки, стремясь выровнять последующее затвердевание в тонких и толстых сечениях [15, 16, 54].

1.1.4 Образование пригара

Пригар — слой материала формы, который не отделяется от поверхности отливки при выбивке одноразовой формы и требует трудоемкой механической обработки. Под воздействием тепла отливки и взаимодействия с оксидами металла материал формы спекается, что может привести к появлению пор. Спекание сопровождается образованием жидкой фазы, препятствующей проникновению металла в поры формы. Степень спекания частиц формовочной смеси зависит от площади контакта частиц, которая обратно пропорциональна их размеру [15, 16, 18, 53].

Формовочные смеси с высокой теплопроводностью и теплоаккумулирующей способностью увеличивают скорость и глубину прогрева формы. В элементах литниковой системы (стояках, питателях, прибылях) они могут способствовать образованию усиленного пригара. При отсутствии дополнительного подвода тепла такие формовочные смеси забирают тепло у жидкого металла, что способствует образованию твердой корки на поверхности отливки и снижению пригара [18, 52].

Химическое взаимодействие между частицами смеси с укрупнением частиц уменьшается и облегчается проникновение металла в поры формы, что влияет на величину пригарного слоя (рисунок 3).

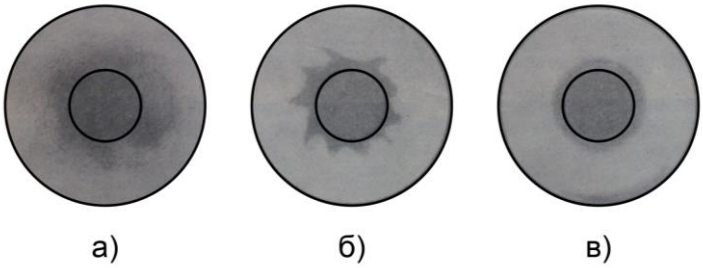


Рис. 3. Влияние размера частиц электрокорунда зернистостью 0,05 мм (а); 0,12 мм (б); 0,6-0,8 мм (в) на величину пригарного слоя [18]

С целью сокращения выдержки отливки в форме для получения легкоотделимого пригара в формовочную смесь иногда можно добавлять вещества, диссоциирующие при нагревании с выделением кислорода. По классификации Куманина И.Б. пригар можно разделить на термический, механический и химический [16].

Термический пригар: слабая связь с отливкой, легко удаляется с поверхности; результат оплавления материала формы глубиной до 10 мм. Необходимо соблюдение требований к огнеупорности материалов формовочной смеси.

Механический пригар: проникновение расплава в промежутки между зернами формовочного материала. Он характерен для отливок из форм крупнозерновых формомасс.

Химический пригар: окисление расплава на поверхности формы и физико-химическое взаимодействие расплава с формой. Снижение краевого угла смачивания приводит к интенсивному смачиванию зерен формовочной смеси расплавом и его проникновению в стенки формы [16, 18, 53].

Взаимодействие расплава с материалом формы снижает чистоту поверхности отливки и изменяет физико-механические свойства поверхностного слоя. Рекомендуется выбирать материал формы с температурой плавления, превышающей температуру заливаемого металла на 150 °С и более, и низкой химической активностью, что позволяет предотвратить оплавление формы и уменьшить химическое взаимодействие с расплавом [15, 16, 18].

Зерна формовочных материалов, как правило, не шарообразной формы и имеют неровную поверхность с впадинами и выступами, что приводит к увеличению общей

поверхности. С увеличением поверхности за счет изменения формы частиц уменьшается площадь их контакта при соприкосновении острыми гранями.

На рисунке 4 представлены две соприкасающиеся частицы радиуса r, в результате диффузии между ними происходит обмен массой. При определенной температуре образуется шейка между двумя частицами. Радиус шейки — x, радиус кривизны шейки — ρ [18]. В результате искривления поверхности возникает давление Лапласа, действующее в плоскости шейки:

$$\Delta p = \sigma(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{x}) \quad (1.14)$$

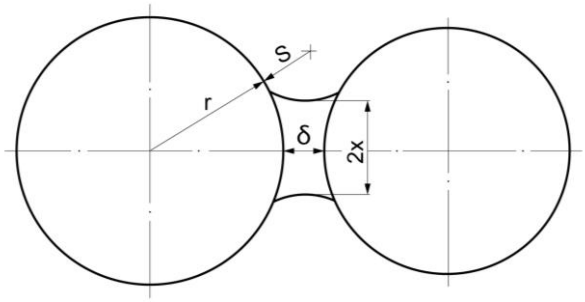


Рис. 4. Схема образования шейки между двумя частицами при спекании [18]

Уменьшение радиуса кривизны шейки ρ вызывает увеличение давления пара, конденсацию вещества во впадинах ($\rho > 0$) и испарение на выступах ($\rho < 0$). В результате размер частиц будет уменьшаться, а зона спекания увеличиваться.

Благодаря действию высоких температур и примесям происходит спекание частиц формовочной смеси и образование пор, в которые может проникнуть жидкий металл. Металл скрепляет частицы формовочной смеси, что ухудшает качество поверхности и вызывает повышенный износ инструмента при механической обработке отливок [18, 19].

Знание закономерностей проникновения металла в поры стенки формы необходимо для правильного выбора зернового и химического состава смеси. Силами, способствующими проникновению металла в поры формы, являются гидростатический напор и поверхностное натяжение; силами, препятствующими проникновению металла — газовое давление в форме и низкая температура ее прогрева.

Жидкий металл не может проникнуть вглубь формы, если её температура ниже температуры ликвидуса металла. Следовательно, максимальная глубина проникновения металла лимитируется глубиной прогрева формы до температуры плавления металла. Движение жидкого металла в порах формы подчиняется законам гидродинамики.

Формула для расчета продолжительности проникновения жидкого металла в поры формы:

$$\tau = \frac{4\eta h^2}{r_i \sigma cos\theta}, \quad (1.15)$$

где η — вязкость,

h — глубина (высота подъема жидкости в капилляре)

r_i — текущее значение радиуса капилляра

σ — поверхностное натяжение окисленного или неокисленного металла

θ — угол смачивания формы жидким металлом

Глубина проникновения жидкого металла в поры формы не является величиной постоянной и может меняться в довольно широком диапазоне (гистерезис проникновения). Изменение глубины проникновения будет зависеть от свойств формы (размера пор и их геометрии). Гистерезис проникновения увеличивается при уменьшении размера зерен смеси. Поэтому глубина проникновения металла в поры формы может увеличиваться в случае применения мелкозернистой смеси [18, 52, 54]. Влияние величины размера зерна на глубину проникновения латуни в поры формы приведено в таблице 5.

Таблица 5 — Зависимость размера зерна на глубину проникновения медного расплава [18]

Средний диаметр зерна, мкм	260	128	90
Глубина проникновения, мм	0,25	0,1	0,18

Если давление металла на стенку формы будет превышать капиллярное давление, то металл проникнет в поры формы на глубину до половины диаметра частиц (при условии, что стенка формы холодная). При прогреве поверхности формы металл будет проникать в глубь формы вслед за распространением изотермы температуры плавления металла. Давление, при котором начинается проникновение металла в поры наружного слоя формы, зависит от угла смачивания и называется критическим давлением.

Если формовочная смесь смачивается жидким металлом, то металл проникает в поры формы независимо от внешнего давления и металлостатического напора. В этом случае глубина проникновения металла зависит от глубины нагрева формы до температуры плавления металла. Внешнее давление будет способствовать проникновению, облегчая продвижение металла в узких капиллярах [18, 52].

1.1.5 Формовочные материалы

В настоящее время для изготовления художественных отливок методом ЛВМ применяют в основном два способа формообразования: метод послойного образования оболочковой формы и метод монолитной формовки на гипсовом связующем.

В первом случае, по окончании сборки модельного блока, на его поверхность наносят суспензию, состоящую из связующего раствора и пылевидного огнеупорного материала. Каждый слой для фиксации на поверхности блока, а также для упрочнения и лучшего сцепления со следующими слоями обсыпают кварцевым песком и отверждают.

Во втором случае, формы изготавливают из единых огнеупорных смесей, содержащих электродинас или кристобалит, противопригарные добавки и гипс. Например, отечественная огнеупорная масса «Ювелирная» состоит из 80-90% динасового порошка, 10-20% гипса и до 5 мл ортофосфорной кислоты, которая добавляется для увеличения времени схватывания формовочной массы и ее жидкотекучести. Пропорции формовочной смеси: на 1 кг формомассы применяют 0,3-0,4 л воды [14, 15]. В зарубежных смесях (Supercast, K-90, Gold Star Omega, SatinCast) применяется кристобалит (вместо динаса) с добавлением противопригарных добавок [14, 15]. Импортные смеси содержат не более 70% кристобалита, 40% кварца, 35% гипса. Максимальный размер частиц в пределах 12 мкм. Содержание противопригарных добавок не более 4%. Итальянская смесь К-90 содержит: гипс — 25%, кварц — 35%, кристобалит — 40%. Максимально допустимая температура заливаемого металла — 1160 °С.

Кристобалит является высокотемпературной полиморфной модификацией кварца. Кварц (форма кремнезема SiO_2) обладает высокой огнеупорностью (1713 °С), прочностью, твердостью и низкой химической активностью. Недостатком кварца является его способность к аллотропическим изменениям при нагревании и охлаждении. В процессе нагрева и температуре более 575 °С β-кварц переходит в α-кварц и при этом объем его увеличивается на 2,4%. Общеизвестны высокотемпературные модификации кремнезема: α-кварц, α-кристобалит; низкотемпературные модификации: β и γ. Диаграмма состояния кремнезема представлена на рисунке 5 [18].

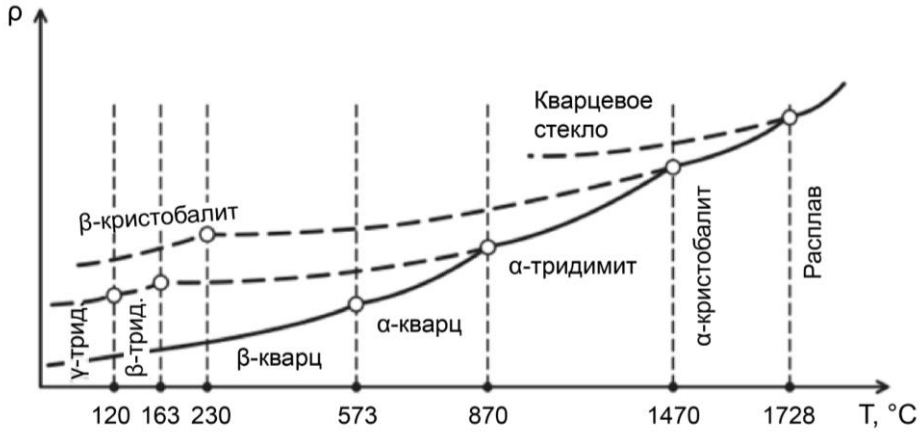


Рис. 5. Диаграмма состояния кремнезема [18]

Полиморфные превращения кремнезема сопровождаются изменением объема, что вызывает растрескивание зерен песка при быстром нагреве или охлаждении. В таблице 6 представлены изменения объема при полиморфных превращениях кремнезема.

Таблица 6 — Изменения объема при полиморфных превращениях кремнезема [18]

Превращения кремнезема	Температура превращения, К	Изменение объема, %
β-кварц → α-кварц	846	+0,82
γ-тридимит → β-тридимит	390	+0,2
β-кристобалит → α-кристобалит	523	+3,7
β-тридимит → α-тридимит	436	+0,2
α-кварц → α-тридимит	1143	+16
α-кварц → α-кристобалит	1743	+15,4
α-кварц → кремнеземнистое стекло	1996	+15,5
Кремнеземнистое стекло → кристобалит	—	-0,9

Увеличение точности и чистоты поверхности отливок может быть достигнуто применением неразъемных форм с мелкозернистым наполнителем. Между чистотой поверхности отливок и зернистостью формовочного существует прямая зависимость: чем мельче зерна формовочного материала, тем выше чистота поверхности. Однако применение мелкозернистых материалов ограничено в связи с их плохой газопроницаемостью, которая приводит к появлению газовых раковин и пористости [15, 18, 52].

Для обеспечения необходимой прочности связующее мелкозернистого наполнителя должно обладать достаточной адгезионной и когезионной прочностью. Из практики известно, что подобному условию отвечают необратимо твердеющие связующие с параметрами кристаллической решетки, близкими к параметрам решетки формовочного материала.

1.2 Актуальное состояние и перспективы развития аддитивного производства

Реализация литейной модели является первоочередным этапом в технологическом процессе получения ювелирных и художественных отливок. Разработка эффективного алгоритма, основанного на автоматизированном выборе технологии и материала производства литейных и мастер-моделей, позволит снизить количество дефектов и временные затраты на постобработку моделей и увеличить объемы производства качественных отливок.

Стоит отметить, что на современных предприятиях, занимающихся изготовлением малогабаритных (в т.ч. ювелирных) отливок, как правило, представлены сразу несколько аддитивных технологий для выращивания литейных моделей, соответственно, важной деталью литературного обзора является выявление разнообразия, преимуществ или недостатков процессов каждой из технологий.

Для поддержания высокой скорости производства качественных ювелирных украшений предприятия заинтересованы в использовании возможностей быстрого прототипирования, предлагаемого аддитивными технологиями, в том числе комбинируя данные преимущества с применением программ для трехмерного моделирования, предлагающих расширенный функционал по реализации художественных моделей, адаптированных под 3D-печать. Применение трехмерного моделирования и печати позволяют ювелирным предприятиям производить значительно большее число литейных моделей различной конфигурации за один печатный цикл для последующего художественного литья в сравнении с субтрактивными методами, что делает производство более мобильным и способствует дополнительной экономической выгоде по производству ювелирных и художественных изделий [10, 59, 62].

3D-принтеры способны напечатать модель любой сложности, опорные структуры могут быть напечатаны, в зависимости от технологии печати и оснащения оборудования, вспомогательным легкоплавким материалом. Фрезерный станок с ЧПУ не имеет возможности создания полых моделей, внутренних элементов и паттернов ввиду технологических ограничений [59, 61, 66, 71].

Рассматривая характеристики, по которым аддитивное производство превосходит субтрактивное, выделяют вопрос объемов производства. В практике литейных предприятий полного цикла восковые модельные блоки зачастую собираются из восковых моделей различной конфигурации, отличающихся геометрической сложностью. При сравнении 3D-принтера, работающего по технологии цифровой светодиодной проекции (DLP), и фрезеровального ЧПУ-станка, очевидное преимущество будет за DLP-принтером. ЧПУ-фрезер за рабочий цикл создает модель единой конфигурации и для создания следующего вида восковой модели требуется повторная настройка и калибровка, 3D-принтер позволяет печатать платформу целиком слой за слоем, одновременно засвечивая всю рабочую область, что при серийном и массовом производстве приводит к значительному сокращению временных затрат [61, 62, 64].

Наибольшее распространение среди аддитивных технологий получила классификация по типу наращивания слоев материала. Таким образом из рассматриваемых технологий, селективное лазерное спекание (SLS) — технология, использующая принцип гранулирования, при методе послойного наплавления (FDM) используется принцип экструдирования. Технологии многоструйной печати (MJP), цифровой светодиодной проекции (DLP), стереолитографии (SLA) работают по принципу фотополимеризации и применяются для производства выплавляемых и выжигаемых моделей ювелирных изделий.

Процесс стереолитографии осуществляется в ванне заполненной фотополимерной смолой. Оборудование использует запрограммированный УФ-лазер для того, чтобы образовать контурный слой на поверхности ликвидного фотополимера, который застывает в местах прохождения лазерного луча (полимеризация). Затем модель опускается ниже (или поднимается выше, в зависимости от устройства принтера) и следующий слой образуется на поверхности предыдущего.

Платформа опускается или поднимается, в зависимости от специфики печатающего оборудования, на расстояние от 0,05 до 0,13 мм для заполнения рабочей плоскости тончайшим слоем жидкого фотополимера, благодаря этому лазерная стереолитография позволяет добиться максимальной четкости и гладкости напечатанных изделий в сравнении с другими аддитивными технологиями. Печать стереолитографией подразумевает соединение слоя за слоем с использованием лазерного луча, объединяющим слои в единую структуру. Постобработка для укрепления модели для последующей стадии подготовки к литью производится финальной полимеризацией ультрафиолетовым излучением в специальной камере. Удаление материалов поддержки производится вручную.

Главные преимущества: быстродействие 3D-принтеров; высокая точность и прочность, а также наилучшее качество поверхности изделий; возможность построения

моделей сложной формы и структуры; объем рабочей камеры больше, чем при DLP-печати; выращенный прототип можно использовать как готовое изделие или хранить до последующей формовки.

Минусы технологии: значительные первоначальные инвестиции, особые требования к помещению и условиям эксплуатации, необходимость в обучении технического специалиста работе с промышленным оборудованием, а также токсичность полимеров и невозможность работы на таком принтере в необорудованном помещении [119].

При SLA готовое изделие без каких-либо дополнительных финишных или доводочных операций имеет шероховатость поверхности не более 100 мкм. 3D-печать методом стереолитографии позволяет создавать выжигаемые модели с внутренней сотовой структурой по технологии QuickCast, снижается масса модели и количество золы при выжигании. Также заметно снижаются внутренние напряжения в форме при прокаливании опок, вызываемые термическим расширением моделей.

Разрабатываются концепты SLA-принтеров, которые поддерживают переменную мощность лазера во время одной сессии печати. На подобных принтерах больший размер пятна лазерного луча используется для зон, где детализация не критична, что позволяет ускорить процесс, а меньший – для таких участков, как углы или криволинейные поверхности [2, 61, 118, 120].

Технология многоструйной печати применяется, как правило, для печати выплавляемых моделей из воскосодержащего материала для последующего художественного и ювелирного литья, а сама печать может осуществляться при помощи модельного и поддерживающего материалов.

Для создания изделия MJP-принтер использует большое количество сопел на печатной головке, количество может варьироваться от 96 до 524 штук. Печатающий блок движется вдоль рабочей поверхности и наносит слои жидкого воска или полимера. В случае с фотополимером, УФ-лампа засвечивает распыленные частицы материала, в результате чего тот затвердевает, формируя заданное изделие.

Точность изготовления изделий по технологии MJP составляет от 16 микрон и выше, разрешение печати в режиме самой высокой четкости — до 750x750x1600 DPI [2, 61, 118-120, 122].

Метод печати DLP характеризуется использованием цифровых светодиодных проекторов, позволяя снижать себестоимость устройств. Данная технология является альтернативой стереолитографии, так как она также предусматривает взаимодействие с жидким полимером, который запекается слой за слоем, но вместо лазера здесь используется световой проектор, что еще более удешевляет подобные принтеры.

В отличие от лазерных установок, сканирующих поверхность материала одним или несколькими лазерными головками, DLP принтеры проецируют изображение целого слоя до затвердевания полимерной смолы, после чего наносится новый слой материала и проецируется изображение нового слоя цифровой модели — слой проецируется целиком, все пиксели одновременно, что ускоряет процесс [2, 61, 118-120, 123-125].

В книге Зленко М.А. «Аддитивные технологии в машиностроении» [61] представлена классификация аддитивных технологий, но описанные исследования характеристик оборудования и материалов ограничены применением к задачам машиностроения, опуская из рассмотрения художественную и ювелирную промышленности, представляющие наибольший интерес в данной диссертационной работе.

В статье Jin-wu Kang, Qiang-xian Ma «Роль и влияние 3D-печати в литье» [59] отмечено, что не существует универсальной аддитивной технологии для производства всех видов моделей. Авторы описывают применение методов 3D-печати для создания литейной оснастки. Проводится сравнение механических свойств и технологических ограничений производства отливок и образцов, полученных прямым лазерным спеканием металлов (DMLS). Отмечается необходимость в оптимизации производственных процессов через корректный выбор аддитивного оборудования под задачи конкретного предприятия [59].

Научные публикации подчеркивают необходимость развития новых методов контроля качества и управления процессом аддитивного производства. Перспективным направлением является применение компьютерного зрения и цифровых двойников, которые позволяют осуществлять мониторинг и корректировку процесса в режиме реального времени. Результаты исследований демонстрируют снижение брака, возникающего в процессе трехмерной печати [63, 65, 66, 72].

Перспективы развития аддитивных технологий в литейном производстве связаны с интеграцией цифровых систем и искусственного интеллекта для автоматизации и оптимизации производственных процессов. Дополнительные исследования в области разработки новых материалов с улучшенными характеристиками и производства отечественных бюджетных аналогов также являются актуальными направлениями [60-72].

В области аддитивных технологий большое внимание уделяется не только материалам и способам печати, но и подготовке моделей. Одним из методов создания моделей с заданными характеристиками является топологическая оптимизация. Например, в работе китайских авторов Shaoying Li, Shangqin Yuan, Jihong Zhu, Chuang Wang, Jiang Li, Weihong Zhang «Оптимизация проектирования на основе аддитивного производства: направление печати и структурная топология» предложен метод оптимизации топологии на

основе аддитивного производства, заключающийся в максимизации механических свойств трехмерных изделий при помощи корректного определения ориентации их печати. В исследовании предложен метод топологической оптимизации для количественной оценки корреляционной функции между параметрами направленной и поперечной изотропии на основе моделей, напечатанных методом SLA. Указано увеличение жесткости на 8,9% и прочности на 14,3% [62].

В исследовании, проведенном Amirpasha Moetazedian, Anthony Setiadi Budisuharto, Vadim V. Silberschmidt и Andrew Gleadall и описанном в «CONVEX (Постоянно варьируемая экструзия): новая методика проектирования в аддитивном производстве» представлен новый подход к микромасштабному проектированию, основанному на идее постоянного изменения ширины экструзии наплавленных волокон в аддитивном производстве экструзионных материалов.

Методика CONVEX значительно отличается от традиционного рабочего процесса 3D-печати, заключающегося в заполнении объема CAD-модели экструдированными нитями термопластика постоянной ширины и высоты. Вместо этого геометрия каждой нити наплавления четко разработана по всей ее длине. CONVEX и его особенности могут быть интегрированы в программное обеспечение для трехмерной печати, чтобы позволить геометрической форме изделия соответствовать обтекаемым волокнам с постоянно изменяющейся шириной, необходимой для соответствия заданной геометрии и контурам, в данной работе данный прием называется «обтекаемой нарезкой».

Использование непрерывных обтекаемых нитей, в отличие от частого изменения количества нитей, улучшило качество изготавливаемых деталей за счет устранения пустот и дефектов, которые, как известно, вызывают критические концентрации напряжений в образцах для испытаний на растяжение. Быстрые изменения параметров печатного процесса (например, скорости экструзии и ретракции) при новой технологии обеспечивают управляемое и динамическое изменение ширины экструдированных волокон (от 75% до 250% диаметра сопла). Эта концепция проверена для различных материалов, величин печатаемого слоя, температуры экструзии, размеров сопел, а также для различных принтеров, работающих по технологии FDM. Принцип метода схематично представлен на рисунке 6.

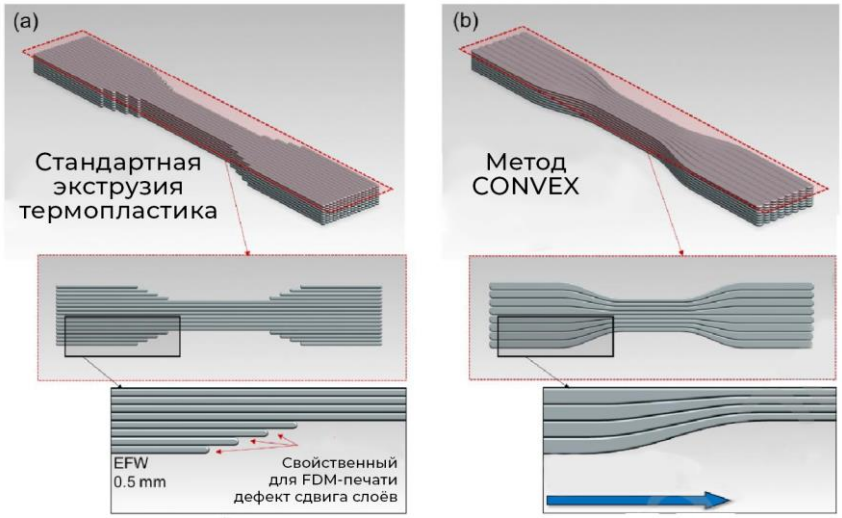


Рис. 6. Принцип метода CONVEX [63, с. 7]

Изменение ширины может достигаться путем регулирования скорости движения печатающей головки или скорости экструзии, чтобы позволить полимерному материалу растекаться до желаемой ширины, при этом высота нити остается постоянной. Данный метод позволит снизить шероховатость поверхности и затраты на механообработку [63].

В работе M. Moretti, A. Rossi, N. Senin «Контроль геометрии деталей в процессе производства методом послойного наплавления с использованием компьютерного зрения и цифровых двойников» представлено решение для мониторинга процесса FDM-печати. В дополнение к обнаружению внутренних дефектов слоя, визуализация печати дает возможность восстановить внешние контуры слоя и, таким образом, трехмерно восстановить боковые стенки детали путем вертикального наложения контуров предыдущих слоев.

Актуальные проблемы для формирования изображений слоев связаны с оптимальным соотношением между разрешением изображения и шириной покрываемой области, а также со сложностью интерпретации изображения, усугубляемой оптически трудными материалами, сложным рисунком волокон и неоднородными условиями окружающей среды. В работе продемонстрировано решение оптической визуализации для идентификации контуров слоев и их наложения за счет использования цифровых двойников — цифрового моделирования слоя на основе производственного процесса.

Система технического зрения может использовать визуализацию с высоким разрешением только там, где это необходимо, отслеживая предсказанные положения контуров слоя при получении последовательности изображений, а также алгоритмически интерпретировать каждое изображение, сосредотачиваясь только на ключевых областях, согласно симуляции, тем самым снижая риск ложных срабатываний. Проводится контроль

качества контура через более точное сравнение между измерением и эталонным контуром, полученным с помощью моделирования.

Возможность мониторинга в процессе работы системы компьютерного зрения демонстрируется путем изготовления приемлемых и дефектных экземпляров тестовой геометрии. Проблемы, связанные с производством, эффективно и действенно обнаруживаются системой, и запускаются аварийные сигналы, которые могут использоваться, чтобы дать команду на преждевременное завершение процесса сборки или инициировать корректирующие действия [65].

В работе Roberto Naboni, Luca Breseghello, Anja Kunic «Разномасштабный дизайн и изготовление арт-объекта Trabeculae Pavilion» [71] описывается процесс от концепции до реализации павильона Trabeculae, склонной к нагрузке архитектуры, которая полностью разработана и оптимизирована для FDM-печати.

Методика исследования объединяет несколько аспектов, таких как испытание на прочность ячеек структуры различной геометрии (рисунок 7), алгоритмы проектирования, основанные на биомимикрии, многокритериальная оптимизация и управление производством. Результатом работы является создание полномасштабного архитектурного прототипа: оригинальной оболочки с ячеистой структурой с повышенной механической прочностью, представленной на рисунке 8.

Рис. 7. Тест прочностных характеристик различных ячеек структуры [71, с. 8]

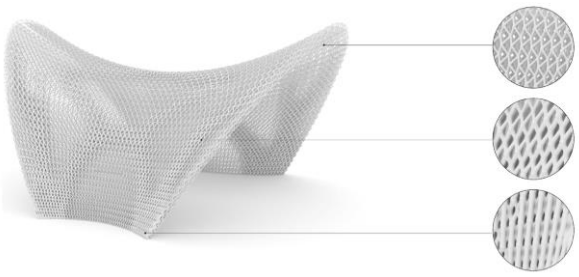


Рис. 8. 3D-печать частей объекта, разделенная на секции [71, с. 10]

Для снижения объемов постобработки было проведено исследование возможности печати бионических структур без поддержек. В результате был сделан вывод, что геометрия печати с вылетом от 0° до 45° от вертикальной оси достижима без ущерба для качества изготовляемой конструкции, в диапазоне от 45° до 65° напечатанные элементы

демонстрируют незначительные эстетические изменения, в то время как модель с выступами в диапазоне от 65° до 80° показывают значительно худшую адгезию слоев [71].

Можно сделать вывод, что в области инжиниринга, цифровых технологий и производства прогресс не стоит на месте и постепенно право выбора переходит из субъективных знаний и представлений человека в вид алгоритмов, передаваемых машинам и компьютерам. Машинное обучение позволяет на основании совпадений и отличий в траектории принятия решений обучать запрограммированные устройства действовать самостоятельно в зависимости от предлагаемых условий.

Взаимодействие человека с промышленным оборудованием собственноручно постепенно перестает быть обязательной составляющей рабочего процесса, все больше инновационных разработок позволяет производить действия на удалённой основе, либо вовсе доверить их выполнение машине, которая автоматически произведет необходимый перечень операций при заданных параметрах, условиях и значениях [63, 65, 69].

Для решения данной задачи на производствах внедряются «цифровые двойники» и принцип «цифрового потока», цель которых заключается в преобразовании материальных объектов и процессов в цифровую форму для обработки программными алгоритмами в реальном времени, что позволит обеспечить быстрое реагирование на возможные сбои и изменения, а также сократить количество циклов проверки разрабатываемого подхода или конструкции по сравнению с традиционным методом. Преимуществом также является автоматический программный сбор полезной информации для последующего машинного обучения (усовершенствования алгоритма) и анализа получаемых данных, что позволит модифицировать технологический процесс [64, 65, 70].

1.3 Топологическая оптимизация, бионический и генеративный дизайн

Бионический дизайн основан на принципах биомимикрии и представляет собой методику проектирования объектов с целью снижения их веса и увеличения прочностных характеристик, учитывая положительное снижение затрачиваемого на изготовление материала, что особенно важно при применении дорогостоящего материала, например драгоценных или редких металлов. Несмотря на значительное применение данного решения в сферах авиа- и машиностроения, где снижение веса деталей имеет положительный эффект, реализация объектов художественного назначения также возможна [70, 75, 76, 83, 89].

Понятия «биомимикрии» и «бионического дизайна» часто комбинируют с термином «генеративный дизайн» (ГД), который имеет несколько отличное значение. Данный способ

основан на «генерации» — автоматическом расчете геометрий разрабатываемых моделей в специализированном программном обеспечении. В процессе генерации программа находит многочисленные решения поставленной задачи, где благодаря искусственному интеллекту отбирается наиболее оптимальный вариант под заданные пользователем параметры, что позволяет регулировать процесс подбора [77, 78, 79, 85].

Получение бионических структур возможно при помощи «топологической оптимизации» (ТО), математического метода проектирования структуры на основе расчета прочностных характеристик изделия и распределения материала в наиболее эффективные зоны при сохранении показателя запаса прочности.

Коэффициент запаса прочности — величина, указывающая на способность конструкции выдержать прилагаемые к ней нагрузки выше расчетных или эталонных. Запас прочности гарантирует повышенную надежность конструкции, что позволяет избежать незапланированные повреждения и разрушения [73, 81, 90].

В обзорной статье Anton du Plessis, Chris Broeckhoven, Ina Yadroitsava, Igor Yadroitsev, Clive H. Hands, Ravi Kunju, Dhruv Bhate «Красиво и функционально: обзор биомиметического дизайна в аддитивном производстве» [75] рассматриваются работы по биомимикрии в аддитивном производстве. Основные теоретические выдержки из публикации приведены ниже.

Биомимикрия — это практика обучения и подражания природе, которая начинает активно применяться в инженерных реализациях, благодаря прогрессу в аддитивном производстве. Возможность создавать детали со сложной геометрией является одним из наиболее важных преимуществ этой технологии, позволяя изготавливать сложные функциональные объекты из различных материалов, включая пластмассы и металлы.

В процессе оптимизации часто используется итеративный процесс, управляемый моделированием, аналогичный биологической эволюции — с улучшением на каждой итерации. Другие формы биомимикрии в аддитивном производстве включают имитацию природы и ее уникальные свойства, использование ячеистых или решетчатых конструкций, сокращение количества отходов.

Часто структуры с кривыми и закругленными краями — визуализирующие природные образы (больше, чем традиционные части с квадратными краями) — называют «биомиметическими», «бионическими» или «органическими», однако никаких биологических факторов здесь нет.

Оптимизация топологии и генеративное проектирование — инструменты, используемые для создания оптимизированных моделей — часто создают нетрадиционные и сложные формы. Автор считает, что наибольший потенциал заключается в том, чтобы

создать «правила проектирования» или руководство на основании природных систем и использовать их в инженерных реализациях [75].

В работе Zhiping Wang, Yicha Zhang, Alain Bernard «Метод генеративного дизайна на основе конструктивной твердотельной геометрии в аддитивном производстве» [77] предлагается новый метод генеративного проектирования с производственной проверкой, чтобы инженеры и дизайнеры могли принимать решения более эффективно. Сначала используется метод на основе CSG (конструктивной твердотельной геометрии) для создания и представления топологии с гладкими границами и параметрическим управлением. Затем с помощью разработанного алгоритма CSG производится поиск оптимальных решений. Предлагаемый в работе метод изготовления деталей может генерировать большое количество высококачественных разнообразных решений с гладкими геометрическими границами при меньшей стоимости вычислений для дальнейшей работы проектировщика [77].

В работе Yicha Zhang, Zhiping Wang, Yancheng Zhang, Samuel Gomes, Alain Bernard «Генеративный дизайн на основе биотехнологий для создания и оптимизации опорных структур в аддитивном производстве» [78] описывается генерация и ручное удаление опорных конструкций на этапе постобработки аддитивного производства, которые по-прежнему остаются трудоемкими и времязатратными.

Чтобы сократить объем опорной конструкции, время и стоимость постобработки, в этой статье предлагается метод генеративного проектирования на основе биотехнологий. Это метод интеграции параметрических L-систем в виде деревьев, оснащенных эволюционной оптимизацией, который позволяет в процессе построения имитировать модель постобработки для создания легких по весу и легко удаляемых за счёт нагрева бионических поддерживающих структур [78].

В статье Marco Hemmerling, Ulrich Nether «Generico: пример дизайна, ориентированного на производительность» [89] проводится исследование дизайнерского кресла, в котором учитывается эргономика человеческого тела, а также аспекты структурных характеристик, свойств материалов и производственных параметров в рамках комплексного подхода к проектированию. Прототип Generico на основе генеративного дизайна совмещает требования по эргономике и устойчив к нагрузкам.

Для разработки дизайна были установлены условия, ограничения и цели проектирования кресла. Генеративный процесс поиска формы учитывает структурные характеристики, свойства материалов и эргономические требования, а также параметры производства при комплексном подходе. На первом этапе ограничения для создания формы были определены в параметрической 3D-модели. Наряду с эргономически важными

аспектами, такими как высота сиденья, положение и угол наклона спинки, а также направление движения — структурные параметры были интегрированы в стратегию моделирования. Результат моделирования представлен на рисунке 9.

Рис. 9. Этапы оптимизации модели стула Generico [89, с. 2]

Чтобы еще раз проверить и оптимизировать структурные характеристики конструкции кресла, модель была проанализирована с помощью программного обеспечения ANSYS. FDM-печать в масштабе 1:1 была проведена из ABS пластика [89].

На основании литературного обзора определено, что бионическим изделиям присущи следующие особенности: криволинейность структуры, отсутствие полигональной геометрии, прямых углов и полной симметрии, наличие оригинальных частей объекта без повторения паттерна, сочетание объемного и плоского, а также естественный переход от внешней геометрии к внутренней.

Бионический дизайн ювелирных украшений обладает особой ценностью, благодаря главному показателю качества художественных изделий — эстетической привлекательности и оригинальному дизайну, который также дополняется заметным снижением используемого для производства материалом.

1.4 Применение программного обеспечения для проектирования изделий, топологической оптимизации и симуляции литейных процессов

Внедрение аддитивных технологий и специального программного обеспечения способствует не только увеличению скорости производства и оказанию эффективной помощи специалистам при художественном проектировании, конструировании и моделировании ювелирных изделий, но и активному интересу к данной деятельности со стороны исследователей, что характеризуется публикацией новых научных трудов, рассматривающих области применения, проблемы, предложения и разработку программных решений в данной области.

С развитием нейросетей многократно расширились возможности по созданию концептов изделий, образующих многочисленный арсенал решений промышленного дизайна. Внедрение искусственного интеллекта (ИИ) в современное программное обеспечение открывает новые горизонты для 3D-моделирования и производства ювелирных и художественных изделий [101, 102, 107].

Искусственный интеллект позволяет автоматизировать многие процессы, включая оптимизацию дизайна, генерацию поддержек и симуляцию литейных процессов. Программы с ИИ могут анализировать большие объемы данных и предлагать оптимальные решения, что значительно ускоряет процесс разработки и повышает его эффективность. Это особенно актуально для ювелирной промышленности, где требуется высокая степень индивидуализации и точности [88, 92, 100, 109].

Ведутся работы над совершенствованием алгоритмов для повышения точности симуляций и более надежного предсказания результатов. В научных публикациях отмечается необходимость разработки стандартов и методик для интеграции ИИ в производственные процессы, что позволит обеспечить более широкое и эффективное применение данных технологий.

Обнаружена тенденция на увеличение количества научных публикаций с 2021 года, в которых рассматриваются процессы топологической оптимизации и генеративного дизайна в программном обеспечении как SolidWorks, Ansys Mechanical, Autodesk Fusion 360, Altair OptiStruct, Solid Edge, NX. Приоритетным направлением является проектирование промышленных изделий, деталей, конструкций и опорных структур. Разработка бионических структур с помощью топологической оптимизации при создании ювелирных и художественных изделий и реализация их путем применения аддитивных технологий и последующего литья не распространена [101-110].

В работе Ложкина Д.В. и Максимова П.В. «Топологическая оптимизация кронштейна в ANSYS», авторы излагают идеи о топологической оптимизации и представляют топологическую оптимизацию кронштейна, используемого в авиационной отрасли. Оптимизация детали проводилась в программной системе ANSYS. В работе представлена математическая постановка задачи топологической оптимизации, описаны основные этапы решения задачи, в том числе, выполнение самой оптимизации, геометрического перепроектирования детали, проверочных прочностных расчетов, оценки на потерю устойчивости. Полученная в результате работы топология обладает наибольшей жесткостью при заданной массе и ограничении на интенсивность напряжений. Масса полученной в результате топологической оптимизации облегченной детали снижена на 36% [105].

В статье «Методы топологической оптимизации в программном комплексе 3D Printer» Дьянова Д.Ю., Медведкиной М.В., Быкова А.Н., Попова В.В. приводятся методы и алгоритмы топологической оптимизации, разработанные в интересах использования в базовой версии программного обеспечения 3D Printer. Для демонстрации работоспособности и эффективности реализованных функциональных возможностей по моделированию оптимальной топологии в статье представлены результаты численного расчета ряда задач. Проводится сравнительный анализ полученных результатов с эталонными решениями. В модуле топологической оптимизации реализован расчёт двумерных и трёхмерных задач топологической оптимизации методами ESO, BESO, PTO, SIMP на основе решения линейных задач статической прочности с различными ограничениями целевой функции. Все перечисленные методы прошли верификацию на ряде производственных задач [108].

Программные продукты предоставляют пользователю самый различный функционал для решения задач ювелирного, литейного и аддитивного производства. Несмотря на преимущественное применение иностранных программных продуктов, российские разработки также постепенно появляются на рынке программного обеспечения для аддитивного и литейного производства.

При работе в программном модуле по топологической оптимизации пространство проектирования превращается в сетку, создается математическая модель детали или сборки, согласно необходимым условиям с учетом пользовательских нагрузок и ограничений анализа. На следующем этапе анализируется структурная целостность детали и проверяется жесткость каждого отдельного элемента. Затем вырезается материал из областей, которые не дают значительных механических или производственных преимуществ.

В дальнейшем этот процесс повторяется послойно, до тех пор, пока в детали не будут обнаружены все те места, которые не испытывают большого напряжения и пока программа не выполнит все установленные в ней на данный момент ограничения. Удаление элементов не будет предпринято за один шаг. Приближение к итоговой объемной доле будет происходить поэтапно. Распределение элементов будет повторяться пошагово [13, 136, 137].

Для подтверждения правильности моделирования структуры, модель повторно загружается в обработку для прохождения проверки на максимальные деформации, напряжения и прочие механические характеристики. В случае утверждения геометрии и переводе её на этап подготовки к трехмерной печати, необходимо произвести вторичную проверку на готовность модели в программе Materialise Magics или Netfabb [143, 144],

которые позволяют убедиться в замкнутости всех контуров модели, ее твердотельности, корректности сборки и соответствию размеров сечений стенок модели заданному интервалу значений.

Разберем программное обеспечение для бионического проектирования: Autodesk Within, Altair OptiStruct, Solid Edge, NX, ANSYS Mechanical, Autodesk Fusion 360 [145-150]. Оптимизация модели в большинстве представленных программ сопровождается выбором материала будущего изделия, а также видом ее производства: литье, штамповка, трехмерная печать и прочее. Указывается величина силы (force) в Ньютонах и её направление, которое прикладывается к конструкции, а также фиксированные места, выполняющие роль креплений (fixtures).

В 2015 году в программном обеспечении Autodesk Within впервые появился общедоступный пользовательский инструмент для генерации бионических структур, которое было направлено на проектирование оптимизированных объектов с решетчатой структурой и расчетом прочности специально для 3D-печати. На 2024 год данная программа приобрела новый вектор и активно применяется в медицинской сфере, получив дополнение к названию — Autodesk Within Medical [145].

Современный аналог — платформа для проектирования, инженерных расчетов и подготовки к производству на станках с ЧПУ и 3D-принтерах — Autodesk Fusion 360. В ней реализован модуль Advanced Simulation для топологической оптимизации и учета даже композиционных материалов. Все данные хранятся в облачном хранилище на зарубежном хостинге, что может стать ограничением для большинства отечественных специалистов и предприятий [146].

Программа ANSYS Mechanical позволяет воспроизводить деформацию конструкций под нагрузкой, рассчитывать влияние вибраций и прочие физические воздействия на изделие в ходе его моделирования. По загруженной модели для оптимизации указываются точки крепления, приложение и направление нагрузок, задаются границы минимального объема и толщины стенок. Хранение файлов и вычислительные процессы оптимизации производятся на пользовательском компьютере, технические характеристики которого напрямую влияют на длительность процесса оптимизации [147].

Программный комплекс Altair OptiStruct предназначен для построения и анализа прочности структур на разрыв, сжатие, изгиб, кручение и позволяет оценить степень деформации. Данная программа не является исключением и предоставляет пользователю возможность получить геометрию с наилучшим распределением материала и определить зоны для построения решетчатых структур. Единственным недостатком данного программного обеспечения является достаточно запутанный интерфейс и необходимость

знания базовых кодировок операций, которые будут применяться в ходе геометрической оптимизации и работы с моделью [150].

Постобработка трехмерной модели осуществляется вручную с применением встроенных функций САПР, если оптимизированная структура не изменяется вдоль одной из осей. После процедуры топологической оптимизации и выполнения операций по сглаживанию поверхностей CAD-модели необходимо выполнять проверочные прочностные и иные расчеты, так как в процессе доработки сама CAD-модель изменяется, а итоговая форма изделия (конструкции) перестает детально соответствовать форме, полученной в процессе топологической оптимизации.

1.5 Оценка качества, эстетической функции и художественной привлекательности изделий

Современные стандарты и методы, разработанные в области дизайна и технической эстетики, позволяют систематизировать и структурировать подходы к анализу и оценке этих показателей. Эстетическая функция изделий, их художественная ценность, новизна, а также соответствие стилевым направлениям являются важнейшими аспектами, определяющими восприятие и конкурентоспособность продукции на рынке.

В книге Богдановича Л.Б. «Художественное конструирование в машиностроении» [24] подчеркивается сложность оценки эстетических качеств изделий в сравнении с оценкой технико-экономических показателей. Для оценки качества изделий в зависимости от их назначения предлагается использовать пять групп показателей: технические (производительность, надежность и т.д.), эргономические, функциональные, соответствие материалов конструкционному решению и художественно-конструкторскую обработку. Важным аспектом анализа является введение показателя технической эстетики ($П_э$), который учитывает соответствие изделия общественным потребностям, композиционное совершенство, товарный вид и эргономические факторы. Оценка этих показателей проводится путем экспертного опроса с последующим усреднением оценок и умножением на коэффициент весомости [24].

Глазычев В.Л. в работе «О дизайне: очерки по теории и практике дизайна на Западе» [41] описывает основные виды экспертиз, применяемых при оценке ювелирных изделий — геммологическую, технологическую (анализ конструктивных и технологических особенностей изделия, а также возможные модернизации, которые могут влиять на его потребительские свойства), художественную (для оценки эксклюзивных и антикварных изделий с целью определения их исторической и художественной ценности) [41].

Варламов Р.Г. в книге «Элементы художественного конструирования и технической эстетики» [30] выделяет несколько ключевых критериев качества ювелирных изделий. Первым является материал, от выбора и качества которого зависят как внешний вид, так и долговечность изделия. Вторым критерием является оригинальный дизайн и мастерство исполнения, что обеспечивает гармоничность и привлекательность изделия. Третий критерий — стойкость изделия к внешним воздействиям [30].

В книге Бычкова В.В. «Эстетика» [29] подчеркивается, что основная функция всех видов ювелирных и художественных изделий заключается в их художественной ценности, или эстетической функции, с помощью которой они выполняют утилитарно-прикладные задачи. Уровень эстетического можно определить с определенной вероятностью на основе эмпирико-статистических исследований, проводимых в определенной культурной среде, или же на основе интуитивных суждений профессионалов в области искусства, дизайна и технической эстетики. Важно отметить, что художественная привлекательность выражается через художественные образы и символы, что определяет их ценность в искусстве [29].

В кандидатской диссертации Дронова В.В. «Разработка дизайна изделий методом автоматизированного варьирования параметров модели» [31] рассматривается критерий оценки качества генерируемой модели, который включает эксплуатационные, технологические и эстетические показатели. Для оценки качества моделей используются заочные экспертные методы, такие как опрос респондентов, который позволяет провести ранжирование моделей по заранее определенным признакам. Важным аспектом работы стало создание классификатора объектов дизайна, который делит их на утилитарные, культурно-бытовые и эстетико-художественные. Также в работе обсуждаются инструменты, обеспечивающие автоматическую сверку геометрии изделия с эталонной моделью, что важно для контроля качества [31].

Ленсу Я.Ю. в книге «Экспертиза проектов дизайна» [34] акцентирует внимание на важности комплексной оценки потребительских свойств объектов дизайна, включая их эстетическую оценку. Конструкция изделия играет центральную роль в удовлетворении потребностей, обеспечивая рациональный процесс изготовления и оптимизацию использования ресурсов. Эстетическая оценка продукции рассматривается как обязательная часть комплексной оценки качества, что особенно важно в условиях рыночной экономики, где эстетическая ценность товара влияет на его стоимость. Методика оценки потребительских свойств включает создание эталонных рядов изделий-аналогов и их ранжирование по степени совершенства формы и уровню потребительских свойств [34].

Важным событием в развитии методик оценки потребительских свойств промышленных изделий стала книга Азгальдова Г.Г. и Повилейко Р.П. «О возможности оценки красоты в технике» [21-23], изданная в 1977 году. Авторы предложили методику количественной оценки критерия красоты ($К_к$), которая основывается на числовом кодировании эстетических элементов и моделировании идеального аналога. Они выделили 16 эстетических элементов, таких как композиция, форма, цвет, качество поверхности, симметрия и пропорции, которые можно количественно оценить при наличии двух условий: возможности числового кодирования и возможности определения закономерности для моделирования идеального аналога. Также была разработана художественно-конструкторская экспертиза, направленная на качественный и количественный анализ эстетических свойств промышленных изделий [21-23]. Эта экспертиза использует эталонные ряды изделий для сравнительного анализа и оценки их эстетического уровня, коррелирующая с предложенной в работе Ленсу Я.Ю. [22, 34].

Согласно ГОСТ 22851-77 [42], эстетические показатели качества промышленной продукции включают такие аспекты, как информационная выразительность, рациональность формы, целостность композиции и совершенство производственного исполнения. Эти показатели позволяют оценить степень соответствия продукции стилевым направлениям, моде, функционально-конструктивным требованиям, а также качеству отделки и покрытия. Особое внимание уделяется чистоте выполнения соединений и поверхностей, что важно для достижения высокого уровня эстетики в изделиях [42, 43].

В книге Рунге В.Ф. «История дизайна, науки и техники» [28] демонстрируется номенклатура эстетических показателей, предложенная специалистами ВНИИТЭ для оценки качества товаров широкого потребления [40]. В эту номенклатуру входят как комплексные, так и единичные показатели, которые позволяют дифференцировать общую художественную выразительность, рациональную организацию формы и композиционную целостность изделия. Подчеркивается значение таких элементов, как функциональная обусловленность, гармоничность объемно-пространственной структуры, цвето-фактурное решение, что в совокупности определяет эстетическую ценность изделия [28].

Дронова Н.Д. в своей книге «Ювелирные изделия. Справочник-энциклопедия. Классификация. Описание. Оценка» [36] предлагает классификацию ювелирных изделий по сложности формы и степени декоративной обработки. Изделия сложной формы с ажурной или рельефной поверхностью, труднодоступной для обработки, относятся к VI классу сложности. Дронова также вводит термин «изделие улучшенного качества», подчеркивая важность соответствия ювелирных изделий их назначению, художественного оформления и технического исполнения. Особое внимание уделяется анализу объемно-

пространственной формы изделия, где учитываются геометрия, масса, фактура и цвет материала, что формирует первое зрительное впечатление [36].

Можно сделать вывод, что оценка эстетической привлекательности изделий, будь то промышленные или ювелирные, основывается на совокупности критериев, включающих художественную выразительность, техническое исполнение и соответствие функционально-конструктивным требованиям. Инновационные подходы, такие как генеративный дизайн, позволяют автоматизировать процесс создания новых форм, что расширяет возможности дизайнеров и может повысить качество изделий за счет компьютерного моделирования и оптимизации.

1.6 Выводы по литературному обзору

Перечень научных публикаций формирует четкую картину, что реализация литейных моделей методом аддитивного производства стала фундаментальным фактором в определении эффективности литейного производства. Трехмерное моделирование и последующая печать восковых и мастер-моделей на специализированном оборудовании позволили раскрыть стратегический потенциал литейной промышленности, получить возможность реализации изделий особо сложной конфигурации, снизить время изготовления, человеческие энергозатраты, в совокупности повысив эффективность работы на данном этапе.

Стоит отметить исследования в области ювелирного литья, где уделяется внимание разработке новых составов формовочных материалов на гипсовом связующем с добавлением различных огнеупорных наполнителей. Разработка методов борьбы с дефектами художественных отливок, такими как пригар, усадочная пористость, недолив также актуальна, но исследование данной проблемы ограничивается в основном анализом способов плавки металлов и изготовления литейных форм, где цифровое проектирование и 3D-печать литейных моделей, способы установки питателей и возможности автоматизации технологического процесса описаны поверхностно и фрагментарно.

Главная задача, с которой сталкиваются современные предприятия, заключается в разработке алгоритма по подбору технологии и материала для создания литейных моделей будущих изделий. Проблема компетентного выбора очень важна и затрагивается в работах данного литературного обзора, как со стороны литейного, так и аддитивного производства.

Еще одна важная проблема, которая упоминается в статьях о современном аддитивном производстве, связана с оптимизацией топологии разрабатываемых моделей, что напрямую пересекается со знанием о производстве моделей со сложной геометрией,

структурами и прочими особенностями. Всё больше научных публикаций зарубежных ученых обретают вектор исследования бионических структур и различных «природных имитаторов», которые могут быть исследованы в области ювелирного и художественного литья, где на данный момент ощущается нехватка подобного материала, особенно в русскоязычном сегменте [73-76, 83, 89].

При использовании термина «топологическая оптимизация» не как процесса, а как результата моделирования новой структуры для конструкций и объектов, подвергающихся периодической или постоянной нагрузке, корректно ввести термин «топологическая модификация» как результат, получаемый при применении топологической оптимизации для формирования новой конфигурации ювелирных и художественных изделий. Различие заключается в том, что результат оптимизации направлен на решение эксплуатационных задач, а результат модификации выполняет визуально-декоративную функцию, что является приоритетным для ювелирных и художественных изделий.

Актуально исследование способов воспроизведения геометрических особенностей различных изделий с оригинальным дизайном, направленным на повышение художественной привлекательности ювелирных отливок, получаемых методами генерации или оптимизации базового геометрического тела.

Художественная привлекательность — это качественная характеристика, отражающая эстетическую ценность изделий, основанную на гармонии формы, текстуры, цвета, пропорций и композиции, которые создают визуальное впечатление у зрителя или владельца. Художественная привлекательность определяется визуальной согласованностью и балансом между различными структурными элементами, что делает изделия привлекательными для восприятия и востребованными в качестве арт-объектов, декоративных атрибутов и украшений.

Ключевое отличие художественной от эстетической привлекательности заключается в том, что первая фокусируется на исполнительском мастерстве, применении новых методик, оригинальности и выразительности, а эстетическая привлекательность связана с чувственным восприятием красоты, гармонии и эмоционального отклика.

Художественная привлекательность оценивается ювелирами, дизайнерами и искусствоведами, которые анализируют технические решения, способ проектирования изделия и образы, которые оно транслирует. Эстетическая привлекательность оценивается конечными потребителями и коллекционерами, которые воспринимают изделия через призму их красоты и эмоционального воздействия.

Термин «паттерн» означает регулярную или повторяющуюся геометрическую структуру 3D-модели, используемую для создания декоративных форм и узоров на

поверхности изделия. Термины «паттерн оптимизации» и «паттерн напряжений», которые упоминаются значительно чаще в данной работе, означают результат симуляции по анализу напряжений, возникающих в модели вследствие прикладываемой нагрузки, представленный в виде объемной модели с визуальным (структурным) разделением на области соответствующих значений.

Многообразие современного программного обеспечения и аддитивные технологии позволяют создавать комплексные тонкостенные литейные модели, например, в бионическом стиле, благодаря активной модернизации оборудования и программ, адаптированных для работы с ними.

На основании литературного обзора и поставленной цели в рамках данной работы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать алгоритм формообразования и постобработки поверхности и формы ювелирных и художественных изделий при топологической оптимизации в специализированном программном обеспечении;

2. Исследовать способы плавления и заливки сплавов на основе серебра и меди. Установить оптимальный способ плавления и заливки сплавов СрМ925 и М67/33 для минимизации 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 пригара на поверхности отливок из СрМ925 и М67/33.

4. Изготовить партию ювелирных изделий из сплавов СрМ925 и М67/33 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 и выжигаемых моделей ювелирных и художественных изделий.

2 Материалы и методы исследования

2.1 Формирование технического задания на изготовление изделий

В техническом задании (ТЗ) содержатся требования к проекту или изделию. В рамках разработки ювелирных и художественных изделий ТЗ должно включать детальные указания по размерам, массе, точности изделия, чистоте поверхности и прочим характеристикам изделия для определения метода проектирования, технологии изготовления и обработки изделия. В таблице 7 представлена разработанная форма и содержание технического задания на разработку ювелирных изделий в рамках данной работы.

Таблица 7 — 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

Продолжение таблицы 7.

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
Инкрустация драг. камней	Не предусмотрена
Фактура логотипа (кулон-2)	Логотип должен визуально считываться при вертикальной ориентации кулона (вид сверху), быть частью узора (не нарушать гармонии в композиции), разница высоты рельефа к прочим стенкам не превышает 1 мм.
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.

Для изготовления ювелирных изделий обосновано применение литья по выплавляемым моделям по причине получения отливок с высокой точностью размеров, передачей сложногеометрических (бионических, ажурных) форм и низкой шероховатостью поверхности, что позволит снизить трудоемкость механической обработки, уменьшит время и материальные затраты на производство, а также позволит добиться более высокого качества внутренних полостей отливки, где ручная обработка труднодоступна без продольного разделения тела отливки.

Возможность применения в ЛВМ вакуумных и прессовых технологий при заливке обеспечивает равномерное распределение материала и повышает плотность изделия, что особенно важно для ювелирных изделий, указанных в техническом задании.

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

Для производства выплавляемых моделей обосновано применение аддитивных технологий по причине высокой степени детализации и точности, что особенно важно при производстве моделей ювелирных изделий с мелкими и сложными элементами. Создание моделей с бионической конфигурацией и параметрами, представленными в техническом задании, традиционными методами невозможно или необоснованно трудоемко, учитывая различия в геометрических решениях для каждой модели. Приоритетными технологиями для исследования являются стереолитография (SLA), цифровая светодиодная проекция (DLP) и многоструйная восковая печать (MJP), которые обеспечивают возможность роста моделей с минимальной толщиной слоя для получения гладких поверхностей и точной передачи тонких элементов изделий.

Для проектирования выплавляемой модели обосновано применение топологической оптимизации по причине автоматизации процесса получения множества структурно-геометрических решений, соответствующих поставленной задаче — снижению массы изделия, сохранению прочностных характеристик, формированию бионических (имитирующих природные формы) конфигураций, адаптированных для 3D-печати и литья по выплавляемым моделям.

2.2 Методика проектирования литейных моделей

Применение топологической оптимизации в качестве метода проектирования характеризуется расчетом прочностных характеристик на основании математической модели, учитывающей распределение материала во всем объеме и его плотность в конкретной точке. Задача оптимизации заключается в наиболее эффективном распределении материала по объему модели, согласно указанным целям и параметрам моделирования.

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

Пример алгоритма оптимизации в SolidWorks:

1) После импорта модели в программную среду SolidWorks включите расширение Simulation в панели Add-ins. Затем в списке Study запустите новый анализ (New Study). Из списка выберите Topology Study (анализ топологии модели).
2) Для выбора материала перейдите в раздел Apply Material, затем откройте вкладку «Other Metals» и выберите Silver. Нажмите Apply. Внешний вид модели видоизменился.
3) Правой кнопкой мыши нажмите по вкладке Fixtures в меню свойств объекта. Для указания крепления необходимо выбрать целиком области крепления, осмотреть модель с разных сторон и убедиться в полном выделении необходимых областей. Установите Fixed Geometry на внутреннюю полость окружности тора.
4) Во вкладке External Loads выберите Force — вертикальное приложение силы к плоскости по оси X в интервале 20-220 Н.
5) Повторно в нагрузках добавьте Force (прямое приложение силы) с указанием приложения силы на разрыв от внутренних полостей колец крепления, созданных на первом этапе. Подберите значения в интервале 20-100 Н.
6) Во вкладке Goals and Constraints выберите Best Stiffness to Weight Ratio, то есть наилучшее соотношение жесткости при снижении веса модели. В дополнительных параметрах укажите следующие значения: Mass Reduction: 70%; Displacement: 1.4
7) Во вкладке Manufacturing Controls задайте параметры производства, к которым относятся зарезервированные зоны, максимальная и минимальная толщина модели, способ разъема пресс-формы, симметричность модели.
8) Preserved Regions: выберите области, которые не будут подвергаться оптимизации и останутся неизменными, также задаём Area Depth, что означает глубину (и ширину) зарезервированной области. Установите значение 0.3 мм, в том числе и для профиля браслета.
9) Minimum/Maximum Thickness: задайте минимальную и максимальную толщину в соотношении не превышающим 1.35x. Минимальная толщина не менее 0.9 мм.
10) De-mold control: укажите разъем пресс-формы Stamping.
11) Symmetry control: при необходимости симметрии выберите значение от 1/2 — 1/8 и указывается соответствующее количество плоскостей симметрии (от 1 до 3).
12) Создайте сетку при помощи команды Create Mesh. Сетка определяет точность и разнообразие генерируемых структур. Чем она точнее (Fine), тем более аккуратной и содержательной будет финальная структура, однако время оптимизации

значительно увеличится. Грубая сетка (Coarse) позволит получить черновой вариант оптимизации, передавая в художественных изделиях стиль брутализм и индустриализм.

13) Mesh Type: Curvature-Blended Mesh. Укажите Draft Mesh Quality.
14) Mesh Quality: оставьте значение по умолчанию.
15) Запустите оптимизацию (Run Study).
16) Анализ результатов и экспорт: можете подобрать наиболее приемлемый результат оптимизации, изменяя значения распределения материала от Light до Heavy (наименьшее и наибольшее количество материала в оптимизированной модели). После этого нажмите Calculate Smoothed Mesh для отображения сглаженного варианта модели.
17) На вкладке Results нажмите на Export Smoothed Mesh, где можно выбрать тип сохранения файла. Для перехода к этапу 3D-печати сохраните файл как Solid Body и New Part File, что позволит в дальнейшем пересохранить модель в формате stl.
18) Если модели необходима ручная постобработка, рекомендуется сохранить полученный результат оптимизации как Graphic Body, что облегчит повторное моделирование в САПР на основании оптимизированной структуры.

Пример алгоритма оптимизации в Ansys Mechanical:

1) Откройте базовый модуль Static Structural.
2) Перейдите в Geometry.
3) Нарисуйте эскиз при помощи программного инструментария.
4) Выдавите 2D-эскиз при помощи команды Pull и переходим в режим Model.
5) Создайте Mesh (сетку), для генерации нажимаем Generate Mesh.
6) Сделайте сетку более детализированной и выберите Size Function: «Proximity and Curvature» вместо «Adaptive».
7) Через Static Structural добавьте Cylindrical Support (фиксируем цилиндрические держатели), установите Tangential.
8) В Bearing Load установите груз, силу и направление ее приложения.
9) В Solution добавьте Equivalent Stress.
10) Нажмите Solve и посмотрите анимацию ранжировки заполнения.
11) Topology Optimization перенесите в окно Solution.
12) В Response Constraint выберите тип «ответа» — масса (m), объем (v), Global von-mises stress (Распределение глобального эквивалентного напряжения), Displacement

(смещение), local von-mises stress (распределение локального напряжения), Reaction Force (Сила реакции опоры).

13) Выведите отчет по результату и запускаем анимацию удаления «неэффективных» зон.

14) Results в Topology Optimization переведите в Transfer to Design Validation System. (Results > Update; Geometry > Update).

15) Скопируйте обводку получившейся оптимизированной формы, вставьте и редактируйте.

16) Выберите Fit Curves (ставим галочку на Tangency).

17) Все закругления замените новой окружностью, сложные моменты упростите прямыми линиями, закруглите углы, выдавите и выберите Merge Faces для объединения полостей.

18) Сгенерируйте новую модель: Solid > Suppress; Generate Mesh > Apply; Solve!

Пример алгоритма оптимизации в Fusion 360:

1) Загрузите 3D-модель > Sculpt > Simulation.
2) Выберите Shape Optimization.
3) Выберите материал аналогично как в Ansys и Solidworks.
4) Зафиксируйте зоны с помощью Constraint (pin).
5) Задайте Load — область, значение и направление приложения силы.
6) Укажите диаметр Preserve Region (неизменяемая область модели).
7) Сформируйте симметричную плоскость, используя Symmetry Plane.
8) Задайте Mesh Size значения ниже: откройте Manage > Mesh > уменьшите Model-based Size до 2% (из 10).
9) Нажмите Solve для оптимизации, перейдите в Results > Promote.
10) Отредактируйте полученный результат, создайте новый sketch.
11) Произведите базовые операции по доработке: перерисуйте, упростите, скруглите, выдавите.
12) Воспроизведите анимацию приложения силы к оптимизированной детали.

Значения параметров и результаты оптимизации вносятся в журнал оптимизации. На основании анализа полученных результатов проводится сортировка и отбраковка полученных моделей, устанавливаются закономерности значений параметров и видов геометрической модификации модели, формируется матрица значений параметров топологической оптимизации ювелирных и художественных изделий.

2.3 Методика 3D-печати литейных моделей

Трехмерная печать выплавляемой модели методом многоструйной печати MJP.

Готовая цифровая модель экспортируется в формате STL. В программе 3D Sprint выбирается оборудование и материал печати (ProJet CPX 3510, Visijet Icast Real Wax), проводится симуляция послойного выращивания модели, устанавливаются оптимальные параметры печати и поддерживающие структуры, модель нарезается на тонкие слои и форматируется в gcode для передачи в систему управления 3D-принтера.

Печать проводим из Visijet Icast Real Wax, материал имеет низкую зольность (<0,05%), линейную усадку (<0,8%) и низкую температуру плавления (65 °C), что является большим преимуществом в процессе литья по выплавляемым моделям для изготовления высокоточных тонкостенных изделий, указанных в техническом задании.

Печать проводится на принтере ProJet CPX 3510 (рисунок 10) в режиме высокого разрешения (375x375x790 dpi) для обеспечения высокой степени детализации и адекватной скорости построения: устанавливается толщина слоя печати в 32 мкм, скорость печати составляет 5 мм/ч. Проверенный на практике объем рабочей камеры в данном режиме составляет 290 x 185 x 200 мм.

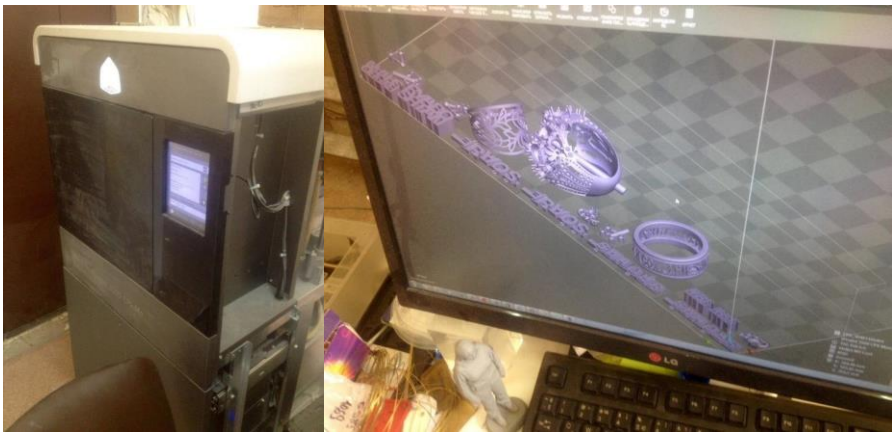


Рис. 10. ProJet CPX 3510 (слева) и расположение 3D-моделей изделий на рабочей платформе в программе 3D Sprint (справа)

3D-печать начинается с формирования первого слоя воскового материала на рабочей платформе. Множество микроструйных головок выбрасывают мелкие капли воска (0,008 мм), которые сразу же отверждаются с помощью УФ-излучения. Каждый последующий слой наносится поверх предыдущего. В процессе печати слои прочно скрепляются между собой за счет термического слияния воска и точного контроля температуры. Это обеспечивает целостность, высокую прочность и точность модели.

Поддержки для предотвращения обрушения слоев (например, под сводами или нависающими элементами) наносятся из VisiJet S300 — специального легкоплавкого материала (55-65 °C). Эти структуры поддерживают восковку во время печати и легко удаляются после завершения процесса.

По завершении печати модели платформа с готовой восковкой медленно опускается, и модель извлекается. Поддерживающие структуры удаляются путем вытапливания в специальной камере выдержкой при 60 °C или растворением в ванне изопропилового спирта с магнитной мешалкой при 55-60 °C (рисунок 11). В зависимости от количества моделей процесс занимает от 5 до 40 минут.

Рис. 11. Ванна с магнитной мешалкой C-mag Hs7 для вымывания поддержек

После удаления поддержек восковка промывается в чистой воде и сушится. Модель тщательно проверяется на наличие поверхностных дефектов и ошибок в конфигурации. Если дефектов не обнаружено, восковка готова к передаче на сборку модельного блока.

Процесс получения выжигаемой модели по технологии стереолитографии (SLA). Цифровая модель экспортируется в формате STL, обрабатывается в программе-слайсере PreForm: устанавливаются поддерживающие структуры и модель нарезается на слои заданной толщины.

Печать на Formlabs Form 3 производилась специальной фотополимерной смолой Castable Wax Resin с 20% содержанием воска в составе. Материал обладает адекватной зольностью (<0,1%), малой линейной усадкой (<0,6%) и температуру плавления выше, чем у восковых составов (249 °C).

Толщина слоя печати устанавливается в 25 мкм (UHD разрешение печати) с целью получения восковки с максимальной детализацией и гладкой поверхностью. Скорость

печати установлена на 20 мм/час, чтобы обеспечить баланс между качеством и временем печати.

Процесс начинается с создания первого слоя на рабочей платформе принтера. Лазерный луч при помощи системы линз направляется на поверхность жидкой фотополимерной смолы и проходит по контурам каждого слоя цифровой модели. Под воздействием УФ-лазера молекулы фотополимера перекрестно связываются, переходя из жидкого в твердое состояние, что обеспечивает прочное сцепление между слоями.

Каждый последующий слой отверждается поверх предыдущего и скрепляется за счет незавершенной полимеризации на границе слоя. Поддерживающие структуры формируются из того же фотополимера, что и основная конструкция модели.

После завершения печати платформа с готовой моделью медленно поднимается из ванны с фотополимерной смолой, модель извлекается и отделяется от подложки.

Модель промывается в изопропиловом спирте для удаления остатков неотвержденного фотополимера. Процесс промывки включает использование ультразвуковой ванны для более эффективного удаления остатков материала.

Поддерживающие структуры удаляются механическим способом с помощью макетного ножа или скальпеля. Для снижения риска повреждения ФП-модели при механическом удалении поддержек следует после промывки в спиртовом растворе просушить модель, затем на 30 секунд опустить её в горячую воду (80 °С), повторно просушить и приступить к удалению опорных структур.

После удаления поддержек модель подвергается дополнительному УФ-отверждению в течение 20 минут для завершения полимеризации и повышения прочности модели.

2.4 Методика изготовления и прокаливания литейных форм

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 мм.

Изготовление формы начинается с взвешивания каждого компонента формомассы, засыпки их в единую емкость в заданных экспериментом пропорциях для перемешивания до получения однородной массы, далее 750 г порошка высыпают в 300 мл дистиллированной воды (20-21 °С) и перемешивают миксером в течение 3 минут с частотой

вращения 350-450 мин$^{-1}$. Затем полученную массу устанавливают в вибровакуумную установку и проводят вакуумирование в течение 2 минут. Далее в течение 1 минуты формовочной смесью заливают опоку с модельным блоком на резиновой подставке (башмаке), который устанавливают в вибровакуумную установку, после чего продолжают вибровакуумирование в течение 2 мин при остаточном давлении в установке 10^4 Па. Суммарное время процесса от засыпки порошка в воду до извлечения опоки после вакуумирования должно составлять не более 8 минут [56].

Затем опоку переносят в защищенное от вибрации место для скорейшего застывания формомассы. Время затвердевания формовочной массы в опоке диаметром 75 мм и высотой 75 мм для эксперимента составляло 90 мин, в опоке диаметром 100 мм и высотой 150 мм для изготовления изделий составляло 120 мин.

На следующем этапе проводится прокаливание опоки для вытапливания воска из полости формы, заключительного отверждения формомассы и удаления оставшейся жидкости. Вытопка воска проводится при температуре 150 °С, повышение температуры осуществляют со скоростью не более 150 °С/ч. Графически этапы прокалочного цикла гипсокристобалитовой формы, проведенного в рамках данного исследования, представлены на рисунке 12.

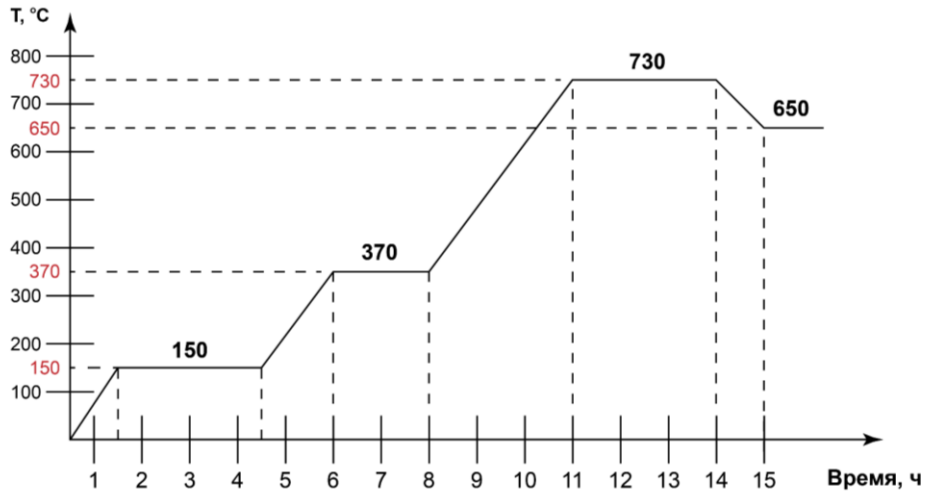


Рис. 12. Прокалочный цикл опоки

Общее время прокалки составляет 15 часов. По завершении процесса прокалки опоку переносят в муфельную печь ЗАО «НПК “Накал”» для поддержания температуры при 650 ºС (рисунок 13).

Рис. 13. Муфельная печь (изготовитель: ЗАО «НПК “Накал”»)

Для изготовления партии ювелирных изделий и всех исследований, представленных в работе, проводился единый способ приготовления формовочной смеси и цикл прокаливания опок.

2.5 Оборудование и методика для приготовления и заливки расплава

Для изготовления изделий из сплавов СрМ925 и М67/33, согласно разработанному в подпункте 2.1. техническому заданию, применяется индукционная вакуумная литейная машина Indutherm VC 600 (рисунок 14), обеспечивающая высокое качество металлического сплава, получаемого путем индукционного нагрева до температуры плавления в атмосфере защитного газа.

Рис. 14. 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 температуры и интенсивности нагрева расплава. Технические характеристики литейной машины представлены в таблице 8.

Таблица 8 — Технические характеристики Indutherm VC 600

Indutherm VC 600						
Мощность	Макс. t плавления	Объем тигля	Размер опоки	Габариты тигля	Давление в камере	Особенности
3.5 кВт, 220 В 12 кВт, 6 х 380 В	1700 °С	265 $см^3$	Ø 130 х Н 260 мм	Ø 68 х Н 120 мм	от -1,0 до +3 бар	Автоматическая подача вакуума; Очистка сплава инертным газом; плавка в вакууме, защитном газе; Использование избыточного давления при заливке

В данной работе для изготовления партии ювелирных изделий, исследования способов заливки и установления зависимости недолива от температуры опоки и количества питателей на восковой модели плавление металлической шихты для приготовления сплава СрМ925 проводилось в вакууме, а для приготовления латуни М67/33 — в защитной среде аргона.

Шихта плавится в графитовом тигле плавильной камеры от индукционного нагрева в среде инертного газа под давлением около 10^{-5} Па (-1 бар). На винтовой прижим устанавливается гипсокристобалитовая форма после прокалки. Воронка автоматически прижимается к сливному носку тигля. В рабочей камере создается разряжение порядка 10^5 Па. При открывании сливного отверстия стопором расплав под действием разницы давления между плавильной (+3 бар) и рабочей камерами (-1 бар) заполняет форму и металл в ней затвердевает. Заливка сплава СрМ925 проводилась при 1010 °С, заливка сплава М67/33 при 1030 °С.

Вводные данные для исследования способов заливки сплавов СрМ925 и М67/33:

Сплавы: СрМ925 (92,5% серебра, 7,5% меди) и М67/33 (67% меди, 33% цинка).

Литейная форма: 50% кристобалит, 25% кварц, 25% гипс.

Температура формы при заливке: 550 °С.

Модели: кулон-1 (размеры — 18,4 х 28 х 6,5 мм) и кулон-2 (размеры — 22,5 х 22,5 х 6,9 мм).

Оборудование: Вакуумная индукционная литейная машина Indutherm VC 600.

Исследуемые способы заливки: заливка под избыточным давлением до +3 бар; гравитационная заливка.

Объем модельного блока: 5 $см^3$ и 25 $см^3$.

Переменные параметры: сплав, способ заливки, объем модельного блока.

Оценка качества: Процент недолива в отливках.

Метод оценки: визуальный осмотр и 3D-сканирование.

Вводные данные для исследования зависимости температуры опоки и количества питателей на недолив в отливках из сплава СрМ925:

Сплав: СрМ925 (92,5% серебра, 7,5% меди).

Модель: кулон-1 (размеры — 18,4 х 28 х 6,5 мм).

Литейная форма: 50% кристобалит, 25% кварц, 25% гипс.

Температура расплава: 1010 °С.

Способ заливки: гравитационная заливка.

Объем модельного блока (ёлки): 5 $см^3$.

Переменные параметры: температура опоки (500°С, 550°С, 600°С, 650°С) и количество питателей (5, 6, 7).

Оценка качества: Процент недолива в отливках.

Метод оценки: визуальный осмотр и 3D-сканирование.

Результаты плавки вносятся в рабочий журнал, в котором приведены задание, художественные и технические требования, предъявляемые к ювелирным изделиям: точность отливок, шероховатость поверхности, механические свойства, контроль внутренних и внешних дефектов. Фиксируются температурные режимы заливаемого сплава и формы.

Последовательность приготовления расплава и заливки литейной формы:

1) Выбрать и обосновать технологию плавки. При необходимости подобрать метод рафинирования и модифицирования сплава. Рассчитать шихту для получения сплава заданного состава, приготовить сплав;
2) Выбрать и обосновать температуру заливки сплава. Произвести заливку в литейную форму;
3) Извлечь отливку из формы. Сопоставить качество получаемой отливки с эстетическими требованиями, предъявляемыми к ювелирному изделию (цвет, фактура, точность конфигурации), а также с требованиями технических условий по шероховатости поверхности, механическим свойствам;

4) Сформировать заключение по опробованному варианту технологии, указав наличие дефектов;
5) По результатам оценки полученной отливки внести необходимые изменения в первый вариант технологии и произвести повторное изготовление формы и отливки по измененной технологии;
6) Доработку технологического процесса проводить до получения отливки, отвечающей поставленной задаче;
7) По результатам исследования сформировать технологическую карту или рекомендации на изготовление ювелирных отливок заданной конфигурации и материала, указав оптимальные параметры на каждом этапе производственного процесса.

3 Проектирование и топологическая оптимизация конфигураций ювелирных и художественных изделий

3.1 Применение топологической оптимизации для проектирования конфигураций ювелирных и художественных изделий

Бионический дизайн — это инженерный подход к разработке изделий и конструкций, отличительной чертой которого является снижение массы разрабатываемого объекта при сохранении его прочностных характеристик и имитации природных форм с характерными плавными переходами и изогнутыми линиями.

В контексте бионического дизайна необходимо рассматривать такие понятия как «генеративный дизайн» (ГД) и «топологическая оптимизация» (ТО). Результатом корректного применения обеих технологий является создание конструкций с оригинальной формой, соответствующих заданным характеристикам и отвечающих необходимым эксплуатационным требованиям [75, 77, 80, 138, 139].

Процесс генерации проходит в обоих случаях, разница заключается в том, что при ГД реализация изделия происходит с нуля по заданным параметрам, в то время как ТО производится поверх уже готовой модели (болванки).

В специализированном программном обеспечении производится анализ нагрузок, которым будет подвергаться объект в процессе реальной эксплуатации, учитываются крепления к изготовляемой модели. Благодаря программному расчёту, материал из детали удаляется в тех местах, где нагрузка и напряжения минимальны [73, 74, 79, 84, 140].

На изменение геометрии могут быть установлены производственные ограничения. Среди них: контроль габаритов и толщины, определение осей симметрии и прочее. Благодаря этому, шансы на получение качественной продукции после ТО значительно возрастают, гарантируя сохранение всех механических характеристик.

Существуют определённые ограничения применения ГД и ТО, например, усложнение конфигурации детали, что требует новых подходов в технологии изготовления заготовок и их маркировке. Несовершенство технологии, сложности с сертификацией и высокая стоимость продукции частично ограничивают область применения ТО, как метода проектирования деталей [73, 85, 87, 141].

Можно выделить несколько направлений для применения ТО в качестве инструмента для создания бионических художественных изделий. Схема представлена на рисунке 15.

Рис. 15. Типы реализуемых бионических изделий

В работе описывается способ изготовления топологически оптимизированных изделий гибридным методом — совмещением 3D-печати и литья по выплавляемым моделям.

3.2 Разработка правил постобработки поверхности и формы ювелирных и художественных изделий при топологической оптимизации

Результаты оптимизации обычно состоят из множества нависающих областей, которых следует избегать для большинства процессов печати. Проектная переменная, такая как относительная плотность, постоянно находится в диапазоне от 0 до 1, что необходимо преобразовать в дискретный 0 или 1 в качестве оптимизированного результата. Решетчатые структуры могут быть использованы для решения этих проблем. Надо знать, что решетчатая структура не только поддерживает выступающие структуры, но и заполняет эти области с промежуточной плотностью [81]. Примеры гибридной структуры с твердой решеткой показаны на рисунке 16.

Рис. 16. Гибридная структура металлических изделий [81]

Решетчатая структура представляет собой тип сотовой архитектуры с взаимосвязанными узлами в трехмерном пространстве. Механические свойства в решетчатых структурах можно оптимизировать, адаптируя распределение материала в пространстве решетки. Поэтому решетчатая структура все чаще используется в качестве

модификатора ТО для получения легковесной конструкции в технических реализациях [73, 74, 76-79].

Согласно примеру на рисунке 17 можно заметить еще одну особенность ячеистых структур, что она не всегда визуально соответствует классическим пчелиным сотам, а может иметь самую разнообразную форму, что создает дополнительные возможности в поиске дизайн-решений художественных изделий и конструкций.

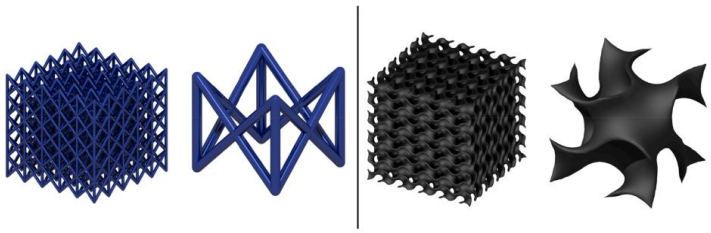


Рис. 17. Различные геометрические звенья, составляющие 3D-сетку

Для корректной 3D-печати каждая ячейка проектируется по следующим правилам:

1. Элементарная ячейка может иметь только одно непрерывное тело, так что любое место с материалом не может быть полностью окружено пустыми областями.

2. Шарнирные соединения (когда два полигона касаются только вершины, а не края) не допускаются. В 3D-моделировании шарнирные точки включают места, которые касаются только 2D-линий.

3. Разрабатываемая конфигурация изделия должна быть спроектирована как твердотельная 3D-модель с непрерывной структурой, соединенной по вертикальной и горизонтальной оси для соответствия значениям прочностных характеристик, полученных в результате компьютерного моделирования.

4. Безопорные свесы (консольные балки) размером >1 пикселя не допускаются.

5. Эффективная плотность элементарной ячейки — от 40% до 60% [134, 135].

В процессе исследования определены примеры критических производственных зон и установлены соответствующие контрмеры по их исправлению (таблица 9).

Таблица 9 — Критические зоны и их устранение

№	Описание критической зоны	Решение
1	Соединение с острыми краями	Скруглить
2	Горизонтальная стойка	Отрегулировать или использовать поддержки
3	Превышен максимальный диаметр	Уменьшить диаметр вручную

Продолжение таблицы 9.

4	Угол порога не соблюден	Отрегулировать угол, использовать поддержки
5	Не соблюден угол порога в функциональной зоне	Требуется постобработка, увеличить размер зоны, использование опорных структур
6	Соединение с острыми краями и нетехнологичным отверстием	Скруглить, заполнить отверстие
7	Горизонтальные скважины (поры)	Использовать поддержки, требуется постобработка
8	Излишнее накопление материала	Удаление материала
9	Несоответствие функциональных зон	Требуется постобработка, увеличить размер зоны
10	Несоответствие функциональных зон и излишние скопления материала	Требуется постобработка, увеличить размер зоны, удаление материала

Большинство критических мест составляют соединения с острыми кромками, не соблюдение углов, горизонтальные стойки или места, где превышен максимально допустимый диаметр. В случае соединений с острыми краями, которые склонны к концентрации напряжений и, следовательно, к преждевременному разрушению, подходящей мерой является закругление острых краев, чтобы уменьшить напряжения. В случаях, когда такой корректировки недостаточно, необходимо либо выбрать больший радиус скругления, либо выполнить оптимизацию повторно [79-81, 91, 137, 149, 142].

Применение в работе метода CSG (конструктивной твердотельной геометрии) характеризуется использованием набора заменяемых (переменных) и незаменяемых (фиксированных) узлов для получения каркасов триангуляции Делоне. Назначая радиус каждому узлу, можно получить набор перекрывающихся примитивов, связанных с разными узлами. Проводят анализ технологичности и проверку сплошной топологии, чтобы гарантировать правильность оптимизации. Рабочий процесс CSG, схематично представленный на рисунке 18, можно обобщить:

1. Определение фиксированных узлов
2. Определение предоптимальной рабочей области
3. Определение переменных (заменяемых) узлов
4. Генерация примитивной геометрии
5. Анализ технологичности
6. Проверка топологической оптимизации.

Рис. 18. Схематичный алгоритм метода CSG

Расширенный пример реализации данного метода представлен выше на рисунках 15-17. На рисунке 19 дана первичная подготовка изделия к оптимизации, контур заполняется рабочей областью, внутри которой рассчитывается сетка и множество соединенных между собой узлов.

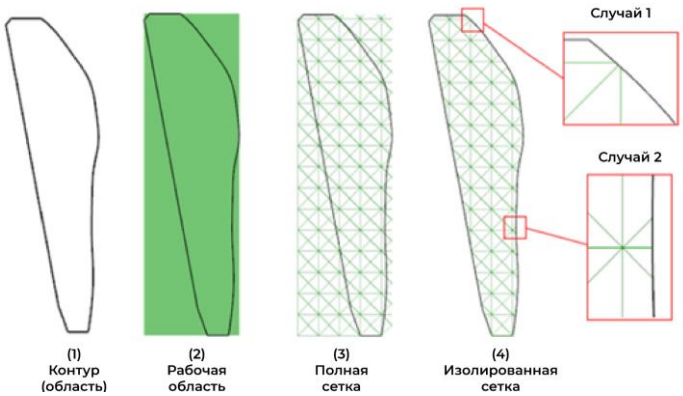


Рис. 19. Подготовка рабочей сетки модели [79, с. 6]

На рисунке 20 проводится ключевая операция, где близлежащие на контуре узлы соединяются в единый итоговый узел для упрощения сетки.

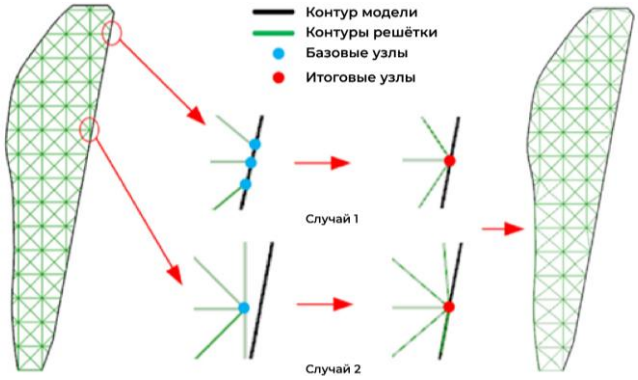


Рис. 20. Создание единых узлов перед этапом оптимизации [79, с. 7]

На рисунке 21 представлены варианты конструкций кронштейна различной оптимизации: первый вариант — классическая решетчатая структура по всему объему модели, третий вариант — ТО, выполненная в программе Ansys Mechanical, второй вариант — гибрид обеих технологий.

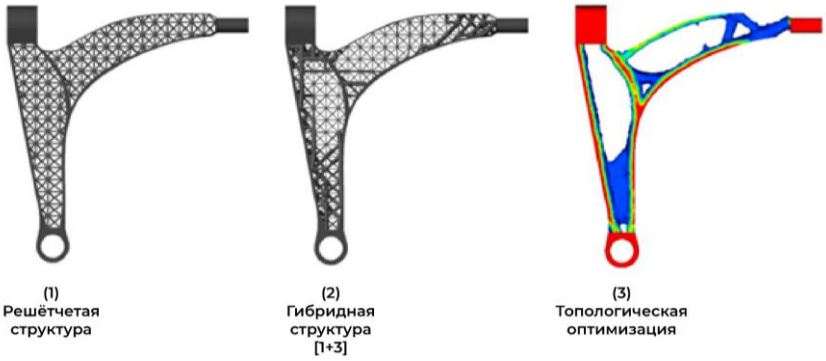


Рис. 21. Примеры оптимизации различными методами [79, с. 8]

Согласно исследованиям из литературного обзора, гибридный вариант показал наилучшие прочностные характеристики (на растяжение, сжатие, изгиб) при проведении испытаний. Данный образец позволяет убедиться, что с помощью гибридного метода удается получать эстетически привлекательные промышленные изделия [79, 81, 135].

После процесса ТО трехмерная модель состоит из ряда плоскостей с различной плотностью. Каждая грань конечных элементов обладает концентрационными напряжениями. Визуально, полученная в результате расчетов, новая оптимизированная модель имеет аморфные формы, меньший объем, неровности и множество грубых

переходов между плоскостями. В связи с этим данная 3D-модель имеет ограничения производства, необходима её постобработка.

Можно выделить 2 основных способа постобработки геометрии:

1. Первый способ наиболее трудный в исполнении. Для его реализации необходимо сначала импортировать в САПР оптимизированную геометрию, после чего на основе примитивов и инструментов построения создать новую трехмерную CAD-модель. Полученные модели наиболее технологичны и обладают наименьшим риском формирования концентраторов напряжений.

2. Второй способ – использование специализированного программного обеспечения для сглаживания сетки. Например, сглаживание сетки можно провести в Autodesk Meshmixer или ANSYS Spaceclaim Direct Modeler. Применяются операции Shrinkwrap, Smooth и Reduce до получения желаемого вида поверхности [102].

Для достижения корректной бионической формы модели, полученной по технологии ТО, необходимо произвести операции по удалению ненужных кривых и реализации плавных переходов через закругление углов, чтобы сделать вид модели эстетичнее, что одинаково важно для изделий художественного и промышленного назначения. На рисунке 22 представлены этапы создания 3D-модели (1), результат ТО (2) и итоговый вариант постобработки изделия (3).

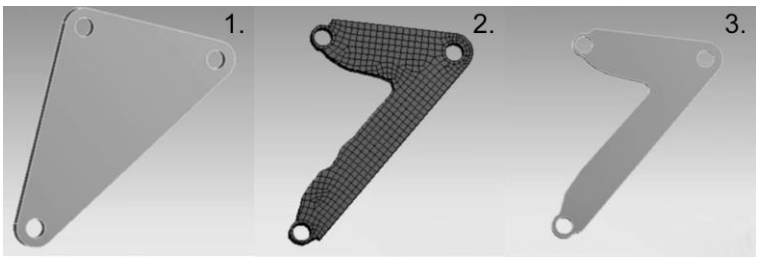


Рис. 22. Этапы топологической оптимизации 3D-модели

ТО как технология создания оригинальной конфигурации моделей позволяет расширить способы проектирования ювелирных и художественных изделий.

3.3 Формирование алгоритмов топологической оптимизации ювелирных и художественных изделий

В общем виде топологическая оптимизация, как и любой технологический цикл состоит из базовых и опциональных этапов. Для производства художественной модели с

применением ТО был определён универсальный алгоритм с поиском паттерна оптимизации, представленный на рисунке 23.

Рис. 23. Алгоритм поиска паттерна оптимизации художественного изделия

При печати моделей с отверстиями надо учитывать возможную усадку материала и рассчитать коэффициент его усадки. Этапы алгоритма содержат также опциональные решения, в таблице 10 собраны вариации параметров для каждой операции.

Таблица 10 — Перечень основных операций топологической оптимизации

Операция	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Крепления (fixtures)	Полигональная геометрия	Слайдер, вал, ролик	Петля, округлый крепёж	-
Внешняя нагрузка (external loads)	Прямое приложение силы	Крутящий момент	-	-
Цели и ограничения	Наилучшее соотношение снижения веса и прочности	Снижение максимального показателя смещения	Максимальное уменьшение массы изделия	-
Требования по производству	Добавление неизменяемых областей	Указание максимальной, минимальной толщины	Направление разъема пресс-формы	Указать плоскости симметрии модели
Направление разъема пресс-формы	Двухсторонний разъем	Разъем через выдавливание (штамповка)	Разъем через вытягивание	-
Соотношение симметричности	1/2	1/4	1/8	-
Построение сетки оптимизации	Плотность сетки	Максимальный размер элемента	Минимальный размер элемента	Соотношение роста элементов

Продолжение таблицы 10.

Модификация результата	Изменение массы материала	Количество циклов сглаживания	-	-
Сохранение сетки оптимизации	Актуальная конфигурация модели	Новая конфигурация	Новая деталь отдельным файлом	-
Сохранение файла оптимизации	Графический объект	Твердотельный объект	Полигональный объект	-

Одно из преимуществ ювелирных изделий в бионическом стиле заключается в возможности закрепления камней по новой методике за счет гармонизированной формы вставок, благодаря необычным формам украшения, что придает новую игру красок и блеска драгоценным камням. Ажурные формы бионических изделий позволяют свету проникать с различных углов, улучшая оптические свойства драгоценных камней, что позволяет им более эффективно взаимодействовать со светом, усиливая их блеск и сияние.

Ювелирные и художественные бионические отливки рекомендуется производить из сплавов на основе меди (бронза, латунь) или драгоценных металлов. Схема технологического процесса изготовления ювелирных и художественных отливок представлена на рисунке 24.

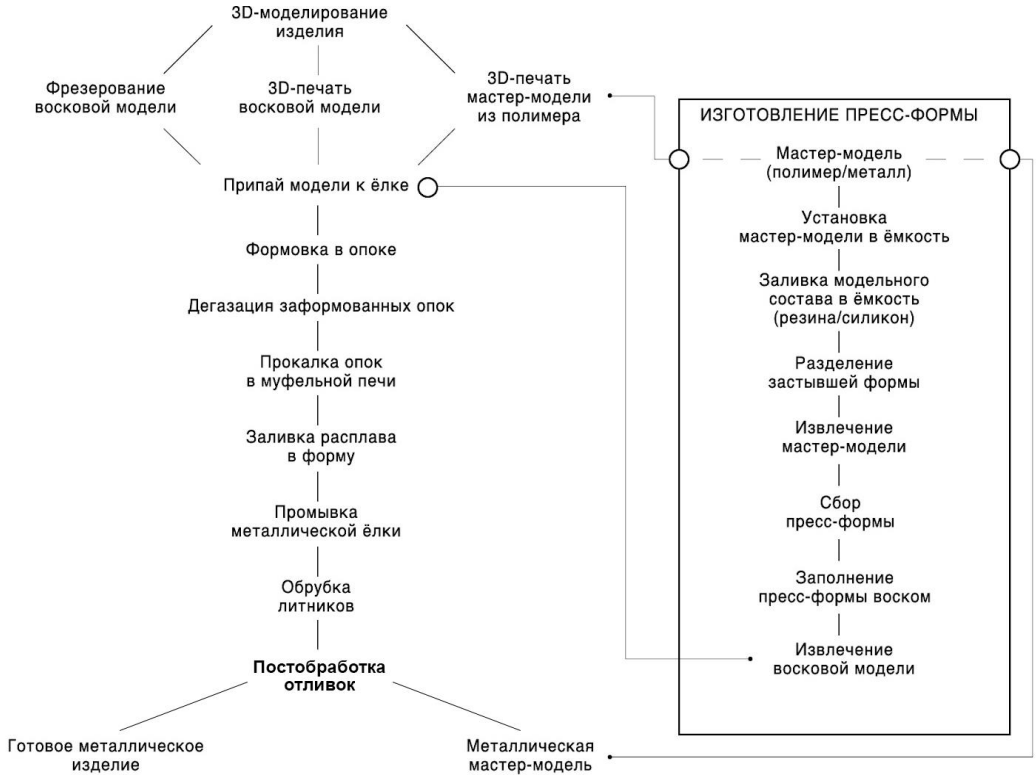


Рис. 24. Схема технологического процесса изготовления ювелирных и художественных отливок

В таблице 11 приведены структурные вариации 3D-моделей и ограничения АТ.

Таблица 11 — Производственные ограничения аддитивных технологий (АТ)

	Открытые стенки	Закрытые стенки	Опорные конструкции (поддержки)	Тиснение и гравировка	Горизонтальные балки	Размер отверстий	Минимальный размер стенки	Диаметр крепления
	Стенки, которые прикреплены к конструкции с одной стороны	Стенки, которые прикреплены к конструкции, как минимум, с двух сторон	Наибольший угол, при котором печать идет без поддержек	Паттерны и текст, который выпуклый или впалый на поверхности	Длина балки, которую можно распечатать без поддержек	Минимальный диаметр отверстия	Рекомендуемый минимальный размер стенки	Минимальный диаметр печатаемого крепления (pin)
Метод послойного наплавления (FDM)	0.75 мм	0.8 мм	45°	2 мм	150 мм	2 мм	2 мм	2.5 мм
Стереолитография (SLA/DLP)	0.5 мм	1 мм	Всегда	1) 0.1 мм 2) 0.3 мм	Нет	0.5 мм	0.2 мм	0.5 мм
Селективное лазерное спекание (SLS)	Нет	0.7 мм	Нет	1 мм	Нет	2 мм	0.8 мм	1 мм
Многоструйная печать (MJP)	0.9 мм	1 мм	Всегда	0.5-0.6 мм	Нет	0.5 мм	0.4 мм	0.5 мм

Полученные значения сформированы на основании компьютерного моделирования в программном обеспечении 3D Sprint, Modelworks, Ultimaker Cura, Preform для симуляции трехмерной печати, научных публикаций и практического опыта работы с аддитивными технологиями. Сформированный алгоритм работы с параметрами и ограничениями ТО позволит применять её в качестве инструмента для создания уникальных ювелирных и художественных изделий.

Реализация исходной формы кулона началась с создания эскиза и 3D-модели листовидной болванки, представленных на рисунке 25.

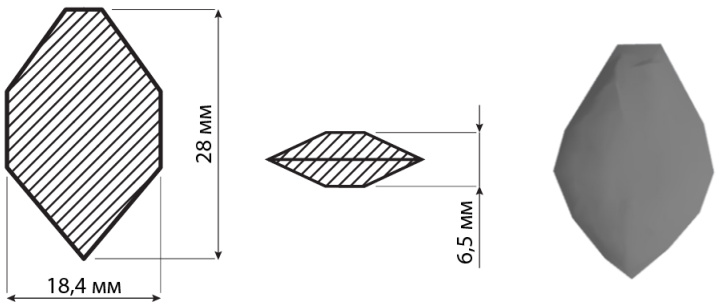


Рис. 25. Эскиз кулона и болванка в форме листа для оптимизации

Как было указано ранее, первым шагом в алгоритме проведения ТО является поиск паттерна оптимизации с учетом вида проектируемого изделия, заложенного в нем

функционала и заданных условий эксплуатации. Ювелирные изделия не предполагают частого или длительного приложения силовой нагрузки, однако при поиске паттерна это является обязательным условием, в связи с чем к модели в специализированном программном обеспечении были приложены силы для анализа прочностных характеристик [154]. Для получения паттерна напряжения модель проходила прочностные испытания на сжатие, изгиб и виброустойчивость.

Целью оптимизации 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.

В процессе оптимизации и по её результату можно ознакомиться, как менялось состояние модели по ходу каждого блока итераций. На рисунке 26 представлен график постепенного снижения массы изделия от изначальной массы к поставленной цели оптимизации.

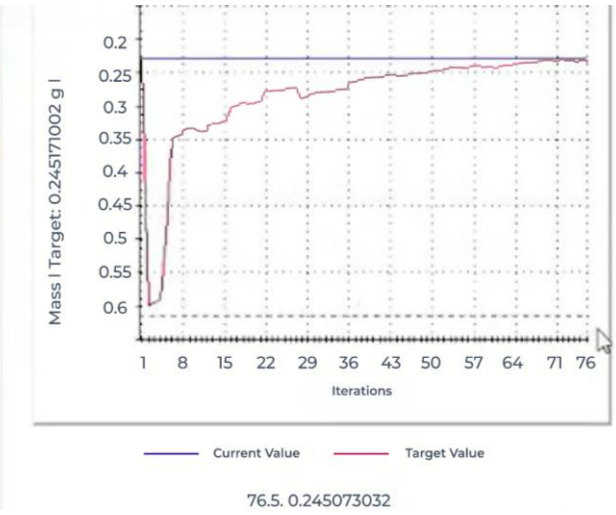


Рис. 26. График оптимизации: изменение массы изделия

Идея разработки данного кулона заключается в совмещении двух отдельных несвязанных структур, полученных при различных испытаниях. Это необходимо для получения объемной структуры с контрастными толщинами стенок, которые при реализации из драгоценного металла имеют особую игру красок, сочетание блеска и теней [156]. Близкие к итоговым паттерны оптимизации были получены на рисунке 27.

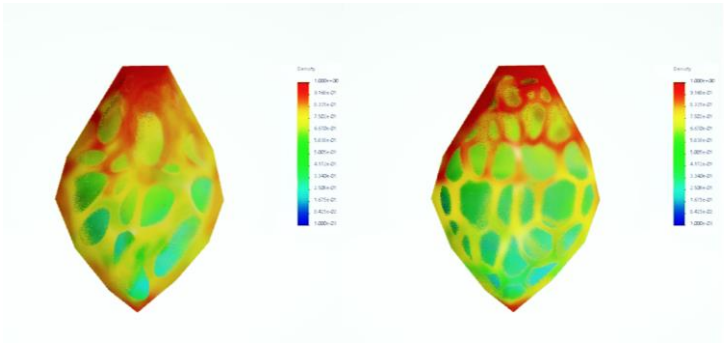


Рис. 27. Формируемые напряжения в модели под нагрузкой

Структурно после постобработки результаты ТО представлены на рисунке 28.

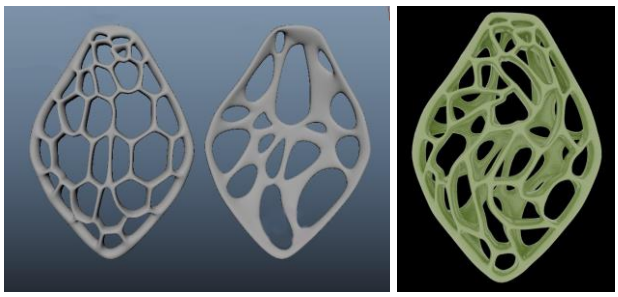


Рис. 28. Оптимизированная геометрия кулона

Проверка габаритов модели производится для определения погрешности в линейных размерах изделия и соответствия допускам. Также стоит отметить соотношение веса и объема затраченного материала оптимизированной и изначальной модели [157]. На рисунке 29 можно заметить практически двукратное сокращение объема бионической модели.

Рис. 29. Сравнение моделей со сплошной и бионической структурой

Для создания исходной формы браслета, был нарисован эскиз (рисунок 30) и создана 3D-модель тороидальной формы (рисунок 31). Общий диаметр модели составил 103 мм, а диаметр сечения тора — 12,9 мм.

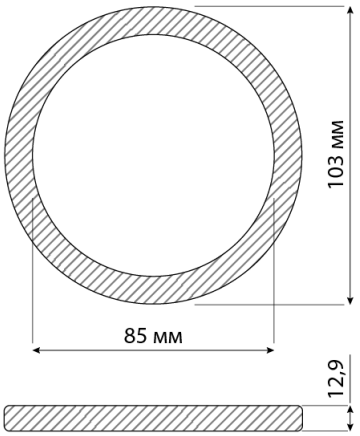


Рис. 30. Эскиз модели браслета

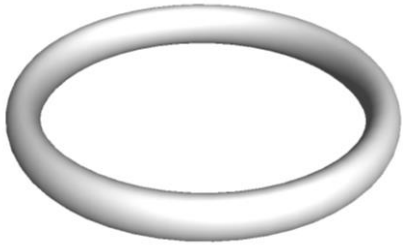


Рис. 31. Болванка тороидальной формы для оптимизации

В пункте 1.1.34 ОСТ 117-3-002-95 (Отраслевой стандарт. Изделия ювелирные из драгоценных металлов. Общие технические условия) указано, что браслеты для часов должны выдерживать статическое усилие на разрыв не менее 29,4 Н (3,0 кгс). Данный пункт стандарта в рамках проводимого исследования был принят за основу по причине подобия браслетов для часов и декоративных, а также отсутствия стандартизированной информации о прочностных испытаниях декоративных браслетов [159].

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 исключительно малыми моделями [Vм < 500 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 краев модели [156-158].

При анализе поведения и напряжений в моделях под действием внешних сил были отобраны варианты паттернов для создания финального варианта прототипа браслета. Произведена отбраковка вариантов, несоответствующих технологическим ограничениям

литейного процесса и варианты, обладающие недостаточной эстетической привлекательностью. Исправлены дефекты оптимизации, произведено сглаживание структуры. На рисунке 32 продемонстрирован вариант конечного паттерна напряжений, который был отобран для продолжения работы. Структурно после постобработки результаты ТО модели представлены на рисунке 33.

Рис. 32. Формируемые напряжения в модели под нагрузкой

Рис. 33. Вариант паттерна оптимизации после постобработки

Проверка габаритов модели производится для определения погрешности в линейных размерах изделия и соответствия допускам. Также стоит отметить соотношение веса и объема затраченного материала оптимизированной и изначальной модели. На рисунке 34 можно заметить двукратное сокращение объема бионической модели.

Рис. 34. Сравнение моделей со сплошной и бионической структурой

Аналогично проводится проверка сечений в программе Materialise Magics под задачи литья (рисунок 35). Стоит отметить, что в новом варианте структуры максимальное

различие в сечении соприкасающихся стенок модели составляет не более 0,08 мм, а максимальное значение сечения стенки не превышает 1,05 мм.

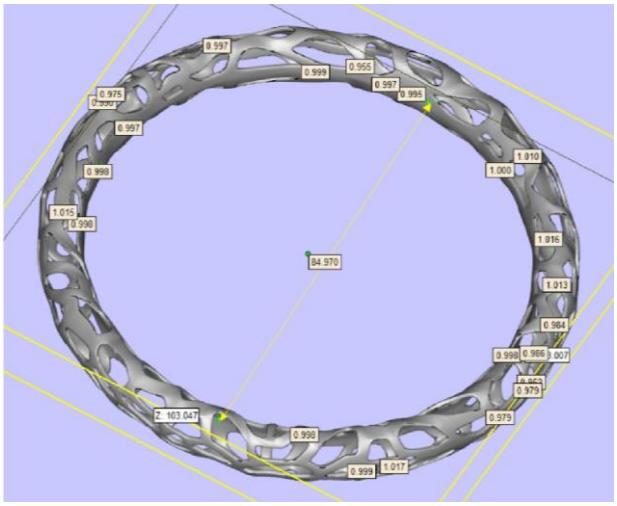


Рис. 35. Проверка сечений модели в Materialise Magics

Для визуализации концепта разрабатываемого изделия реализованы художественные рендеры моделей, представленные на рисунке 36.

Рис. 36. Рендеры спроектированных изделий

Было произведено послойное разделение моделей (слайсинг), установка поддерживающих структур и форматирование в программном обеспечении 3D Sprint для дальнейшего запуска трёхмерной печати на оборудовании ProJet CPX 3510.

3.4 Разработка программного обеспечения по подбору алгоритма топологической оптимизации ювелирных и художественных изделий для последующего аддитивного и литейного производства

3.4.1 Описание программы

Разработанное программное обеспечение «TechOpt» предназначено 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 ТО. Массив данных, полученный в ходе исследований, структурирован в табличном формате и представлен в виде справочного материала. Программа написана на языке VBA [166, 167].

Программное обеспечение предназначено для специалистов в области дизайна, аддитивного и литейного производства с целью расширения применения ТО при изготовлении художественных и ювелирных изделий. Формируемый алгоритм позволяет использовать ТО как прикладной инструмент по получению облегченных изделий с оригинальными узорами и структурами. 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.

Окно установки значений параметров и пример справочного окна «Тип геометрии» изображены на рисунках 37 и 38 соответственно.

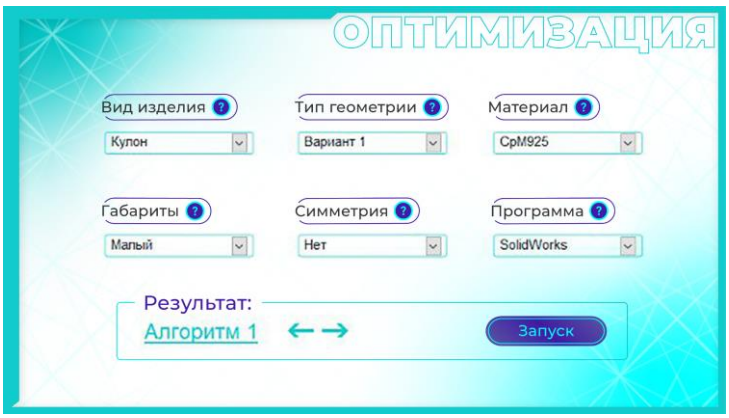


Рис. 37. Окно подбора алгоритма оптимизации

Рис. 38. Справка «Тип геометрии»

Алгоритм работы программы:

1) Загрузка разработанных таблиц и модулей для подбора алгоритма оптимизации, вывод параметров и их значений;
2) Инициализация подбора алгоритма оптимизации по выбранным пользователем параметрам;
3) Вывод полученного результата на экран пользователя;
4) Представление поэтапного алгоритма оптимизации, согласно заданным пользователем условиям и ограничениям;
5) Закрытие модуля подбора алгоритма оптимизации, загрузка значений и параметров по подбору аддитивных технологий для создания оптимизированного изделия;
6) Сортировка соответствующих технологий по выбранным пользователем параметрам;
7) Подобранные варианты АТ выводятся на экран в поле результатов;
8) Отображение справочного материала о подобранных технологиях.

Алгоритм оптимизации формируется в виде руководства для пользователя, исходя из заданных им параметров (рисунок 39 и Б.1).

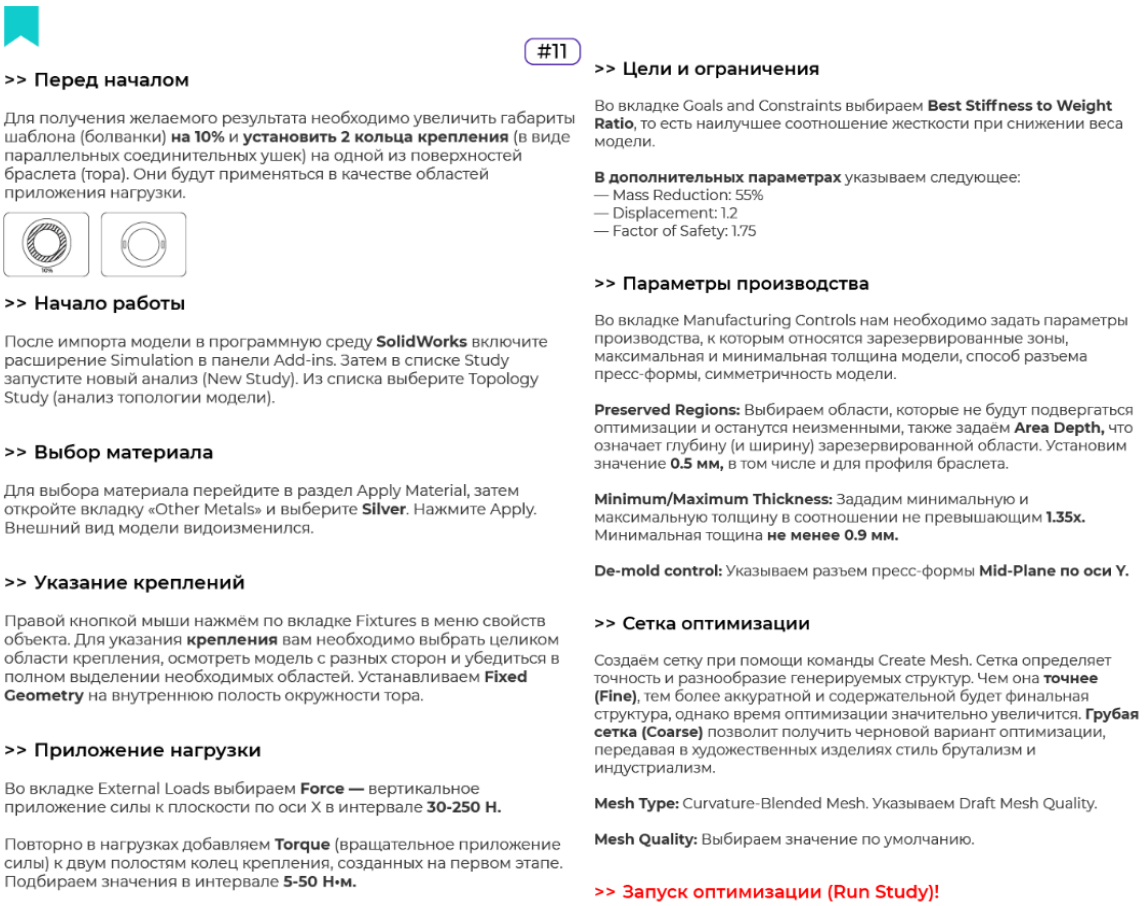


Рис. 39. Пример вывода результата подбора алгоритма оптимизации

Второй модуль программы предназначен для подбора наиболее эффективного варианта аддитивной технологии для производства литейной модели в результате оптимизации (рисунок 40).

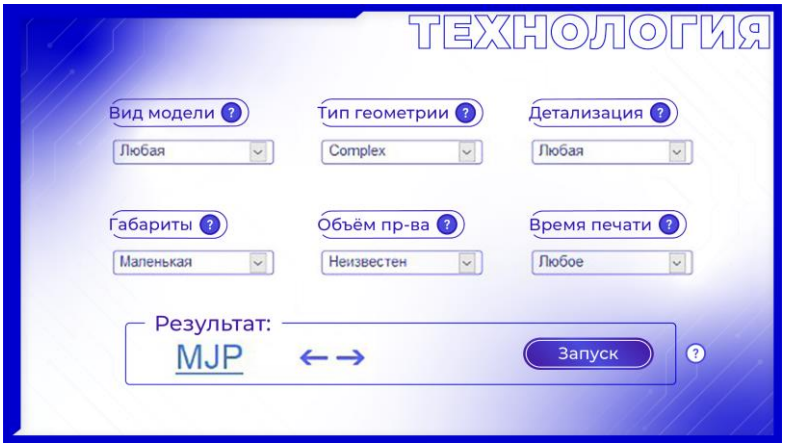


Рис. 40. Окно подбора аддитивной технологии

Реализована справочная информация для каждого из параметров подбора технологии. Пример справки для параметра «Детализация» представлен на рисунке 41.

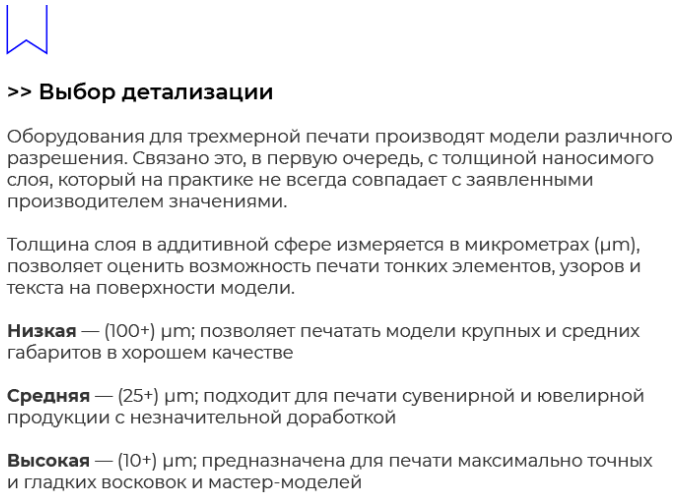


Рис. 41. Пример справочного окна о параметре подбора технологии «Детализация»

Примеры справочных окон об основных операциях ТО и параметрах подбора аддитивной технологии представлены в приложении Б на рисунках Б.2-Б.3.

Приложение было написано на языке Visual Basic под операционную систему Windows. Полученные результаты зарегистрированы в качестве программного обеспечения для ЭВМ в реестре Роспатента, что подтверждается свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024616416 [168].

3.4.2 Параметры и принцип подбора алгоритма оптимизации

Использование любого высококачественного программного обеспечения должно сопровождаться справочной информацией по его применению.

Ниже представлена справочная информация для каждого параметра и его значений по подбору топологической оптимизации:

1) Вид изделия: Отобраны варианты изделий, получившие экспериментальное подтверждение по реализации высококачественного художественного продукта с применением технологии ТО.

Значения: Кулон, Браслет, Светильник

2) Тип геометрии: Выделены 3 варианта паттернов, наиболее часто получаемых в результате оптимизации и придающих изделию оригинальность и эстетическую привлекательность. Варианты получены на основе разработки сгенерированных и оптимизированных моделей и анализа особенностей их структуры. Варианты конфигурации представлены на рисунке 42.

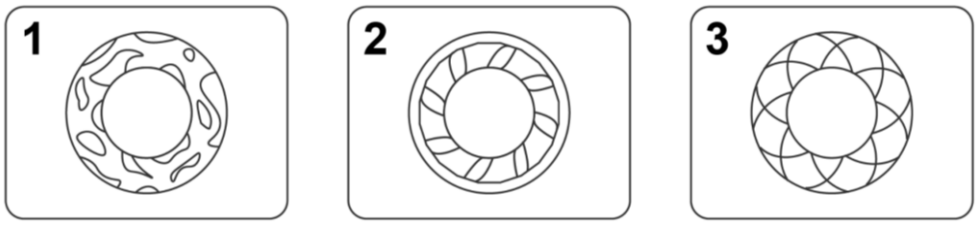


Рис. 42. Варианты конфигурации оптимизированной модели

Вариант 1: Bionic — Крупный рельефный узор, малое количество отверстий и скруглений, низкополигональная основа;

Вариант 2: MinMass — Многослойный каркас, витиеватая структура с множеством отверстий различного размера и формы, гладкие места контакта стенок и множественные скругления углов;

Вариант 3: Warp Net — Внутренние элементы, волнистый каркас, хаотичная структура, решетчатые вставки, переход от объемного к плоскому и комплексное сочетание представленных вариантов.

3) Выбор материала: Представлены материалы, применение которых опробовано экспериментально для получения высококачественных художественных изделий с применением технологии ТО.

Значения: CpM925, PLA, ABS

CpM925 — Серебро 925 пробы — 92.5% Ag, 7.5 Cu;

PLA — Полилактид (биоразлагаемый нетоксичный пластик);

ABS — Акрилонитрилбутадиенстирол (прочный, хорошо обрабатываемый пластик).

4) Габариты изделия: Критерии габаритов моделей определяются индивидуально для каждого вида изделия. Кулон — длина наибольшей стороны, браслет — высота/длина тора, светильник — высота/диаметр основания цилиндра. Все значения представлены в миллиметрах (мм).

На рисунке 43 представлены соответствующие интервалы значений для каждого вида изделия.

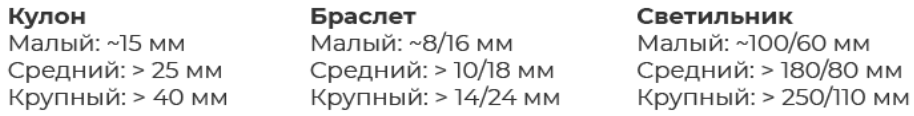


Рис. 43. Интервалы значений габаритов для оптимизируемых изделий

5) Симметричность структуры: Указание симметрии позволяет задать области идентичные по структуре, относительно одной или нескольких осей в оптимизированном варианте. Для 1/2 симметрии модели (симметричность половин) потребуется задать одну плоскость (из X, Y, Z), для 1/4 — две, для 1/8 — три.

6) Программное обеспечение: Перечень программного обеспечения, предоставляющего пользователю инструмент ТО, вариации параметров которого адекватны для разработки ювелирных и художественных изделий.

Пример матрицы формируемого алгоритма и соответствующие значения параметров (целей, условий, ограничений), которые необходимо задать в программе для формирования сетки и запуска оптимизации, представлены в таблице 12.

Таблица 12 — Матрица значений параметров оптимизации

Alg	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ext	2	3	3	3	2	3	2	2	2	2	3	2
Kp_1	Fx	Hn	Fx	Fx	Hn	Fx	Fx	Hn	Fx	Fx	Fx	Fx
H_1^F	20-150	20-150	20-150	20-220	20-220	20-220	30-300	30-300	30-300	30-180	30-250	30-200
H_2	T3, 2.5-25	R4, 20-150	F2, 20-100	T3, 5-50	R4, 20-150	F2, 20-100	T3, 12.5-25	R4, 30-200	F2, 20-100	T3, 2.5-25	T3, 5-50	T3, 12.5-25

Продолжение таблицы 12.

Alg	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
G	BWR	MR	BWR	BWR	MR	BWR	BWR	BWR	BWR	BWR	BWR	BWR
MR	60%	80%	70%	50%	80%	70%	50%	70%	60%	55%	55%	50%
DSP	1.2	1.4	1.4	1.2	1.4	1.4	1.4	1.8	1.8	1.2	1.2	1.4
FoS	1.25	1.1	—	1.75	1.25	—	2	1.75	1.25	1.25	1.75	1.5
PR^d	0.2	0.2	0.2	0.3F	0.3	0.3F	2F	3	2F	0.3	0.5F	1.5F
min/ max thick	1.5x	—	1.35x	1.5x	—	1.35x	—	—	—	1.35x	1.35x	—
D-M	MP, x	MP, x	S	MP, y	MP, y	S	MP, x	MP, x	S	MP, x	MP, y	MP, x
Mesh	C-B-M	S	C-B-M (dr)	C-B-M	S	C-B-M (dr)	S	S	C-B-M (dr)	C-B-M	C-B-M	S
F/C	M-F	C	M	M-F	C	M	M	C	M	M	M	M-F

Расшифровка аббревиатур параметров оптимизации из таблицы 14 представлены в таблице 13.

Таблица 13 — Расшифровка аббревиатур из таблицы 12

Alg	Системный номер алгоритма
Ext	Вариант модификации структуры
$Кр_1$	Вид крепления
H_1^F	Приложение вертикальной нагрузки к изделию, Н
H_2	Дополнительная нагрузка, Н
G	Цель оптимизации
MR	Снижение массы
DSP	Коэффициент смещения
FoS	Показатель запаса прочности
PRd	Глубина зарезервированной (неизменяемой) области, мм
Min/Max thick	Соотношение минимальной к максимальной толщине сечения
D-M	Направление разъема пресс-формы
Mesh	Тип сетки оптимизации
F/C	Разрешение сетки оптимизации

Последовательное указание значений из выборки и выполнение этапов алгоритма позволит модифицировать конфигурацию исходной модели. Несмотря на обширный

перечень параметров и их значений, свобода для творчества и введение собственных значений оптимизации допускаются для получения оригинальных вариантов структуры.

Данная работа подтверждает, что ТО рассматривается не как отдельный от технологического цикла инструмент, а как полноценная технология по получению облегченных изделий с оригинальными узорами и структурами.

3.4.3 Перспективы расширения функционала приложения

В расширенном варианте приложения пользователю будет доступен выбор облачных серверов, программного обеспечения для оптимизации, базовая настройка заполнения модели материалом при оптимизации, просмотр вариантов полученных на разных итерациях, выгрузка стандартной модели, загрузка оптимизированной модели, сохранение скриншотов, ориентация модели в пространстве программы, справочное руководство по использованию программы и теоретическая информация о бионическом дизайне и топологической оптимизации, а также индикатор ошибок, позволяющий определить неточности для 3D-печати в загруженной модели (рисунок 44).

Перспектива разработки приложения заключается в предоставление пользователю упрощенной настройки процесса ТО разных программных продуктов (например, Ansys Mechanical, SolidWorks, Altair Optistruct и прочие) через российские облачные сервисы (VK Cloud) для применения программы на компьютерах с низкой производительностью.

Рис. 44. Вариант интерфейса приложения

Дополнительно должна быть реализована справочная информация (в том числе с короткими видеороликами) для каждого вида стандартных ошибок, возникающих в

моделях, с целью подтверждения правильности их подготовки для дальнейшей трехмерной печати. Пример справочного окна представлен на рисунке 45.

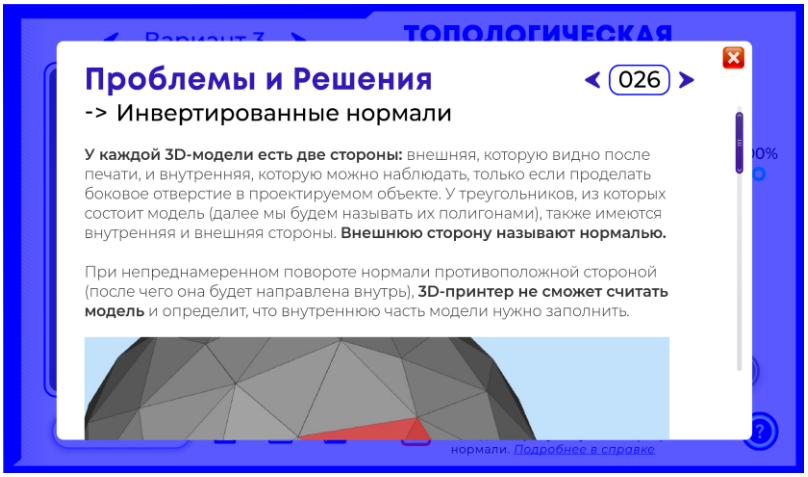


Рис. 45. Справочная информация об ошибке в модели

Реализация приложения данного класса формирует доступную единую систему по топологической оптимизации изделий. Для этого необходимо осуществить развертывание виртуальных машин на серверах, к каждой из которых предоставляется удаленный доступ. В Microsoft имеется стандартный корпоративный функционал — Azure Virtual Desktop.

Из приложения направляется http-запрос на машину, где установлены приложения, и при получении этого запроса будет запускаться скрипт образца «RUN Solidworks.exe». На оборудовании, к которому запрашивается доступ, должен быть запущен веб-сервер для принятия запроса.

Разрабатываемое приложение также должно заниматься авторизацией, чтобы предотвратить хакерские атаки и простой активной сессии у пользователей (IDLE-статус), а также осуществлять выделение серверов и раздачу квот (для подключения).

Актуальность разработки заключается в действующих санкциях и значительно возросших ценах на программное обеспечение. Ограничениями разработки являются блокировка VPN-сервисов на территории Российской Федерации и необходимость значительных финансовых вложений для закупки, настройки оборудования и оформления подписки на различные веб-сервисы для формирования и запуска процессов.

4 Разработка методики подбора аддитивной технологии и материала изготовления литейных моделей ювелирных и художественных изделий

4.1 Разработка принципов классифицирования моделей ювелирных и художественных изделий для цифровизации литейного производства

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, были выделены наиболее часто используемые дизайн-решения в моделях художественных изделий и технология их изготовления в таблице 14.

Таблица 14 — Особенности конфигурации моделей и приоритетный способ их реализации

№	Отличительные характеристики конфигурации модели	Вид печати
1	Полигональная фигура без скруглений, острые углы. Приоритетной задачей при изготовлении подобного рода изделия является возможность передачи его фактуры, нежели точность и гладкость поверхности.	FDM
2	Ювелирное украшение в виде кольца с простым узором на внешней части изделия. По причине малой габаритности ($V < 1$ см^3) и наличия простого геометрического узора появляется необходимость применения способа печати, который отразит необходимое качество паттерна и не станет причиной значительного увеличения себестоимости модели.	SLA/ DLP
3	Полые модели с рельефным и четко выраженным узором ($b > 0{,}1$ см). Изделия такого вида является полыми внутри по своей сути, однако обладают внутренними поддержками. Модель делят на несколько частей и спаивают по результатам литья. По причине того, что модель необходимо будет разделить на 2 части, а осуществить печать обоих кусков возможно одновременно, то будем рассматривать печать отдельных половин изделий данного типа.	DLP
4	Декоративное кольцо с гербом, крупным фактурным объектом или символом ($b > 0{,}5$ см). Сложностью являются маленькие размеры изделия и деталей изображаемого объекта, что делает реализацию точных границ фактуры еще более трудоемкой. В данном случае потребуется высокая точность печати модели, дополнительное создание опорных структур, которые необходимо удалять с ювелирной точностью.	MJP
5	Крупногабаритные ($V > 100$ см^3, $h > 25$ см) человеческие бюсты и предметы награждения (кубки, трофеи). Все элементы достаточно крупного размера, в результате необходимо получить меньшую себестоимость модели.	SLS/ FDM
6	Плоские модели с тончайшими узорами на поверхности ($b < 0{,}1$ см). Необходима высокая точность печатающего устройства для передачи как основных фактур объекта, так и небольших очертаний изображений или узоров на поверхностях изделия. Печать опорных структур минимальна в таком случае.	SLA
7	Модели в бионическом (ажурном) стиле. При печати бионических моделей особое внимание уделяется работе с опорными структурами, устанавливаемых в отверстиях и внутренней полости модели. Для печати бионических структур наиболее подходящим вариантом является многоструйная 3D-печать, позволяющая, благодаря использованию вспомогательного материала для печати поддерживающих структур, упростить постобработку готовых напечатанных моделей, быстрее отправить объект на последующие технологические этапы.	MJP

Продолжение таблицы 14.

8	Печать детализированных сувенирных объектов в виде зверей, людей, различных персонажей и прочего. Для печати подобного рода моделей потребуется технология, предоставляющая максимально четкое и гладкое качество поверхности по причине возможного возникновения трудностей постобработки напечатанной модели, в связи с особенностями фактур, а также требованием высокой точности печати в части головы, туловища, рук, ног у моделей.	SLA
9	Волнистые переливы и скрещивания бионических структур в миниатюрных моделях ($V < 0,5$ см^3). Есть необходимость точной печати поддерживающих структур, это является значительным фактором при создании подобных объектов, которые местами будут смешиваться с ячеистой структурой поверхности, что приводит к желаемому применению легкоплавкого материала отличного от основного материала печатаемой модели, а также высококачественная печать по причине большого числа малых отверстий ($x < 0,5$ см), которые являются одной из основных составляющих дизайна моделей данного вида.	MJP
10	Сетчатые волнистые нависающие модели. Самая сложная задача при работе с 3D-печатью, так как для воспроизведения подобного изделия требуется высокое качество и точность печати, обеспечивающее отображение мельчайших деталей ($b < 0,1$ см), легкоплавкий материал поддержек в большом объеме, а также максимально аккуратную постобработку напечатанного изделия, ввиду его хрупких и тонких контуров, присутствующих на большей части модели. Задача усложняется тем, что размеры изделия маленькие, а создаваемые отверстия получаются крошечными ($x < 0,2$ см), поэтому необходима технология 3D-печати, обеспечивающая наивысшую точность, а также требуется использовать быстрозастывающие материалы модели, не взаимодействующие с материалом поддержки. Качественное ручное удаление поддерживающих конструкций в данном случае является практически невозможным.	MJP
V – объем модели, см3; h – высота модели, см; b – высота контура, см; x – максимальная длина отверстия, см		

На основании полученных данных о конфигурациях моделей была сформирована таблица 15 с отобранным для исследования перечнем аддитивных технологий.

Таблица 15 — Сравнительная таблица аддитивных технологий и конфигураций художественных моделей

Вид технологии	Особенности и реализуемые виды моделей
FDM	Полигональные фигуры без скруглений, художественные изделия простой конфигурации.
SLA	Ювелирные украшения с комплексным узором на внешней части изделия. Волнистые переливы и скрещивания бионических структур в миниатюрных моделях ($V < 0,5$ см3). Печать детализированных сувенирных объектов в виде зверей, людей, различных персонажей.
SLS	Крупногабаритные ($V > 100$ см3, $h > 25$ см) человеческие бюсты и предметы награждения (кубки, трофеи).
MJP	Ажурные модели с волнистой многоуровневой структурой. Бионические модели и ювелирные изделия с тонкостенной и сложногеометрической структурой.
DLP	Полые модели с рельефным и четко выраженным узором ($b > 0,5$ см). Ювелирные украшения с простым узором на внешней части изделия.
V – объем модели, см3; h – высота модели, см; b – высота контура, см	

В связи с огромным перечнем возможных геометрических решений в создаваемых 3D-моделях для последующей печати необходимо заниматься классификацией структур и

анализировать проблемные зоны каждой модели, тем самым создавая массив полезных данных для реализации специализированной базы данных или программного обеспечения. Особенно это важно при реализации бионических структур, которые обладают особой сложностью, однако имеют высокую художественную ценность.

4.2 Определение параметров подбора аддитивной технологии и материала изготовления литейной модели

Сформирован ряд параметров и их значений для подбора аддитивной технологии изготовления литейной или мастер-модели художественного изделия.

Первым и наиболее важным параметром для выбора аддитивной технологии является определение сложности геометрии печатаемой модели.

В качестве моделей с геометрией низкой сложности определены изделия простой конфигурации, обладающие достаточно крупным рельефным узором высотой более 2 мм и прочие низкополигональные модели, к средним — изделия с многослойным каркасом, узорами высотой до 2 мм, бионической структурой и подобными решениями, а высокая геометрическая сложность характеризуется внутренними элементами, волнистым каркасом, хаотичной структурой и комплексным сочетанием представленных вариантов у рассматриваемой модели [4, 6, 127-130].

Применение вспомогательного (легкоплавкого/растворимого) материала поддержек при печати моделей со сложной геометрией увеличивает эффективность работ, благодаря сокращению временных и трудовых затрат на её удаление специалистом.

Аддитивные технологии различаются по скорости печати. Данный параметр зависит от характеристик 3D-принтера и параметров печати — процента заполнения модели материалом, установленной толщины слоя печати. Критерии скоростей для каждой технологии печати устанавливались на основании практических наблюдений, проанализированных литературных источников и применения программного обеспечения компаний-производителей 3D-оборудования, позволяющего определить время печати платформы моделей для выбранного 3D-принтера [6, 59, 61, 126-129].

Образец печати: 12 пустотелых шаров, толщина стенки — 5 мм, диаметр шара — 40 мм. Высокая скорость печати оборудования означает, что рост платформы моделей займет менее 12 часов, средняя — от 12 до 24 часов, низкая — более 24 часов.

Для реализации моделей ювелирных изделий необходима высокая точность печати. Связано это с необходимостью создания узоров, паттернов, текстовых блоков и прочих тонких элементов на изделии. Ограничением является толщина наносимого слоя печати.

Стоит отметить, что понятия точность и разрешение не являются синонимами. Точность определяет размерные отличия полученного изделия от его заданной в программном обеспечении формы. Параметрами точности могут являться средний показатель расхождения линейных размеров детали или конкретная точка с максимальным расхождением от цифрового оригинала [4, 6, 61, 127, 130].

Разрешение характеризует уровень детализации, теоретически возможный для 3D-принтера исходя из его технических характеристик. Высокое разрешение не является прямым указанием на высокую точности 3D-печати.

Шаг сканирования в стереолитографии — это расстояние между центрами каждого лазерного пятна. Луч не движется постоянно, а светит в определенные точки вдоль траектории через определенные промежутки времени. Пятна частично перекрывают друг друга, связывая отвержденные области печати.

Шаг сканирования определяет степень перекрытия, что существенно влияет как на точность, так и на скорость работы. Если шаг сканирования мал, то по краям остается меньше неотвержденной смолы, поверхности получаются более гладкими, но увеличивается продолжительность печати [18, 124-126].

К низкой детализации печати относится толщина печатаемого слоя в 100 микрон и более, что позволяет печатать исключительно модели крупных и средних габаритов в хорошем качестве, средняя детализация — 35 микрон и более, что подходит для печати сувенирной и ювелирной продукции с незначительной доработкой, а высокая позволяет печатать слои толщиной вплоть до 10 микрон и непосредственно предназначена для печати максимально точных и гладких восковых и мастер-моделей.

Помимо печати ювелирных моделей, существует практика печати и литья сувенирной и наградной продукции, которые иногда отличаются значительно более крупными габаритами. Основное ограничение, накладываемое на максимальные габариты реализуемой модели, имеет высота области печати 3D-принтера. Представлены ориентировочные размеры 3D-моделей в миллиметрах. Маленькая трехмерная модель будет иметь длину наиболее продолговатой стороны менее 50 мм, средняя — менее 175 мм, у больших моделей размер наибольшей стороны будет составлять более 250 мм [6, 127].

Модели также имеют различное назначение в ЛВМ, их стоит подразделять на выжигаемые, выплавляемые и мастер-модели. Выжигаемые модели создаются из пластика и фотополимеров, что требует их выжигания из формы при строгом соблюдении температурных режимов, выплавляемые также являются восковыми моделями, которые вытапливают из формы в бойлерклаве или муфельной печи при температуре свыше 150 ^{o}C, а мастер-модель необходима для создания по ней силиконовой пресс-формы, в которую под

давлением подается воск из инжектора, что позволит значительно быстрее получить партию выплавляемых моделей.

Определены параметры по подбору технологии 3D-печати модели для последующего ювелирного и художественного литья (рисунок 46).

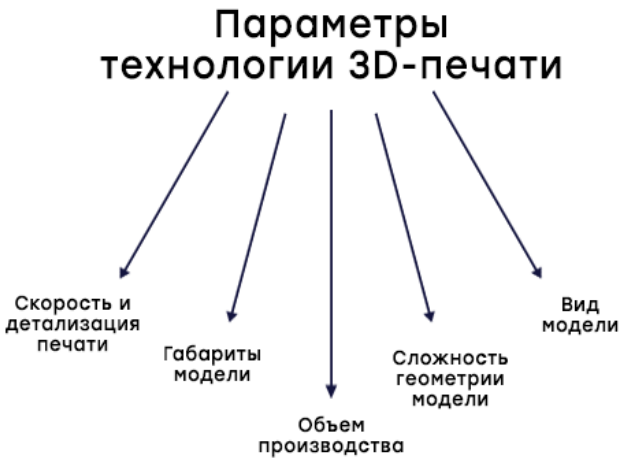


Рис. 46. Параметры выбора технологии 3D-печати

В таблице 16 представлены значения основных параметров АТ для последующего подбора нужного варианта в зависимости от характеристик модели и 3D-принтера.

Таблица 16 — 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	Vм > 100*10^3 мм^3 X < 450 мм	Серийное, Единичное	Выжигаемая, выплавляемая
SLA	Средняя	(10+) µm	Высокая	Vм < 15000 мм^3 X < 250 мм	Массовое, Серийное	Выжигаемая, Мастер-модель
SLS	Средняя	(200+) µm	Высокая	Vм > 900*10^3 мм^3 X < 800 мм	Единичное	Выжигаемая
MJP	Высокая	(16+) µm	Высокая	Vм < 8500 мм^3 X < 200 мм	Массовое, Серийное	Выплавляемая
DLP	Высокая	(35+) µm	Средняя	Vм > 15000 мм^3 X < 150 мм	Массовое, Серийное, Единичное	Выжигаемая, Мастер-модель
*Vм — рекомендуемый объем модели, X — рекомендуемая максимальная длина стороны модели						

Были определены параметры для подбора материала 3D-печати, представленные на рисунке 47.

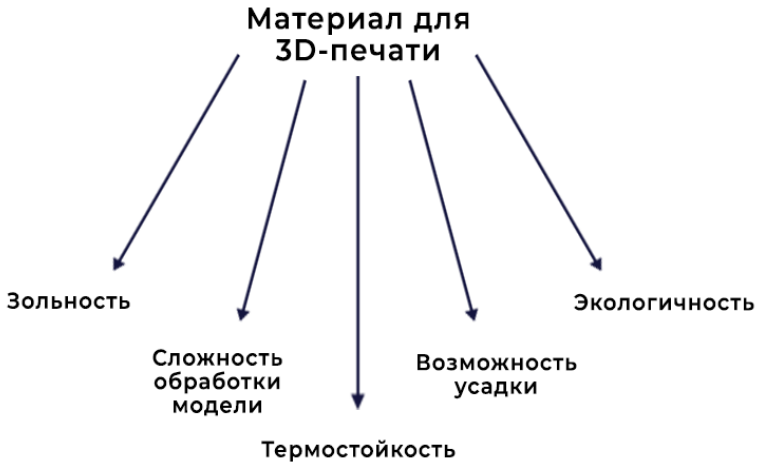


Рис. 47. Выбор материала для 3D-печати

Если поставлена задача воспроизвести модель методом послойного наплавления (FDM) необходимо задать зольность материала при выжигании, сложность обработки модели, которая зависит от геометрии и габаритов модели, возможность усадки и её критичность, требование по экологичности материала, а также технические особенности принтера — наличие подогреваемой платформы, двойного экструдера, закрытой камеры.

Зольность — это параметр, который указывает на процентную долю остатков золы в форме после выжигания модели из неё. Чем ниже это значение, тем выше вероятность получения гладкой поверхности отливки с минимальным количеством или отсутствием пор на ней. Рекомендуется применять материалы без красителей, которые обладают наименьшей зольностью [16, 126, 131, 132].

Практически все модели после 3D-печати подвергаются постобработке, что необходимо, в том числе, для создания качественных мастер-моделей и выжигаемых моделей для последующего литья. Сложность обработки может заключаться в излишней твердости или наоборот мягкости материала, невозможности сгладить поверхность модели при помощи специальных растворов или технических инструментов.

Дополнительные трудности вызывает удаление опорных структур, если они также были напечатаны из единого материала, что и сама модель. Легкая постобработка возможна с материалом, который обрабатывается при помощи специального раствора, например, ацетона для ABS или шлифованием абразивной бумагой.

Усадка при печати пластиком нелинейна и зависит от множества факторов — толщины стенки, процента заполнения, нагрева камеры и прочих. Низкая усадка составляет 0 – 0,1%, средняя — 0,2 – 0,6%, высокая усадка — 0,7% и более [4, 130-132].

Под экологичностью материала понимается определение возможности печати материалом в домашних условиях или установление необходимости дополнительной

вентиляции помещения, биологическое происхождение материала и выделяемый запах при печати.

В рамках исследования были отобраны следующие материалы, представленные в таблице 17, являющиеся пригодными для создания восковых и мастер-моделей для последующего художественного литья.

Таблица 17 — Виды материалов для 3D-печати восковых и мастер-моделей

Технологии	Материалы						
FDM	PLA	ABS	REC Cast	Wax MoldLay	PMMA	PVA (п)	HIPS (п)
SLA/DLP	Standard/Model Resin		Wax/Castable Resin		Draft/Rapid Resin		
MJP	Линейка восковых картриджей VisiJet, SETWAX						
SLS	Гранулированный порошок на основе полистирола с малой зольностью						

В случае FDM-печати наиболее популярными для применения при создании художественных моделей для последующего литья являются следующие виды пластика: PLA, ABS, Rec Cast, PMMA — каждый из которых обладает рядом уникальных свойств и различается областями применения [130, 131].

Среди данных материалов стоит выделить REC Cast и воскосодержащие материалы, которые разработаны для реализации выжигаемых литейных моделей.

Rec Cast — материал на основе полиметилметакрилата (PMMA) с добавлением специальных компонентов – пластификаторов. Характеризуется низкой зольностью (0,1%), средней усадкой (0,2%). Поддержки: термопластичный материал HIPS.

Печать воском Wax MoldLay снижает вероятность получения бракованной отливки, благодаря малой зольности (0,03%) материала и меньшей температуре выплавления модельного блока по сравнению с выжигаемыми моделями. Печать этим материалом возможна в узком интервале температур: от 110 до 135°C. Подогреваемая платформа для первого слоя должна быть выставлена на температуру 100°C, далее необходимо ее отключить. Особенности: высокая точность; малая зольность; простота постобработки.

Большинство стереолитографических фотополимерных смол применяются и при методе печати цифровой светодиодной проекции, что позволяет объединить подбор материала для обеих технологий. Основная характеристика фотополимерной смолы — длина волны фотополимеризации слоя, стандартное значение — 405 нм. Чем более

опаковый материал, тем более точными будут напечатанные из него изделия по причине отсутствия рассеивания света при полимеризации материала [4, 6, 124-126].

Основные виды смол для создания выжигаемых литейных и мастер-моделей: модельные (стандартные смолы без модификаторов), воскосодержащие (выжигание с меньшей зольностью), draft (быстрая печать, отверждение слоёв большей толщины).

Трехмерная печать методом многоструйной печати MJP осуществляется на оборудовании Projet от компании 3D Systems. Подбор материала для MJP-печати ограничен совместимостью картриджей линейки VisiJet и SETWAX.

Для реализации выжигаемых моделей методом селективного лазерного спекания необходимо применять полистирольный гранулированный порошок, который позволяет добиться минимальной зольности, что будет способствовать меньшему числу операций по постобработке в результате печати. При SLS-печати роль поддержек выполняет находящийся в камере порошок.

Классификация уникальных параметров, задействованных при подборе технологии и материала для реализуемой модели, позволяет осуществить выбор наиболее эффективного способа производства литейной модели и снизить брак при производстве ювелирных и художественных отливок.

4.3 Систематизация рекомендаций по подбору аддитивной технологии и материала литейной модели в специализированном программном обеспечении

На основе разработанных рекомендаций по получению моделей для литья художественных и ювелирных изделий разработано программное обеспечение, написанное на языке Visual Basic for Access, на базе реляционной системы управления базами данных Microsoft Access. Подобная реализация позволит работать со связанными запросами, внешними базами данных, таблицами и полным пакетом Microsoft Office.

Каждый параметр обладает определенной областью значений. Если искомые значения всех параметров попадают в область выборки, присущей одной из технологий, тогда данная технология добавляется в результирующий отчет.

Схематично данная последовательность по формированию и выводу искомого варианта при работе с реляционной базой данных представлена на рисунке 48.

Рис. 48. Упрощенный вид алгоритма формирования и вывода результата запроса

Основная задача приложения заключается в предоставлении пользователю максимально полного перечня параметров для выбора с целью получения наиболее эффективных технологии и материала изготовления литейной модели. Реализованы оконные режимы программы с полями для выбора значений параметров с целью получения наиболее подходящей аддитивной технологии, представленные на рисунке 49.

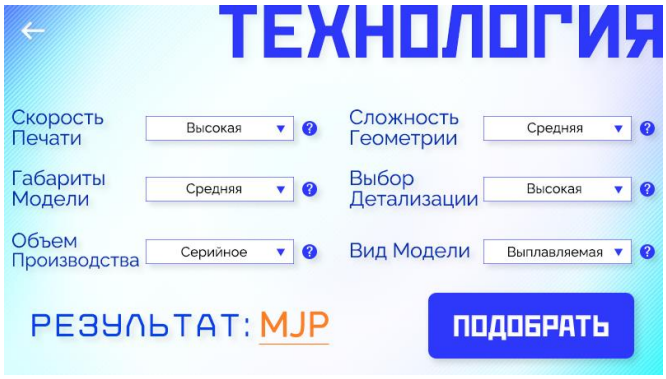


Рис. 49. Окно подбора технологии 3D-печати

Реализована справочная информация для каждого вида технологии, с целью ознакомления пользователя с полученным результатом и расширения функциональности

программы, которая также выполняет функцию справочного руководства по аддитивным технологиям и материалам. Примеры окон справочной информации проиллюстрированы в приложении А на рисунках А.1-А.4.

На рисунке 50 представлено окно подбора материала для трехмерной печати методом послойного наплавления (FDM), устанавливаются свойства материала и несколько технических характеристик печатающего устройства.

Рис. 50. Окно подбора материала для FDM-печати

Реализация программного обеспечения позволяет найти эффективное применение структурированной и классифицированной информации в производственных целях на предприятиях художественного и ювелирного литья, а также выполняет функцию единой образовательной базы данных по применению аддитивных технологий для студентов и молодых специалистов в литейном производстве.

Рекомендации актуальны для предприятий высокоточного литья, работающих с несколькими подрядчиками, предоставляющими услуги по трехмерной печати восковых и мастер-моделей, что позволит выбрать наилучший из предлагаемых вариантов сотрудничества.

Преимущество реализации рекомендаций в цифровой форме способствует оперативному обновлению и редактированию представленных данных. Это позволит поддерживать актуальность рекомендаций, расширить базу данных новыми методами 3D-печати и материалами, а также реализовать дополнительные модули по постобработке литейных моделей.

Защита данных в цифровом виде осуществлена государственной регистрацией программы в реестре Роспатента. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661780 [133].

5 Разработка рекомендаций по изготовлению ювелирных и художественных изделий с применением топологической оптимизации методом литья по выплавляемым моделям

5.1.1 Исследование проектирования литниково-питающих систем и описание закономерностей их реализации для топологически оптимизированных моделей

При разработке литниково-питающих систем стремятся добиться направленной кристаллизации расплава, обеспечить полное заполнение формы металлом и организовать качественное питание отливок при затвердевании. Общие рекомендации из научных публикаций и справочных материалов, которых следует придерживаться при создании литниково-питающих систем, можно объединить в следующие пункты:

– организовать одностороннее движение расплава при помощи корректного расположения питателей, исключив встречное движение расплава в полости формы;

– обеспечение подвода металла в места отливки, способствующие усилению направленного затвердевания;

– осуществить подвод металла к отливке, минимизируя температурные перепады в ее частях, что позволит снизить внутренние напряжения в отливке;

– при литье по выплавляемым моделям ювелирных изделий стояк выполняет роль прибыли, поэтому стремятся подводить питатели к массивным частям отливок для снижения риска образования усадочных дефектов;

– поиск наиболее короткого пути подвода металла в полость формы [15-20].

Стоит отметить ограничение свойственное бионическим и топологически оптимизированным моделям — наличие множественных ветвлений. В данном случае металл будет выбирать преимущественно путь, который требует меньших затрат энергии. Исходя из этого, следует планировать способы питания отливки, используя ее геометрию, предусматривая высокие потери энергии в полостях, питание которых будет осуществляться в последнюю очередь.

С другой стороны, бионические модели имеют и положительное свойство, так как закругленные профили полостей отливки (и литниково-питающей системы) способствуют лучшей гидро- и термодинамике. В закругленной части трение расплава с формой будет меньше, чем в других частях ЛПС [16, 19]. Чем меньше трение расплава, тем меньше турбулентность при движении и ниже шанс появления газовой пористости и включений.

Умеренное увеличение размеров стояка и питателей позволяет осуществить заполнение полостей формы расплавом прежде, чем он перейдет в жидко-твёрдое состояние.

Размещать питатели в бионических отливках следует в самых критических областях для заполнения:

– в массивной части отливки;

– в местах резкого изменения профиля и углов;

– в месте, где гарантированно произойдет заключительное затвердевание поступающего из стояка металла [17, 19, 20].

Поведение фронта кристаллизации сложно предсказать в бионических отливках, обладающих большим числом отверстий и витиеватых структур. В данном случае необходимо обращаться к программному обеспечению для симуляции процесса заливки, например ProCast или Flow-3D Cast [161, 162]. Симуляция — моделирование литейных процессов в программном обеспечении при помощи компьютерной системы.

Стоит отметить, что основная причина усадочной пористости – недостаточное питание отливки. В идеале данный дефект должен иметь место только в питателях и стояке (прибыли), но не в зоне отлитых изделий. Особенно подвержены риску усадочной пористости как раз бионические модели за счет множества ажурных деталей, а также модели, обладающие массивными областями и большими параллельными поверхностями.

Далее представлены несколько предложений по усовершенствованию сборки литниково-питающих систем для получения бионических и топологически оптимизированных отливок на основании литературного обзора, программных симуляций литейного процесса и технологических карт с предприятий, специализирующихся на изготовлении высокоточных отливок (в т.ч. ювелирных и художественных):

– моделирование элементов ЛПС на трехмерной модели позволяет исключить риск повреждения модели с бионическими структурами и декоративными рельефами при установке литниково-питающей системы;

– 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;

– при работе с миниатюрными ювелирными моделями ($V < 0{,}5$ см^3), расположенными в центральной части модельного блока, толщина питателя соотносится как 1–1,2:1 к толщине стенки выплавляемой модели;

– применение коллектора для улучшения питания сложногеометрических отливок. Количество креплений на восковом стояке остается прежним, при этом обеспечивается подвод металла в несколько областей отливки;

– острые углы в месте припоя способствуют появлению раковин в готовой отливке. Пайку питателя со скруглением рекомендуется делать в программном обеспечении с дальнейшим ростом на 3D-принтере;

– при моделировании литниково-питающей системы тепловое воздействие между близко расположенными отливками должно быть минимальным. На тепловое воздействие оказывает влияние конфигурация отливок, объем и температура заливаемого металла. Перспектива в данном вопросе заключается в машинном обучении на основании ряда экспериментальных данных, представленных в специализированном программном обеспечении для симуляции литейных процессов. Рекомендовано проводить предварительные симуляции в программе Flow-3D Cast или её аналогах;

– расстояние от основания модельного блока до ближайшего питателя должно быть не менее 10 мм, что позволит ограничить турбулентность, создаваемую потоком жидкого металла, который, достигнув дна стояка, начинает заполнять его. Это расстояние позволяет снизить уровень турбулентности и засорение отливок включениями, а также уменьшает тепловое воздействие и возможные дефекты усадки. В случае с отливками, обладающими тонкостенным узорами, текстовыми и прочими элементами с высокой детализацией, следует располагать питатели на расстоянии не менее 20-30 мм от основания.

В работе предложен метод трехмерной печати выплавляемых моделей с элементами ЛПС. Установка питателей производится в наиболее толстые и широкие места модели, которые определяются через программные продукты, как Materialise Magics или NetFabb [143, 144].

На этапе проектирования при определении мест крепления и количества питателей на модели учитывают будущий демонтаж проектируемой ЛПС без повреждения отливки.

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 также 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. При расположении выплавляемой модели в верхней части модельного блока соотношение может быть увеличено до 3:1 [158]. При заливке расплава напор в верхних каналах модельного блока является наименьшим, увеличение площадей сечения питателей позволит увеличить массовую скорость пролива за счет снижения сопротивления течения потока. При этом линейная скорость расплава сократится, что

снизит риск размывки тонких элементов формы. Модель браслета, расположенного в верхней части модельного блока, представлена на рисунке 51.

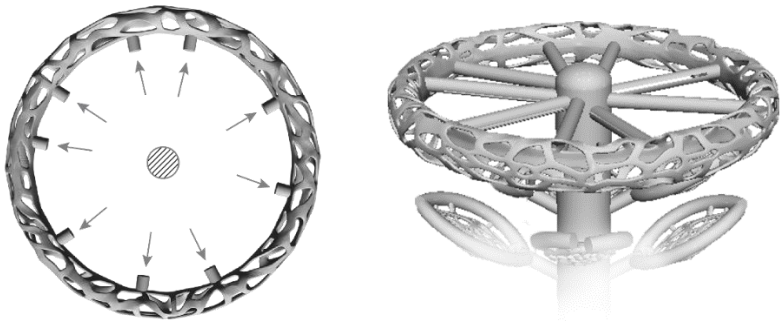


Рис. 51. Модель браслета с элементами ЛПС

Для удобства отделения будущей отливки от литниковой системы монтаж элементов ЛПС производится в наиболее толстые и широкие сечения модели, определенные в Materialise Magics [158]. На рисунке 52 представлена готовая к трехмерной печати модель кулона-1 с основаниями питателей.

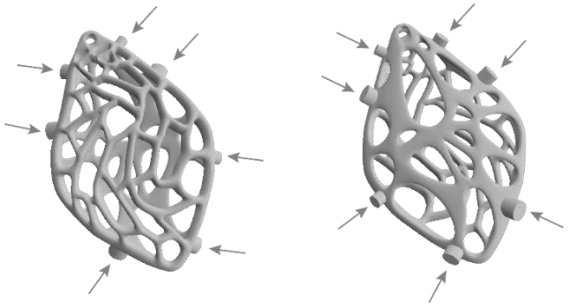


Рис. 52. 3D-модель кулона-1 с элементами ЛПС

Для особо сложных конфигураций требуется моделирование коллектора на этапе 3D-моделирования по причине труднодоступности припая модели со стандартными прямыми питателями к стояку. Установлено, что данный способ необходим сферическим и эллипсоидным телам моделей с ажурной структурой (рисунок 53).

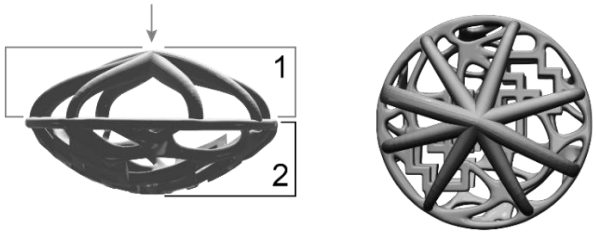


Рис. 53. 3D-модель кулона-2 (2) с элементами ЛПС (1)

Учитывая миниатюрные габариты кулонов ($V < 0,5$ см^3) и тонкостенную ажурную структуру всех моделей с труднодоступной внутренней полостью, в разработанном программном обеспечении осуществлен подбор технологии и материала печати с приоритетом на минимальную зольность и возможность низкотемпературного выплавления материала поддержек ($T_{пл} < 65$ °C) — многоструйная печать MJP с точностью печати до 16 микрон из воскового материала VisiJet M2 ICast RealWax и материалом поддержки VisiJet S300 [133]. Подробные данные о технологии и материале представлены на рисунке 54.

Рис. 54. Характеристики 3D-принтера и материала для печати

Модели с элементами ЛПС и без них были напечатаны на принтере ProJet CPX 3510 из воскосодержащих материалов VisiJet M2 ICast RealWax и SETWAX CAST3 по технологии многоструйной печати, результаты представлены на рисунке 55 и 56.

Рис. 55. Напечатанные модель браслета с элементами ЛПС и кулон-2 из ICast RealWax

Модели, напечатанные из SETWAX CAST3, обладают схожими характеристиками: зольность — 0,05-0,08%, температура плавления — 65-69 °C, плотность — 0,84 г/см^3, объемная усадка — 1,8%, линейная усадка — 0,7%. Результат печати представлен на рисунке 56.

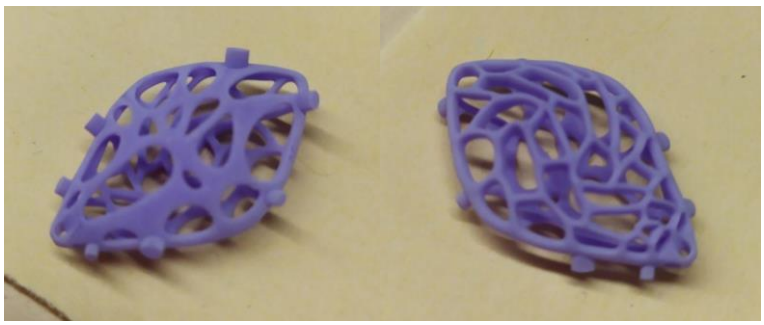


Рис. 56. Напечатанная модель кулона-1 с элементами ЛПС из SETWAX CAST3

Модель была припаяна к питателям на восковом стояке вместе с прочими литейными моделями. Впоследствии, восковую конструкцию формуют, опоку с формомассой вакуумируют.

Данный подход к проектированию литейных моделей с элементами ЛПС, продемонстрированный на примерах с бионическим браслетом и кулонами, позволяет частично автоматизировать этап пайки моделей к восковому стояку.

В перспективе возможна полная автоматизация данного процесса — 3D-печать модельного блока, однако на данный момент стоит выделить несколько ограничений, препятствующих внедрению данного метода:

1. Технологические ограничения: высокая трудоемкость и медленная скорость производства. Трудоемкость постобработки собранного модельного блока — существенно усложняется удаление поддерживающих структур и постобработка моделей отдельных изделий. Сам процесс 3D-печати модельного блока, включающего множество миниатюрных моделей ($V < 0{,}5$ см^3), занимает значительное время для получения качественного результата с высокой степенью детализации. В сравнении с традиционным методом, при котором отдельные восковые модели собираются в модельный блок вручную, 3D-печать конструкции целиком оказывается более времязатратной операцией.

2. Экономические аспекты: высокая стоимость оборудования, воскосодержащего модельного материала и легкоплавкого материала поддержек, что делает процесс нерентабельным для массового производства.

3. Сложность работы с фотополимерными моделями. 3D-печать фотополимерными смолами методом SLA или DLP снижает себестоимость получаемого модельного блока, однако подготовка выжигаемых моделей требует их засветки в УФ-камере, покрытия восконаполненной суспензией для лучшего выжигания из формы и опробования температурного режима прокалки для нестандартной литейной модели (в данном случае модельного блока). Также необходимо учитывать, что выжигаемые модели обладают большей зольностью, нежели восковые (выплавляемые) модели.

Можно сделать вывод, что на текущий момент 3D-печать модельного блока целиком является технологически и экономически нецелесообразной. Из-за медленной скорости печати и необходимости в дополнительных этапах обработки, производительность остаётся низкой. Трехмерная печать модельного блока из восковых материалов методом многоструйной печати (MJP) является крайне дорогостоящей, а модельный блок из фотополимерных материалов трудно обработать (удалить поддержки, провести полную равномерную засветку ультрафиолетом) и необходим нестандартный прокалочный режим.

5.1.2 Исследование толщины сечения питателей для создания литниковой системы при реализации бионических моделей

Физическое моделирование характеризуется натурными экспериментами, которые позволяют получить высокое качество расчетов, но применяются ограниченно по причине больших материальных (в особенности при работе с благородными металлами) и временных затрат.

При описательном моделировании объект исследования описывается в текстовом, графическом формате и при помощи математических зависимостей. При расчете процесса затвердевания отливок выполняется значительное число математических операций. Подобные расчеты проводят в специализированных программах по моделированию литейных процессов [19].

Проводится моделирование процессов затвердевания отливок с применением метода конечных элементов, при котором отливка и форма разделяются на мелкие объемные элементы (например, 1 см^3). Теплопередача рассматривается для каждого такого элемента с учетом его теплового взаимодействия с соседними элементами.

Целью исследования является определение влияния толщины сечения питателя на заполнение литейной формы по технологии литья по выплавляемым моделям. Настройка и моделирование литейных процессов проводились в демо-версии программного обеспечения Flow-3D Cast.

Система основана на методе конечных объемов и высокоточном моделировании литья расплава со свободной поверхностью, благодаря чему достигается высокая точность описания геометрии внутренней полости отливки и формы расчетной модели, учитываются физические процессы при заливке и кристаллизации отливки, происходящие в форме.

Стояк и питатели являются резервуарами жидкого металла и питают отливку. Размеры стояка и питателей стремятся делать минимальными для обеспечения адекватного питания отливки и сокращения затрат металла при плавке и отделении от модельного блока.

Для исследования была выбрана модель кулона-1 следующих габаритов: 18,4 х 28 х 6,5 мм (рисунок 57). Для изучения влияния диаметра сечения питателя на качество отливки был предопределен интервал значений для эксперимента: 0,6 — 2 мм.

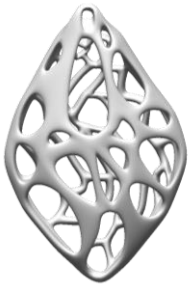


Рис. 57. Оптимизированная модель кулона для симуляции

Настройка симуляции включала заливку образца под избыточным давлением. Для симуляции был реализован модельный блок со стояком длиной 100 мм и диаметром 10 мм, аналогичный использованному на производстве для изготовления изделий, исходя из суммарного объема установленных моделей и питателей ($V_{блока}$ = 15 $см^3$).

Кулонам и питателям была установлена размерная сетка размером 0,3 мм. Минимальный размер элемента сетки стояка был установлен на значении 1 мм.

После построения сетки назначаются материалы отливки и формы. Необходимо получить отливку из серебра 925 пробы, содержание которой составляет 92,5% серебра и 7,5% меди. Выбираем Sterling Silver для отливки и Plaster (гипс) для формы. Для эксперимента были использованы значения, представленные в таблице 18:

Таблица 18 — Физические характеристики сплава СрМ925

Т ликв.	896 ºС
Т солид.	779 ºС
Плотность	10360 кг/$м^3$
Теплопроводность	410 Вт/(м·К)
Теплоемкость	245 Дж/(кг·К)
Удельная теплота плавления	88300 Дж/кг
Плотность в зависимости от температуры расплава	
Температура, °С	Плотность, кг/$м^3$
500	10500
779	10400
893	9220
1200	9160

Продолжение таблицы 18.

Вязкость в зависимости от температуры расплава	
Температура, °C	Вязкость, кг/м·с
700	0.00425
900	0.00425
950	0.0038
1000	0.0036
1050	0.0034
1150	0.0030
1200	0.0028

Параметр Maximum Timestep устанавливаем на значении 0,1 с. для большего количества итераций при построении модели симуляции заливки.

На следующем этапе задаем диаметр отверстия в тигле, согласно литейной вакуумной индукционной машине Indutherm VC 600 — 8 мм. Задаем массу шихты для получения массового расхода расплава.

В настройках параметров процесса моделирования литья выбираем «Overpressure Filling, Vacuum» — Заливка под избыточным давлением в вакуумной среде.

В условиях процесса заливки в параметре «Pressure» укажем область и значение давления инертного газа — $1 \cdot 10^{-5}$ Па в камере с формой. Указываем давление заливки в $3 \cdot 10^{5}$ Па в ячейке Reference pressure.

Учитывая минимальную шероховатость гипсовой формы в параметре Wall Slip зафиксируем значение 0,995 как константу. В ходе симуляции необходимо задать проникновение вакуума внутрь формы для повышения плотности ее заполнения расплавом. Для этого зададим величину газовой проницаемости равной $1 \cdot 10^{-12}$ м^2. Пример запуска симуляции показан на рисунке 58.

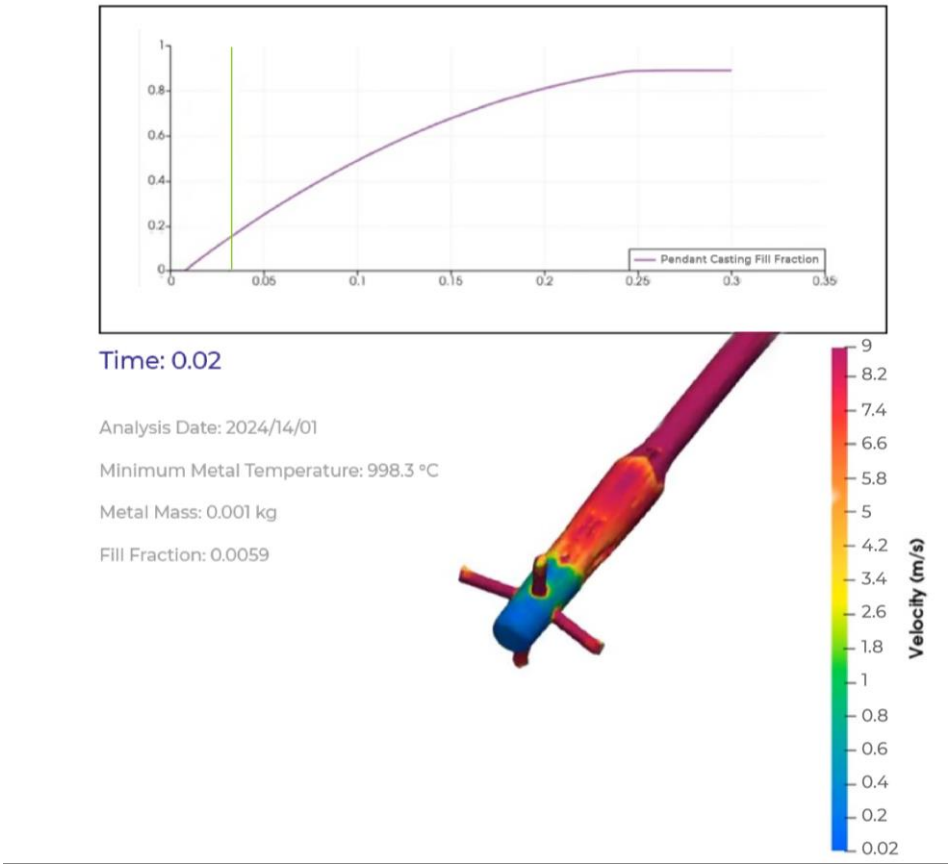


Рис. 58. Запуск симуляции заливки расплава в литейную форму

Скорость расплава на выходе принимает максимальное значение — 9 м/с. Симуляция заливки начинается при T = 1010 ºC. Результаты симуляций заливки СрМ925 при различных диаметрах сечения питателей представлены в таблице 19.

Таблица 19 — Результаты симуляции заливок сплава СрМ925

Диаметр сечения питателя, мм	Процент заполнения, %	Время заполнения, с	Объем затраченного материала на ЛПС, см³
0,6	85%	0,48	11,14
0,8	92%	0,44	11,78
1,0	100%	0,34	12,59
1,2		0,32	13,59
1,4		0,31	14,76
1,6		0,3	16,12
1,8		0,29	17,66
2,0		0,29	19,38

В ходе симуляции происходит итерационное обновление показателей минимальной температуры расплава, его массы, времени (шаг) и показатель заполнения полости формы. Завершающая стадия симуляции продемонстрирована на рисунке 59.

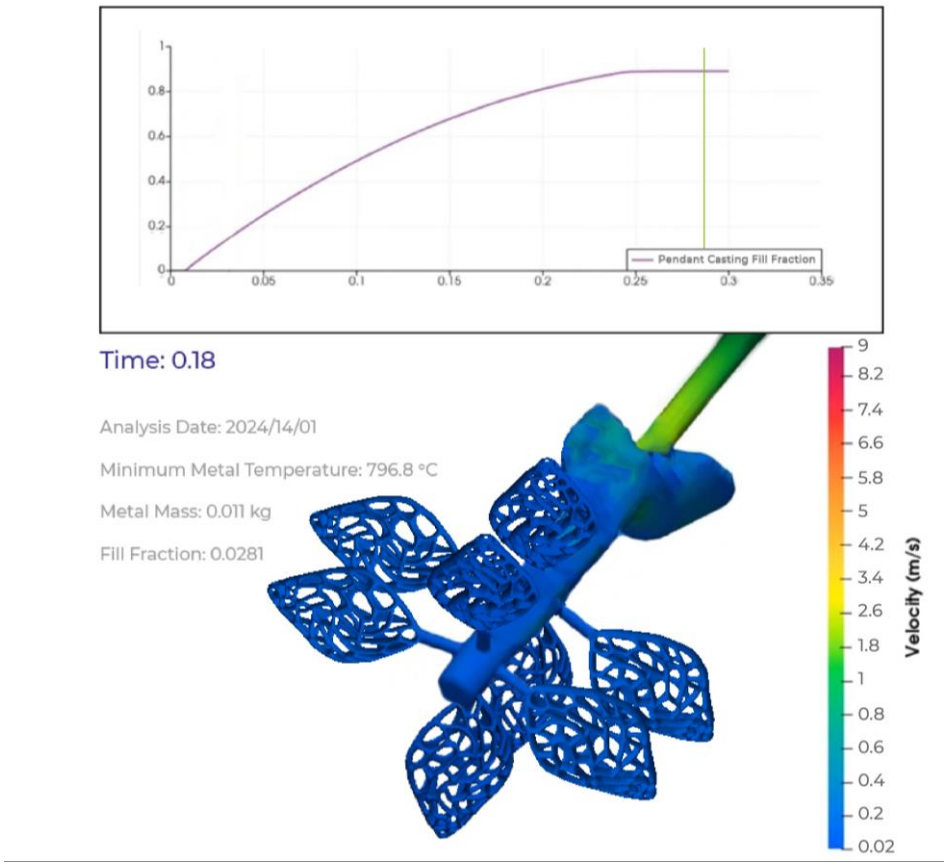


Рис. 59. Завершение симуляции литья расплава по каналам литниковой системы

Симуляция процесса заливки проводится с учетом всех заданных пользователем значений параметров, демо-версия программного обеспечения предоставляет упрощенную визуализацию литниково-питающей системы, представленную на рисунках 58-59.

На основании проведенных симуляций наилучший показатель по скорости заполнения полости литейной формы, наименьшими материальными затратами и отсутствием поверхностных дефектов показал питатель с толщиной сечения диаметром 1 мм.

Использование питателей меньшего диаметра (0,6 и 0,8 мм) привело к недоливам, в то время как увеличение диаметра свыше 1 мм не дало значительного улучшения результата, но увеличило затраты драгоценного металла на ЛПС.

5.2 Анализ формовочных материалов и приготовления формомассы

Связующим материалом в гипсовых формах является гипсовое вяжущее. Согласно научным публикациям, в зарубежной практике применяют гипс с пределом прочности при сжатии 50-100 МПа, на российских предприятиях по ГОСТ 125-2018, не менее 25 МПа [56].

Кристобалит — наполнитель для гипсовых форм, обладающий большим термическим расширением при 230-250 °С (общее расширение кристобалита нагретого до 250 °С, составляет около 1,5%, а до 800 °С — около 1,8%), что позволяет компенсировать усадку гипсовых форм при их прокаливании перед заливкой металлом и устранять влияние усадки металлов и легкоплавких моделей на размеры получаемых изделий. Применение формомассы с кристобалитом характеризуется стабильностью размеров форм при температурах до 850 °С, что положительно влияет на точность отливок и сохранение целостности форм [15, 46].

Экспериментально доказано, что при увеличении содержания гипса прочность формы увеличивается [15]. Для изготовления качественной отливки необходимо использовать смеси с минимальным содержанием гипса, обеспечивающим прочность формы без излишнего запаса на всех этапах технологического процесса. Размер фракций кристобалита, применявшийся в ходе эксперимента: менее 0,08 мм — 96%; 0,08-0,12 мм — 4%. На производстве опробован состав формомассы из 50% кристобалита, 25% пылевидного кварца, 25% гипса для определения влияния содержания пылевидного кварца на прочностные характеристики литейной формы и сравнения с данными из литературного обзора [15]. Для испытаний применялся гидравлический пресс, оборудованный плоскими параллельными плитами для равномерного приложения нагрузки и датчиками определения критического напряжения образца. Результаты эксперимента приведены в таблице 20.

Таблица 20 — Прочность на сжатие гипсовых смесей $\delta_{сж}$, прокаливание 650 °С, 3 ч [15]

Состав смеси, %	Вода/Смесь, %	$\delta_{сж}$, МПа
Кристобалит - 80, Гипс - 20	35	0,37
Кристобалит - 70, Гипс - 30	35	0,81
Кристобалит - 60, Гипс - 40	35	1,22
Кристобалит - 50, Гипс - 50	35	1,42
Кристобалит - 50, Кварц - 25, Гипс - 25	40	1,49

Можно отметить, что увеличение содержания гипса в форме увеличивает её прочность, однако общий показатель гипсовых форм с кристобалитовым наполнителем невысок, что объясняется его дилатометрическими характеристиками, который выполняет функцию по обеспечению высокой точности полостей формы и её целостности, снижая коробление формы и риск образования трещин.

Влияние температуры нагрева гипсовой формы на её прочностные характеристики отражено на рисунке 60. 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 °C) и 0,7575 МПа при прокаливании до 600 °C. Испытание проводилось на установке для трехточечного изгиба, оборудованной двумя опорами и верхним пуансоном, который создает вертикальную нагрузку в центральной точке образца.

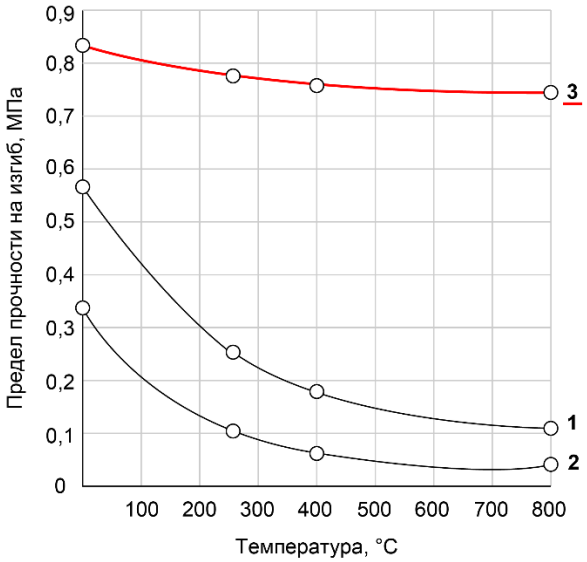


Рис. 60. Влияние температуры на прочность гипсовых форм при изгибе: (1) — 50% гипса + 50% кристобалита; (2) — 30% гипса + 70% кристобалита [15]; (3) — 25% гипса + 25% кварцевого песка + 50% кристобалита

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.

Образование воздушных раковин в форме зависит от технологии смешивания формовочной смеси с водой. Для борьбы с раковинами рекомендуется проводить вакуумирование и смешивание формовочной смеси в специальных машинах с механической мешалкой, частота вращения которой достигает 500 об/мин [15, 45, 46].

Правильный контроль расширения формовочных смесей необходим для минимизации внутренних напряжений в форме, предотвращения ее деформации и обеспечения точности воспроизведения геометрии восковых моделей.

Цель исследования заключается в определении расширения гипсовой смеси на различных этапах ее схватывания и твердения. Это позволяет прогнозировать изменения размеров формы и учитывать их при проектировании литейных моделей. Неправильный

подбор состава формовочной смеси может привести к образованию дефектов на отливках, таких как деформация геометрии, появление трещин или недостаточное воспроизведение малых деталей изделия.

При схватывании гипсовая масса расширяется, что обеспечивает хороший отпечаток с модели. Определены показатели расширения гипсовых смесей различного состава в зависимости от времени выдержки, результаты представлены на рисунке 61. 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, динас или кристобалит снижает усадку форм.

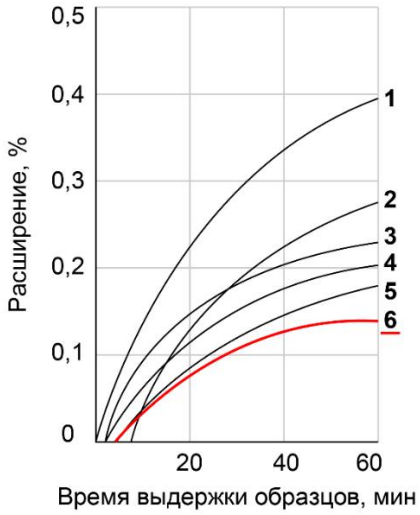


Рис. 61. Расширение гипса и гипсовых смесей при схватывании: (1) — высокопрочный гипс марки 500; (2) — высокопрочный гипс марки 300; (3) — 80% гипса + 20% асбеста; (4) — 50% кварцевого песка + 40% гиса + 10% асбеста; (5) — 67% кварцевого песка + 3% асбеста + 30% гипса [15]; (6) — 25% гипса + 25% кварцевого песка + 50% кристобалита

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 тысячных долей миллиметра. Показания дилатометра регистрируются и обрабатываются для расчета процента расширения. Результат выводится на экране оборудования. 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. Он уменьшается при использовании малопрочных сортов гипса, снижении содержания гипса в смеси, увеличении водонасыщенности, применении кварцевого песка и асбеста. На рисунке 62 представлена зависимость расширения гипсовой смеси в зависимости от содержания воды в ней.

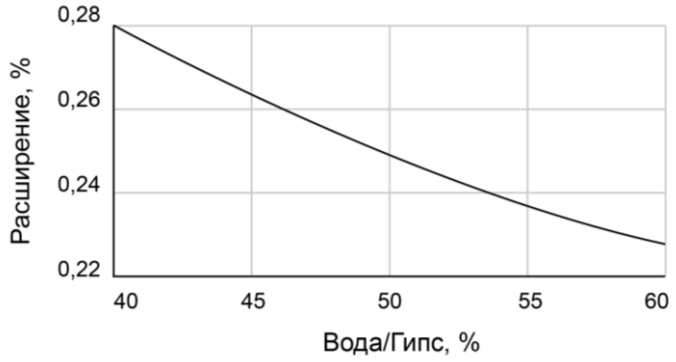


Рис. 62. Влияние водонасыщения гипсовой массы на ее расширение при схватывании [15]

На основании полученных данных можно вывести следующую закономерность, что для уменьшения усадки гипсовой формы необходимо снизить содержание воды и гипса в смеси, использовать от 30% и более кристобалита в качестве наполнителя, снизить температуру и продолжительность прокаливания форм.

Гипсовые формы по выжигаемым моделям необходимо нагревать с наименьшей интенсивностью в сравнении с восковыми моделями, так как они содержат значительную массу впитавшегося в них модельного состава. При интенсивном нагреве выгорание модельной массы способствует образованию газов, создающих большое давление на стенки формы, что может привести к её деформации и разрушению. По этой причине при подготовке выжигаемых моделей к литью в гипсовых формах рекомендуется оптимизировать их по технологии QuickCast и покрыть восковой суспензией. На рисунке 63 изображена динамика нагрева гипсовых форм в зависимости от температуры в печи.

При нагреве выше 680 °С усадка гипса резко увеличивается и доходит до 4%. Это связано с полной потерей гипсом кристаллизационной воды и образованием ангидрида. Разложение ангидрида начинается при нагреве гипса выше 800 °С.

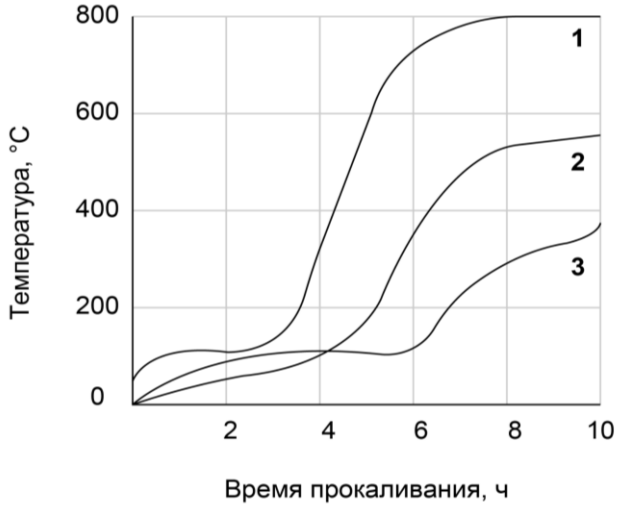


Рис. 63. Динамика нагрева гипсовых форм в зависимости от температуры в печи: (1) — нагрев формы с температурой печи до 800 °С; (2) — до 600 °С; (3) — до 400 °С [15]

Целью эксперимента стало определение оптимальных пропорций компонентов формомассы для получения отливок без дефектов, зависящих напрямую от литейной формы — пригара, трещин, деформации конфигурации отливки, газовых раковин и пористости.

Для эксперимента использовали 4 модели кулона-1 размером 18,4 х 28 х 6,5 и ЛПС, состоящей из коллектора, 7 питателей и основания стояка длиной 3,5 см и диаметром 1 см, общий объем конструкции составил 5 $см^3$. Заливка сплава СрМ925 проводилась при избыточном давлении (-1/+3 бар).

На основании литературных источников [14, 15, 48] определено, что соотношение 40 мл дистиллированной воды на 100 г формовочной массы обеспечивает оптимальную пластичность и рабочие характеристики смеси. При такой пропорции смесь становится достаточно пластичной для точного копирования конфигурации модели, но при этом сохраняет необходимую прочность и термическую стабильность после затвердевания.

Каждая формовочная смесь использовалась для изготовления отдельных разовых литейных форм. Способ приготовления формовочной смеси и прокалочный цикл представлены в главе 2. 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 21.

Таблица 21 — 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								

Ниже приводится описание результатов, полученных для каждой формомассы в рамках исследования:

Формомасса 1. Малое содержание кристобалита (35%) негативно отразилось на термической стабильности формы. Это привело к её деформации и растрескиванию при высоких температурах заливки расплава, особенно в тех местах, где был слабый теплоотвод (стык разделяющегося литникового канала и стояка). Избыточное количество кварца, хоть и улучшило теплопроводность, не смогло компенсировать недостаточную термостойкость формы, что привело к образованию дефектов в виде гребешков (нароста металла произвольной формы), искажению внутренней тонкостенной конфигурации и шероховатости на поверхности отливки.

Формомасса 2. Увеличение содержания кристобалита до 45% обеспечило должную термическую устойчивость формы. В полученной отливке не было обнаружено визуально видимых дефектов конфигурации и поверхности.

Формомассы 3-4. Дальнейшее увеличение содержания кристобалита до 50-55% и, соответственно, снижение кварца до 30-25% также продемонстрировало положительный результат — отсутствие визуально видимых дефектов отливки. Гипс (с содержанием 20%) выполняет роль эффективного связующего вещества, обеспечивая достаточную прочность формы при её прокаливании и заливке расплавом.

Формомассы 5-6. Малое содержание кварца (20%) не обеспечило необходимого уровня теплопроводности, что способствовало образованию горячих трещин и пригара на поверхности отливки. Недостаток кварца снизил химическую инертность формы и увеличил взаимодействие расплава с материалами формы, что привело к образованию пригара.

Формомасса 7. Увеличение содержания кварца до 25% и сокращения кристобалита до 50% позволило получить бездефектные отливки с наилучшим качеством поверхности из всех представленных вариантов формомасс в исследовании. Данная формомасса применялась далее для изготовления партии ювелирных изделий, согласно разработанному в подпункте 2.1. главы 2 техническому заданию.

Формомасса 8-10. Увеличение содержания кристобалита и пылевидного кварца на 10-15 г в общем объеме сухой формовочной смеси не препятствовало получению отливок без явных визуальных дефектов.

Формомасса 11. Недостаточная пластичность формы привела к её растрескиванию на этапе снятия резинового основания перед установкой в прокалочную печь. Формовочная смесь была слишком сухой и не смогла равномерно заполнить форму, что привело к образованию трещин и пористости в структуре формы из-за недостаточного сцепления между её частицами. Причина: малое содержание воды и гипса в формовочной смеси.

Формомасса 12. Отливка без пригара и трещин, но с небольшой шероховатостью ($R_{max} < 0{,}1$ мм) на поверхности. Возможно устранение дефекта при механической обработке.

Формомассы 13-14. Дефекты аналогичные формомассе 11, изменение пропорций формомассы не повлияло на качество формовочной смеси. Причина: малая связующая способность гипса из-за недостаточного содержания воды (< 32 мл).

Для оценки наличия или отсутствия дефектов на поверхности и в конфигурации отливок применялись визуальные методы контроля. Результаты исследования подтвердили, что предотвращение пригара, образования трещин и прочих дефектов возможно при

правильно подобранном соотношении компонентов формовочной смеси, что обеспечивает оптимальный баланс термической стабильности, теплопроводности и прочности форм.

На основании эксперимента можно сделать вывод, что содержание кристобалита ниже 45% приводит к ухудшению термической стабильности формы. Кристобалит обладает высокой температурной устойчивостью и низким коэффициентом термического расширения, что помогает предотвратить образование трещин в форме при высоких температурах. Если его содержание ниже 45%, форма может стать более подверженной термическим деформациям и растрескиванию при заливке расплава, особенно при температуре, превышающей 1000°C.

При содержании кристобалита 70% и выше снижается пластичность формы, что приводит к неточности заполнения малых элементов модели формомассой. Избыточное количество кристобалита делает форму слишком жесткой и хрупкой, что может увеличить риск разрушения формы при механических нагрузках.

Минимум 25% пылевидного кварца необходимо для обеспечения достаточной огнеупорности и прочности формы. Кварц улучшает теплопроводность формовочной массы, способствуя равномерному охлаждению расплава и снижению риска образования горячих трещин. В эксперименте продемонстрировано, что формомассы с содержанием кварца в гипсо-кристобалитовых формах ниже 25% приводило к появлению шероховатости, пригара и горячих трещин на поверхности отливок.

Менее 20% гипса недостаточно для обеспечения связующей способности формовочной массы. Гипс выполняет роль связующего вещества, которое обеспечивает сцепление между частицами кристобалита и кварца. При содержании гипса ниже 20%, связь между частицами формомассы была слабой, что приводило к растрескиванию и обсыпанию еще до этапа прокаливания форм.

Более 30% гипса в составе формовочной смеси избыточно, что приводит к чрезмерному увеличению влагопоглощения формы. Влага, которая остается в форме при избыточном содержании гипса, может привести к образованию пористости и дефектов при заливке расплава. Увеличение содержания гипса означает снижение содержания кварца или кристобалита в формовочной смеси, что ведет к риску снижения термической стабильности и огнеупорности формы.

В формовочных смесях 11, 13 и 14, где содержание воды было менее 32 мл на 100 г порошка, возникали дефекты схватываемости формомассы, что говорит о том, что вода играет ключевую роль в обеспечении нужной пластичности и связующей способности формовочной смеси в сочетании с гипсом. Содержание воды менее 32:100 в формовочной

смеси нарушает эти свойства, что приводит к пористости, недостаточной пластичности и прочности формы.

Установлены оптимальные пропорции формовочных материалов, обеспечивающие отсутствие пригара, трещин, деформации, газовых раковин и минимизацию 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.

5.3 Приготовление сплавов СрМ925 и М67/33

Приступая к приготовлению сплава, необходимо ознакомиться с диаграммами состояния двойных систем, образованных основой сплава с каждым из легирующих компонентов. Следует также проанализировать физические свойства основы, легирующих элементов и самого сплава, которые имеют ключевое значение для процесса плавки: плотность, температура кипения, давление пара при температуре плавления. Важно определить характер взаимодействия основы сплава и легирующих компонентов с кислородом, азотом, влагой, а также с оксидами углерода. Необходимо оценить возможность химических реакций расплава с используемыми огнеупорными материалами.

Далее рассматривается выбор шихтовых материалов, подлежащих плавке. На этом этапе необходимо определить тип плавильной печи и соответствующее плавильное оборудование. Принимаются во внимание физико-химические аспекты (достаточность рабочей температуры печи, пригодность футеровки и т.д.), а также технико-экономические вопросы и безопасность труда. К технико-экономическим вопросам относятся потребность в расплаве на единицу времени, допустимый уровень содержания примесей и требуемые механические и другие эксплуатационные свойства сплава [16, 19].

Электрическое сопротивление жидких металлов оказывает значительное влияние на процесс плавки в индукционных печах, поскольку оно определяет количество тепла в расплаве, образуемого за счет индуцированного электрического тока. Общее сопротивление тела определяется удельным электрическим сопротивлением $\rho_{эл}$ (мкОм·см), значения для серебра, меди и цинка представлены в таблице 22.

Таблица 22 — Удельное электросопротивление металлов [16]

Металл	$\rho_{эл}^{тв}$ при 20 °C	$\rho_{эл}^{тв}$ при $t_{пл}$	$\rho_{эл}^{ж}$ при $t_{пл}$
Ag	1,6	8	17
Cu	1,7	10	21
Zn	6	17	40

Серебро и медь являются металлами с наивысшей электропроводностью как при комнатной, так и при повышенных температурах в твердом и жидком состояниях. Это способствует эффективной индукционной плавке, так как высокое удельное электросопротивление обеспечивает интенсивный нагрев расплава до необходимой температуры за счет значительного выделения тепла.

Учитывая, что серебро в отличие от других благородных металлов растворяет углерод, следует тщательно следить за температурным режимом плавки (не поднимать температуру выше 1100 °С) при плавке в графитовом тигле.

Огнеупорность материала характеризуется температурой начала деформаций под напряжением сжатия при 0,2 МПа и температурой, при которой наступает полная потеря прочности. Недостаточная огнеупорность материала зачастую становится причиной механического разрушения футеровки и загрязнения расплава частицами огнеупорного материала.

Серебро хорошо растворяет кислород, с понижением температуры растворимость кислорода в расплаве резко снижается, оксид серебра распадается и происходит выделение кислорода, которое сопровождается разбрызгиванием металла и может приводить к образованию газовой пористости в отливках. Медь, входящая в серебряные сплавы, увеличивает растворимость кислорода и водорода. При плавке серебра и серебряных сплавов рекомендуется плавка в вакууме, либо проведение раскисления расплава фосфором при плавке в атмосфере [15].

Процесс плавки серебра в вакууме включает расплавление шихты и выдержку расплава в условиях вакуума не ниже 10^2 Па. Время выдержки расплава при этом не должно превышать 15 минут для шихты массой 0,4-0,5 кг. По окончании выдержки плавильная камера заполняется инертным газом до достижения атмосферного давления. Вакуумная среда свыше 10^2 Па и увеличение времени выдержки в вакууме приводят к значительному возрастанию потерь благородных металлов.

Особенности плавки латуней обусловлены температурой кипения цинка, составляющей 907 °С, что приводит к угару и значительным потерям цинка в пределах 0,5-5%. Ключевым требованием при плавке латуней является минимизация этих потерь.

Латуни при плавке на воздухе закипают при 1150-1250 °С. Происходит бурное выделение паров цинка, что приводит к полной дегазации расплава. По этой причине отливки из латуней очень редко поражены газовой пористостью.

Наиболее надежный способ дегазации металлических расплавов (рафинирования) заключается в их вакуумировании, но необходимо технологическое оборудование, оснащенное вакуумными камерами, насосами, измерительной аппаратурой.

Величина давления пара жидкого металла вблизи температуры кристаллизации играет ключевую роль в процессе плавки, так как этот параметр определяет количество испарившегося металла. Особое внимание следует уделить металлам с высоким давлением пара (р), превышающим 13 Па, при температуре кристаллизации, таким как цинк ($t_{кр}$ = 13,3 Па). Введение цинка в расплав с более высокой температурой плавления связано с его значительными потерями вследствие испарения, что осложняет процесс плавки таких металлов в вакууме.

Для эксперимента использовалась латунь М67/33, состоящая из 67% меди и 33% цинка. Шихта для плавки включала медь высокой чистоты (99,9%), соответствующую требованиям ГОСТ 859-2014. Для обеспечения необходимого состава шихты использовались медные гранулы в отношении 67% от общей массы шихты.

Также был отобран цинк высокой чистоты (99,9%), соответствующий требованиям ГОСТ 3640-94. Гранулированная цинковая шихта составила 33% от общей массы шихты.

Перед плавкой каждый компонент был взвешен, чтобы соблюсти точный состав сплава. Для минимизации загрязнений и окисления проводилась предварительная очистка меди и цинка от поверхностных оксидов механическим и химическим методом.

Для плавки латуни использовалась индукционная вакуумная литейная машина Indutherm VC600. Перед плавкой тигель из графита был тщательно очищен от остатков предыдущих сплавов и загрязнений. Для этого тигель сначала промыли дистиллированной водой, затем прокалили до 700 °С, чтобы удалить возможные органические загрязнения.

В подготовленный и нагретый до 400 °С тигель была загружена шихта. Загрузка проводилась в инертной атмосфере аргона для предотвращения окисления металлов. Шихта нагревалась индукционным методом до температуры 1030 °С. При этой температуре шихта полностью расплавилась, образуя однородный расплав. Для обеспечения равномерного расплавления и смешивания компонентов использовалось перемешивание за счет индукционного поля. Весь процесс плавки проводился в защитной среде аргона (+0,5 бар), что обеспечило защиту расплава от окисления.

Для ускорения нагрева расплава и предотвращения перегрева поверхности осуществляют его принудительное перемешивание, которое особенно эффективно при плавке в электрических индукционных печах (мощные электродинамические силы). Перемешивание способствует растворению вводимых добавок и обеспечению однородности состава по всему объему расплава.

Процесс растворения добавок будет более эффективным и надежным, если плотность и температура плавления добавки будут близки к соответствующим параметрам основы сплава. В связи с этим добавки вводятся в виде лигатуры. В таблице 23

представлены плотность, температуры плавления и кристаллизации сплавов, использованных в работе.

Таблица 23 — Характеристики сплавов М67/33 и СрМ925 по ГОСТ 6836-2002

Марка	Плотность, г/см^3	Т ликвидус, °С	Т солидус, °С
СрМ925	10,36	896	779
М67/33	8,16	918	892

Наиболее ценные составляющие шихты — свежие металлы, поэтому их количество в шихте ограничено до половины от общего объема, необходимого для получения сплава хорошего качества.

Расчет шихты из чистых компонентов и с добавлением оборотных материалов (возврата производства) демонстрирует гибкость производственного процесса получения отливок под поставленную задачу — оперативное получение высокой точности состава или повышение экономической эффективности литья.

Ниже представлен расчет шихты для получения 300 г сплава СрМ925.

1. Расчетное содержание в шихте определяется по формуле

$$K_{\text{шх}} = \frac{QK_c}{100-\text{У}}, \quad (5.1)$$

где $K_{\text{шх}}$ — расчетное содержание элементов в шихте, г;

Q — масса готового сплава, г;

K_c — известное содержание элементов в готовом сплаве, %;

У — угар элемента, %.

2. Содержание составляющих шихты рассчитывается по формуле

$$X = \frac{QK_c}{100-\text{У}}100 - M_1B_1 - M_2B_2 - \ldots - M_nB_n\frac{1}{n}, \quad (5.2)$$

где X — содержание составляющих шихты, г;

M_1, M_2,..., M_n — принятое или рассчитанное количество составляющих шихты;

B_1, B_2,..., B_n — содержание элемента в составляющих шихты, %;

n — содержание элемента в определенной составляющей шихты, %.

3. Угар элементов, %: серебро — 0,2-0,5; медь — 0,5-1,5; фосфор — 60-80.

4. Рассчитываем 300 г шихты марки СрМ925 состава, %: серебро — 92,5$\pm$0,3; медь — 7,5$\pm$0,5. Пример расчета представлен в таблице 24.

Таким образом, подобран состав шихты, г: серебро — 150,15; сплав СрМ916 — 68,7; сплав СрМ970 — 66,6; медь — 14,25; фосфористая медь — 0,3; всего — 300.

Таблица 24 — Расчет шихты для сплава СрМ925

Составляющие шихты	Химический состав шихты, %			Содержание составляющих шихты, %	Вносится в шихту составляющими, %		
	Ag	Cu	P		Ag	Cu	P
Серебро	99,9	-	-	50,05	50	-	-
СрМ916	91,6	8,4	-	22,9	20,97	1,92	-
СрМ970	97	3	-	22,2	21,6	0,66	-
Медь	-	99,9	-	4,75	-	4,75	-
Фосфористая медь	-	90	10	0,10	-	0,09	0,01
Всего вносится шихтой				100	92,57	7,429	0,01
Угар, %				-	0,5	1	70
Состав сплава				-	92,65	7,35	0,03

Количество фосфористой меди (с 10%-ным содержанием фосфора), необходимой для раскисления серебряных сплавов с учетом степени окисленности шихты, приведено на рисунке 64 [15].

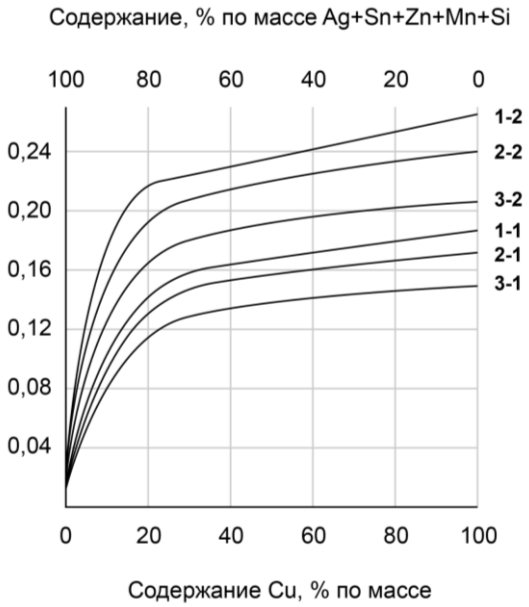


Рис. 64. Количество фосфористой меди (10%) для раскисления серебряных сплавов: (1-1), (2-1), (3-1) — для раскисления содержащих соответственно 0, 10, 20% активных компонентов при неокисленной шихте; (1-2), (2-2), (3-2) — для окисленной шихты [15]

Алгоритм расчета шихты латуни М67/33 из чистых компонентов:

– взвешивают модельный блок перед формовкой;

– по весу воска с учетом, что его плотность воска принимают 1 г/см^3, вычисляют вес необходимого металла, умножением на плотность сплава (для латуни М67/33 – 8,16 г/см$^{3)}$, т.е. для модели весом в воске 1 г требуется 8,16 г сплава;

– делают навеску из основного металла и лигатуры (Cu – 67%, Zn – 33%);

Расчёт необходимой металлической шихты производится по следующей формуле:

$$m_{\text{Me}} = \rho_{\text{Me}} \cdot \frac{m_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}}, \quad (5.3)$$

где m_{Me} — масса металлической шихты, г;

ρ_{Me} — плотность металла, г/см^3;

m_B — масса воскового модельного блока/восковой модели, г;

ρ_B — плотность материала восковой модели, г/см^3.

$m_{Me} = 8{,}16 \cdot 4{,}52 / 1 = 36{,}9$ г

Например, при литье по восковой модели браслета массой 4,52 г на его отливку (без учета элементов ЛПС) будет потрачено 36,9 г чистой гранулированной шихты М67/33.

Шихтовые материалы перед загрузкой в жидкую ванну необходимо подогреть до 100-150 °С для удаления влаги. После расплавления основной доли шихты расплав раскисляют (при необходимости), вводят легирующие добавки, при этом в первую очередь тугоплавкие, а затем летучие и легко окисляющиеся (перед разливкой). Перед разливкой расплав выдерживают в спокойном состоянии до 10 минут.

Проверка правильности расчета и подтверждение соответствия состава сплава требованиям нормативной документации подтверждена рентгенофлуоресцентным анализом (РФА). При помощи XRF-анализатора Olympus DELTA определили массовую долю компонентов в сплаве (93,3% Ag, 6,67% Cu) и выявили отклонение в 0,83% от номинального состава в опытном образце (рисунок Г.1), что позволило скорректировать распределение шихтовых материалов.

5.4 Анализ способов заливки расплава и выбивки литейной формы

Качество художественной отливки в значительной мере определяется точностью воспроизведения геометрической структуры изделия. Процесс заполнения литейной формы сопровождается охлаждением металла, что приводит к образованию кристаллов в расплаве. С увеличением твердой фазы скорость течения расплава снижается. Поэтому заполнение

формы ограничено промежутком времени, в течение которого расплав сохраняет жидкое и жидко-твердое состояние, обеспечивающее его текучесть.

На полноту заполнения литейной формы влияют три основные группы факторов. Первая группа включает свойства сплава, такие как поверхностное натяжение, теплопроводность, теплоемкость, интервал кристаллизации и прочие. Вторая группа связана со свойствами литейной формы, включая её шероховатость и теплоаккумулирующую способность. Третья группа охватывает условия заливки, такие как металлостатический напор, внешнее давление на расплав, степень его перегрева и температура формы [14, 16, 19].

Жидкотекучесть металла улучшается при перегреве сплава, нагреве формы, увеличении металлостатического напора, качественной обработке поверхности формы и сокращении времени заливки металла, правильно спроектированной ЛПС.

Для оценки влияния проливаемости сплавов СрМ925 и М67/33 от способа их заливки в форму необходимо провести экспериментальные заливки обоих сплавов: гравитационную и под избыточным давлением.

Известно, что гравитационная заливка представляет собой процесс, при котором расплав металла заполняет литейную форму под воздействием собственной массы. В данном случае скорость заливки определяется высотой столба расплава и силой тяжести [14, 15, 19, 48]. При гравитационной заливке скорость расплава СрМ925 может варьироваться в пределах 0,5–1 м/с, согласно компьютерной симуляции в Flow 3D Cast.

Заливка под избыточным давлением в литейной вакуумной машине, такой как Indutherm VC 600, предполагает принудительное введение расплава в литейную форму с использованием давления, которое может достигать до +3 бар, что значительно увеличивает скорость заполнения формы, которая может составлять до 9 м/с, согласно компьютерной симуляции в Flow 3D Cast. На рисунке 65 представлен график изменения давления в камерах в процессе вакуумирования и заливки расплава в литейную форму.

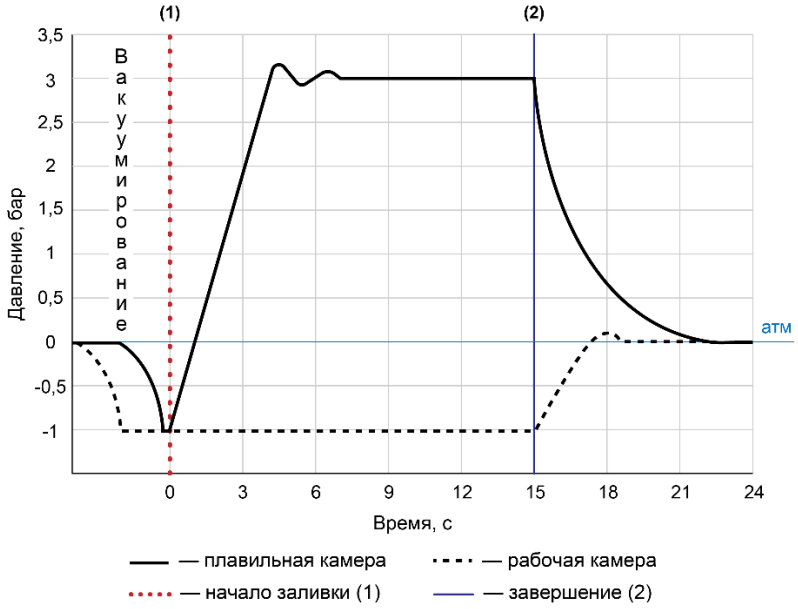


Рис. 65. Вакуумирование и заливка под избыточным давлением в Indutherm VC 600

Для проведения эксперимента использованы модели кулона-1, собранные в модельные блоки объемом 5 и 25 см³ на основании результатов симуляции и приведенных выше рекомендаций.

Кулон-1:

Объём (V_1): 0,31 см³;

Количество питателей: 7;

Питатель: длина — 0,2 см, диаметр сечения — 0,1 см;

Объём основания питателя ($V_{пит1}$): 0,002 см³;

Коллектор: длина — 8 см, диаметр сечения — 0,2 см;

Объём коллектора ($V_{кол1}$): 0,252 см³;

Общий объём кулона-1 с питателями и коллектором: 0,576 см³.

Модельный блок объёмом 5 см³:

Композиция: кулон-1, 4 шт.

Параметры стояка:

Высота стояка (h): 3,5 см;

Диаметр сечения (d): 1 см;

Объём стояка ($V_{ст}$): 2,75 см^3;

Объем моделей с коллекторами и питателями ($V_{м5}$): 2,3 см^3;

Общий объём модельного блока ($V_{ст} + V_{м5}$): 5,05 см³.

Модельный блок объёмом 25 см³:

Композиция: кулон-1, 22 шт.

Параметры стояка:

Высота стояка (h): 16 см;

Диаметр сечения (d): 1 см;

Объём стояка ($V_{ст}$): 12,56 см^3;

Объем моделей с коллекторами и питателями ($V_{м25}$): 12,54 см^3;

Общий объём модельного блока ($V_{ст} + V_{м25}$): 25,1 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 66.

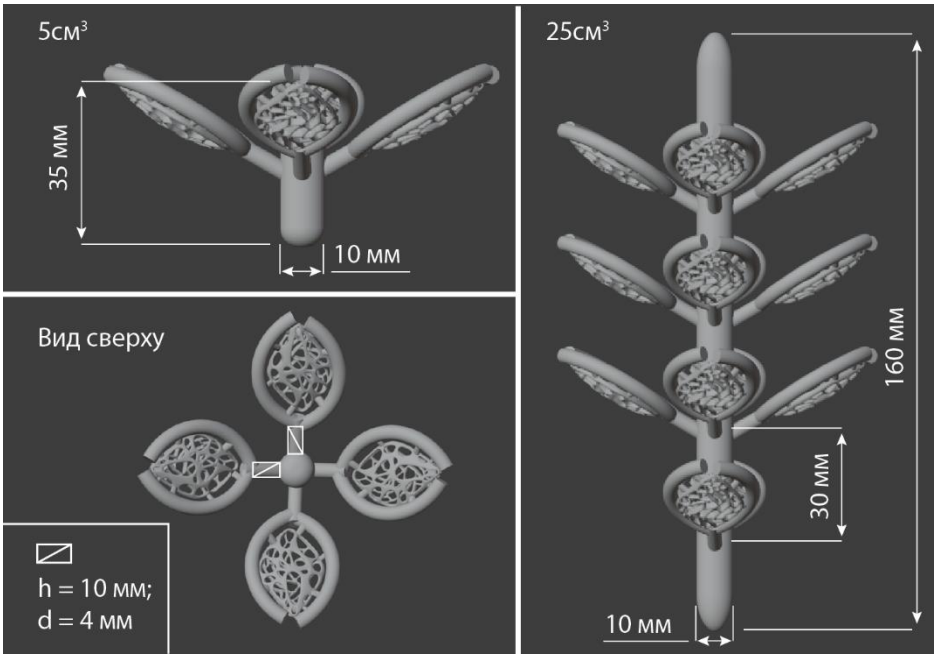


Рис. 66. Модельные блоки объемами 5 и 25 см3 для эксперимента

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 25.

Таблица 25 — 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								

Заливка под избыточным давлением показала себя наиболее эффективным методом, обеспечивающим отсутствие недолива как при небольших (5 $см^3$), так и при больших (25 $см^3$) объемах модельных блоков. Это связано с улучшением проникновения расплава в тонкие и сложногеометрические участки формы, что особенно важно для изделий с бионическими структурами, которые представлены в техническом задании.

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.

Можно сделать вывод, что сплав СрМ925 требует более строгого контроля условий заливки, так как даже при малом объеме модельного блока получены недоливы при гравитационной заливке, а латунь М67/33 более устойчива к гравитационной заливке, однако с увеличением объема модельного блока также наблюдается повышение процента недолива.

После исследования способа заливки расплава открытым оставался вопрос влияния количества питателей (с учетом суммарной площади их сечений) на восковых моделях и температуры опоки на показатель проливаемости формы расплавом.

Цель исследования заключалась в установлении зависимости между температурой опоки и количеством питателей на бионическом листовидном кулоне (кулон-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) с целью показать влияние предварительного прогрева формы на ее проливаемость расплавом. Интервал значений температуры опоки для эксперимента определен на основании теплофизических свойств материалов гипсо-кристобалитовых формовочных смесей и практических рекомендаций, представленных в научных публикациях [14, 15]. Места крепления и удаления питателей на всех моделях были идентичны, благодаря моделированию их оснований. Приоритетные места крепления питателей — массивные области (с наибольшей толщиной сечения стенки) и критические зоны (области с перепадами сечений более 3:1). Площадь сечения одного питателя составляет 0,0785 см^2. Результаты заливок представлены в таблице 26.

Таблица 26 — Влияние температуры опоки и количества питателей на недолив

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_{оп.}$, °С	500	550	550	600	600	650	650	650
Количество питателей, шт	7	7	6	7	6	7	6	5
$\Sigma(S_{пит})$, 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

Графически результаты исследований заливок представлены на рисунке 67.

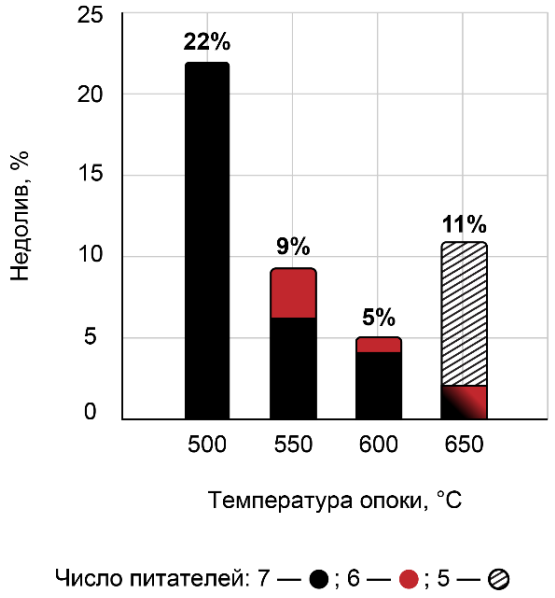


Рис. 67. Влияние числа питателей и температуры опоки на недолив (%)

Заливка №1. Низкая температура опоки способствовала быстрому охлаждению расплава, что привело к высокому уровню недолива, особенно в центральной части модельного блока.

Заливка №2. При повышении температуры опоки до 550°С процент недолива значительно снизился — до 6%.

Заливка №3. При температуре опоки 550°С и удалении одного питателя процент недолива несколько увеличился до 9%. Это указывает на важность количества питателей для улучшения проливаемости и предотвращения недолива при данной температуре.

Заливка №4. Дальнейшее повышение температуры опоки до 600°С с сохранением 7 питателей снизило процент недолива до 4%. На данном этапе можно сделать вывод, что повышение температуры гипсо-кристаболитовой формы положительно сказывается на жидкотекучести серебряного расплава.

Заливка №5. Сокращение числа питателей при данной температуре повлияло на показатель недолива менее значительно, увеличив его на 1%. Увеличение температуры опоки на 50 °С уменьшило влияние удаления одного питателя на показатель недолива.

Заливка №6. При максимальной температуре опоки (650°С) в рамках данного эксперимента и 7 питателях процент недолива достиг минимального значения в 2%.

Заливка №7. При удалении одного питателя показатель недолива остался на уровне 2%. Это свидетельствует о том, что высокая температура опоки может компенсировать уменьшение числа питателей при данной температуре для сплава СрМ925.

Заливка №8. Удаление двух питателей при данной температуре (650°С) существенно увеличило показатель недолива — до 11%. Это указывает на критическую важность расчета достаточного числа питателей для обеспечения равномерного заполнения формы.

Исследование показало, что наилучшие результаты (минимальный процент недолива) для сплава СрМ925 достигаются при сочетании высокой температуры опоки (600-650°С) и достаточного количества питателей (6-7 штук). Влияние температуры опоки на качество отливки явно выражено: с увеличением температуры опоки процент недолива снижается. Однако получить полную проливаемость модельного блока, как при заливке под избыточным давлением, в ходе эксперимента не удалось.

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, согласно проведенным исследованиям, заливка расплава СрМ925 в форму проводилась при избыточном давлении (-1/+3 бар) в литейной вакуумной индукционной машине Indutherm VC600.

С помощью встроенной термопары определяется температура расплава в зоне плавки. Заливка расплава СрМ925 производилась при температуре 1010 ºС, температура опоки составляла 550 ºС.

После заливки опоку извлекают из литейной машины, выдерживают 30 минут для охлаждения до 450-500 ºС. После чего опоку опускают в емкость с водой для охлаждения и первичной промывки, а позднее формовочный материал окончательно вымывается в гидроочистительной камере плотной струей воды под давлением. На заключительном этапе работы с модельным блоком проводят его отбеливание в растворе лимонной кислоты, подогретом до 60 ºС.

На рисунке 68 представлена полученная отливка кулона-1 из сплава СрМ925 после обрезки питателей.

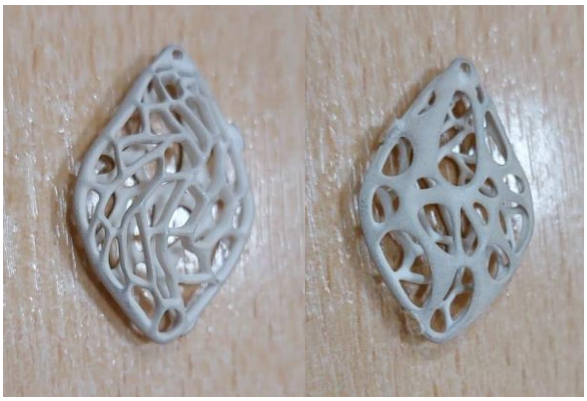


Рис. 68. Отливка из СрМ925 (с обеих сторон)

Возможна реализация топологически оптимизированных изделий с логотипом. В процессе определения условий и задач оптимизации поверхность логотипа указывается как неизменяемая (зарезервированная) область проектирования. Для улучшения заполнения полостей формы со сложной конфигурацией применяют коллекторы, что упрощает питание наиболее массивных узлов и областей, где присутствует риск недолива, например, в данной конфигурации на вершине полусферы с логотипом (рисунок 69).

Реализация топологически оптимизированных изделий с логотипом расширяет область применения исследуемого способа проектирования — разработка брендированной

продукции для организаций — объемное тело логотипа является одним из дополнительных условий (ограничений) оптимизации, что способствует генерации новой оригинальной структуры изделия с фирменным знаком.

Рис. 69. Литниково-питающая система кулона-2 из сплава СрМ925

Для заливки латуни М67/33 и получения итоговых изделий также использовалась индукционная вакуумная литейная машина Indutherm VC600. Плавка проводилась в защитной среде аргона (+0,5 бар), что обеспечило защиту расплава от окисления. Заливка осуществлялась при избыточном давлении (+3 бар в камере). Температура формы при заливке также составляла 550°С, а температура расплава — 1030°С. Готовая отливка кулона с ЛПС из латуни М67/33 представлена на рисунке 70.

Рис. 70. Литниково-питающая система кулона-1 из М67/33

Применение вакуума при заливке латуней нерационально по причине активного испарения легкоплавкого цинка. Аналогично реализован кулон-2, результат представлен на рисунке 71.

Рис. 71. Литниково-питающая система кулона-2 из М67/33

Результаты эксперимента показали, что плавка сплава СрМ925 в вакууме, а сплава М67/33 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.

5.5 Исследование этапов механической обработки топологически оптимизированных отливок

После извлечения из формы, промывки и отбеливания отливка была демонтирована из общего блока и произведено удаление питателей при помощи кусачек, а далее шлифование мест их установки на отливке. Наиболее эффективна работа дисковой фрезой. Оставшиеся небольшие выпуклости в местах касания питателей модели были выровнены при помощи надфиля.

Первым этапом постобработки после удаления питателей служит магнитная галтовка игольчатым абразивом. Наполнитель (игольчатый металлический абразив) намагничивается и крутится в ёмкости с водой и моющим средством, которые пенятся и смягчают трение изделия об наполнитель.

Шлифование изделия производится наждачной бумагой и шлифовальным песком в виде полосок и дисков. Шлифование отливок из драгоценных металлов начинается с грубого абразива, а заканчивается наиболее тонким. В данной работе этап шлифования завершался абразивной бумагой зернистостью 1000 (количество абразивных частиц на квадратный дюйм).

На этапе полирования добиваются придания блеска поверхности и значительного снижения ее шероховатости. После полирования с применением пасты ГОИ необходимо провести заключительную очистку изделия в ультразвуковой ванне с моющим средством при температуре жидкости 60 °С.

Результаты основных этапов постобработки браслета представлены на рисунке 72. Постобработка полученной отливки включает в себя этапы: магнитной галтовки игольчатым абразивом, шлифование песчаным абразивом и абразивной бумагой зернистостью от 100 до 1000, полирование с нанесением пасты ГОИ (Государственного оптического института) и финальной очисткой в ультразвуковой ванне, что схематично представлено на рисунке 73.

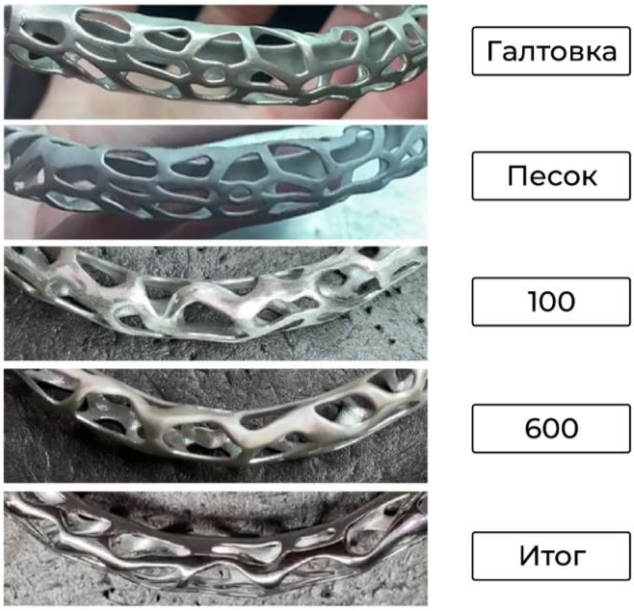


Рис. 72. Результаты постобработки браслета

Рис. 73. Схема постобработки ювелирного изделия

Готовый браслет по результатам постобработки представлен на рисунке 74. Отливка приобрела блеск, поверхность стала более однородной и гладкой. Итоговый вес браслета составляет 38,86 г.

Рис. 74. Готовый браслет из сплава СрМ925

При постобработке отливки для придания контрастности логотипа в бионической структуре проводят матирование поверхности шлифовальным войлоком и последующее полирование поверхности логотипа. Таким образом, достигается контраст глянцевой поверхности логотипа и сатиновой поверхности бионической структуры. На рисунке 75 представлено готовое изделие с логотипом после единой постобработки всей поверхности.

Рис. 75. Оптимизированный кулон с логотипом из сплава СрМ925

Стоит отметить, что этапы механической обработки отливок из сплавов СрМ925 и М67/33 в данной работе аналогичны. Сравнение отливок до механической обработки и готовых изделий представлены в таблице 27.

Таблица 27 — Результат механической обработки изделий из сплавов СрМ925 и М67/33

Отливка	Готовое изделие
Кулон-1	

Продолжение таблицы 27.

Отливка	Готовое изделие
Кулон-2	
Браслет	

Сложности у бионических изделий могут возникнуть при обработке внутренней поверхности, поскольку необходимо шлифовать и полировать не только внешнюю поверхность украшения, но и его внутреннюю структуру для придания изделию более эстетически привлекательного вида.

Продольное разделение бионической модели на две части позволит провести полноценное шлифование и полирование внутренней поверхности, а для малогабаритных изделий, в том числе и галтовку. Методом дуговой (импульсной) или лазерной пайки проводится соединение двух частей отливки.

Заключительным этапом постобработки ювелирных изделий является оценка их качества и художественной привлекательности. Визуальная форма контроля предпочтительна для оценки таких свойств, как чистота и отсутствие дефектов

поверхности, геометрическая точность и светоотражательная способность, так как именно эти факторы определяют восприятие изделия конечным потребителем [31, 36]. Обоснована практическая применимость визуальной оценки эстетических свойств изделий на этапе производственного контроля — оперативная передача изготовленных изделий заказчику, что повышает производительность предприятия.

Для оценки качества изделий в исследовании применены стандартные процедуры, принятые на предприятиях ювелирной промышленности. Отдел технического контроля (ОТК) проводит проверку изделий на соответствие техническим требованиям, что позволяет гарантировать геометрическую точность, механическую прочность и долговечность продукции [159].

Проведенная проверка качества ювелирных изделий включала несколько этапов контроля:

1. Визуальный контроль проводился для определения светоотражательной способности и выявления царапин, пор, трещин, недоливов и отклонений в конфигурации изделия.

2. Измерение геометрии — для проверки соответствия размеров изделия проектной документации при помощи цифровых штангенциркулей.

3. Рентгенофлуоресцентный анализ проводился для проверки соответствия сплава заявленной пробе, исходя из содержания драгоценных металлов в изделии. При помощи XRF-анализатора Olympus DELTA определено фактическое содержание компонентов в отливке и их соответствие ГОСТ 6836-2002 (приложение Г, рисунок Г.1).

Механические свойства и прочностные характеристики исследовались на этапе топологической оптимизации при помощи CAE-анализа в программных обеспечениях, описанных в главе 2, на основании компьютерной симуляции испытаний образцов на сжатие и изгиб.

Светоотражательная способность изделия характеризуется интенсивностью отражения света от его поверхности при определенном освещении. Визуальная оценка при сравнении изготовленных изделий из сплава СрМ925 с эталонным образцом, обладающим отражательной способностью в 95% (при 5500-6000 Å), установленной на основании спектрофотометрического анализа, подтвердила высокую светоотражательную способность изготовленных изделий.

Художественная привлекательность ювелирных изделий достигнута, благодаря комплексной механической обработке: получена полированная поверхность с высокой светоотражательной способностью (до 95%) и глянцевая поверхность, как следствие при

вертикальной ориентации кулона-2 логотип считывается с поверхности, что соответствует требованиям разработанного в главе 2 технического задания.

В заключение стоит отметить, что программный этап постобработки позволяет сформировать более эстетически привлекательную структуру и подготовить оптимизированную модель к последующим этапам производства. При получении готовой отливки с бионической структурой основной целью механической обработки является устранение мелких дефектов и последствий монтажа литниково-питающей системы, придание изделию гладкой, однородной поверхности с высокой отражательной способностью.

5.6 Проведение оценки выхода годного при механической обработке топологически оптимизированных отливок из сплава СрМ925

Расчет выхода годного через оценку потерь металла при механической обработке коррелирует с методом проектирования изделий, представленным в данной работе — топологической оптимизацией, обеспечивая полное понимание эффективности использования драгоценного металла на всех этапах производства — от проектирования до готового изделия.

На основании литературных источников угар элементов на этапах плавки и литья принят равным: серебро – 0,2-0,5%; медь – 0,5-1,5% [164]. Однако теоретический и реальный выход годного имеет значительные отличия, в связи с чем на литейных предприятиях проводят анализ производимой продукции для установления объема потерь драгоценных металлов в ходе плавки и литья.

Основные потери драгоценных металлов происходят на следующих этапах:

1. индукционная плавка металла;
2. заливка металла и выбивка формы;
3. демонтаж литниково-питающей системы;
4. обрезка и опиловка питателей;
5. травление отливок.

Величина потерь зависит от массы шихты и конфигурации изделий, которая определяется значением коэффициента сложности геометрии модели ($К_{сл}$) из таблицы 28.

В таблице не приведены данные о коэффициенте сложности отливок с кастом, так как подобные изделия не являются частью исследования.

Таблица 28 — Значения коэффициента сложности для отливок из сплавов серебра [165]

Описание	Коэффициент сложности
Цельнолитые изделия преимущественно простой, плоской формы с гладкими поверхностями	0,75
Изделия с рельефными элементами — текстовые элементы и паттерны без глубоких поднутрений. Отсутствие ажурности в модели, что способствует простому извлечению модели из пресс-формы.	1,00
Объемные изделия с характерными признаками: − глубокий рельефный рисунок − ажурная основа модели − толщина сечений элементов отливки не менее 2 мм	1,25
Объемные изделия с характерными признаками: − глубокий рельефный рисунок − ажурная основа и элементы модели − толщина сечений элементов отливки не менее 0,7 мм	1,5

На первом этапе установлена зависимость массы потерь от массы шихты на этапах отливки и очистки от формомассы блока изделий:

$$M_{пот\text{-}1} = 0{,}001 \cdot M_{ших}\,, \tag{5.4}$$

где $M_{пот}$, $M_{ших}$ — масса потерь и масса шихты, г.

В ходе проведения исследования была определена величина потерь при демонтаже изделий с отлитого модельного блока, зависящая от количества моделей на стояке и площади поперечного сечения питателя.

Для анализа массы потерь от количества изделий на восковом стояке были отобраны несколько модельных блоков с приблизительно одинаковой массой (допуск до ±20 г), но различным количеством изделий на них.

Очевидно, что с увеличением количества изделий на стояке и соответствующим увеличением удельной поверхности отливок растет и масса потерь драгоценного металла.

Для анализа массы потерь от площади среза питателя были отобраны несколько модельных блоков с приблизительно одинаковой массой (допуск до ±20 г), но различным поперечным сечением питателя.

Удельная норма потерь (г/мм^2) является величиной постоянной. При демонтаже отлитых изделий с модельного блока величина потерь от количества изделий на стояке и площади среднего поперечного сечения питателя определяется по формуле:

$$M_{пот\text{-}2} = 5 \cdot 10^{-5} \cdot S^2 \cdot m\,, \tag{5.5}$$

где S — площадь среднего поперечного сечения питателя, мм^2;

m — количество изделий на стояке, шт. [165].

Значительное влияние на величину потерь при литье оказывает сложность ювелирного изделия. Коэффициенты сложности конфигурации изделий представлены в таблице 28. Стоит учитывать, что при расчете массы потерь при демонтаже литниково-питающей системы сложность геометрии изделия уже учитывается, так как этот параметр влияет на количество изделий, установленных на стояке и на размер питателей.

Общая формула зависимости массы потерь драгоценных металлов от массы шихты, площади среза питателей, конфигурации и количества изделий выражено следующей формулой:

$$M_{пот\text{-}общ} = 0{,}0011 \cdot K_{сл} \cdot M_{ших} \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot S^2 \cdot m\ , \quad (5.6)$$

где $К_{сл}$ — коэффициент сложности конфигурации модели (таблица 28).

Норматив потерь (НП) при литье определяется как отношение массы потерь к массе переработанной шихты:

$$НП = M_{пот} / M_{ших} \cdot 10^2\ \% \quad (5.7)$$

В ходе данного исследования работа ведется исключительно с монолитными изделиями, но необходимо отметить, что для сборных изделий наибольшая масса потерь драгметаллов происходит при монтировке (до 50% от общей массы потерь).

Операции доработки литья включают в себя: опиливание остатков питателей, удаление облоя, заливов на ажуре, запайка пор. Норматив потерь на операции доработки литья установлен на уровне 18% к массе съема [165]. Основная величина съема приходится на массу опиливаемых остатков питателей. Массу съема при доработке отливок (с одного стояка) определяют по формуле:

$$M_c = l \cdot \rho \cdot S \cdot m\ , \quad (5.8)$$

где $М_с$ — масса съема, г;

l — длина минимально возможного остатка питателя, мм;

ρ — плотность сплава, г/см^3.

При изготовлении ажурных (бионических) изделий методом литья допускается увеличение норматива съема на 50% относительно нормативов, предусмотренных для обрабатываемой группы изделий.

Таблица 29 — Нормативы съема и потерь при полировании бионических отливок из сплавов на основе серебра [165, с. 26]

Краткое описание	Норматив съема к массе после операции, % Масса изделия после операции, г			Норматив потерь к массе съема, %
	до 2	Св.2 до 4	Св.4	16,5
Кольца	13,5	12,0	9,0	
Подвески	9,0	7,5	6,0	
Серьги	10,5	9,0	7,5	16,5
Браслеты	4,5			
Прочие	10,5			

Вводные данные для расчета величины массы потерь драгоценных металлов для модельного блока из 6 бионических браслетов:

$М_{ших}$ = 650 г — масса шихты СрМ925;

$К_{сл}$ = 1,5 — максимальная сложность конфигурации;

S = 4 мм — площадь среднего поперечного сечения питателя, $мм^2$;

m = 6 шт — количество изделий (браслетов).

$М_{пот-общ} = 0,0011 \cdot 1,5 \cdot 650 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 16 \cdot 6 = 0,05148$ г

Норматив потерь при литье составил:

$НП = 0,05148 / 650 \cdot 10^2 = 0.00792\% \sim 0,008\%$

Учитывая итоговый вес одного браслета равный 38,86 г (и 6 браслетов ~233,2 г соответственно) и необходимое количество шихты в 50,6 г для каждого из них, для гарантированного заполнения металлом всех полостей литниково-питающей системы потребуется 650 г серебряной шихты на все её элементы. В результате литья и доработки отливки потери драгоценного металла составили ориентировочно 0,0515 г. Норматив потерь при литье для данного вида изделия составил 0,008%.

5.7 Анализ применения пресс-форм для тиражирования восковых моделей

Для серийного производства необходимо применение резиновых пресс-форм для создания ряда восковых моделей по ним. Для создания резиновой пресс-формы необходима металлическая мастер-модель, потому что при вулканизации резины по фотополимерной модели может произойти ее значительная деформация.

Точность размеров мастер-модели и качество воспроизведения ее конфигурации зависят от точности размеров полости пресс-формы и ее конструкции. Чертеж литой

заготовки является исходным документом для конструирования пресс-формы. Чем меньше разъемов имеет пресс-форма, тем выше точность моделей.

В отличие от деталей промышленного назначения, модели для которых формируют в многоместных металлических пресс-формах, изготовленных на металлорежущих станках, модели для художественных отливок получают в литьевых одноместных пресс-формах из легкоплавких сплавов, гипса, пластмасс и эластичных материалов.

Пресс-формы должны отвечать следующим требованиям:

– размеры, особенно поверхность полости пресс-формы, должны обеспечивать получение отливок требуемого качества;

– пресс-формы должны иметь минимальное количество разъемов и при этом обеспечивать удобное и быстрое извлечение модели;

– должно быть предусмотрено удаление воздуха из полости формы при заполнении ее модельным составом;

– конструкция пресс-формы должна быть технологичной, долговечной и удобной.

Заполнение полости с мастер-моделью производится жидкой резиной, например синего цвета, впоследствии полученные пресс-формы пригодны для получения, в среднем, 200-300 восковых моделей. Резиновая пресс-форма, как правило, используется для изготовления множества моделей, однако их количество зависит также от сложности изделия. Сложные матрицы служат всего пару недель, зато резиновые пресс-формы для более простых изделий могут работать годами. Для заполнения пресс-формы воском и последующего получения восковых моделей, применяются восковые инжекторы [130, 131].

Стоит учитывать следующие факторы и производственные ограничения при реализации пресс-форм по топологически оптимизированным моделям с бионической структурой:

– снятие пресс-формы возможно только при разделении бионической модели вдоль на две части, иначе существует риск непролива воска;

– по полученным отливкам разделенных частей проводится постобработка.

Обработанные отливки (мастер-модели) готовы к созданию резиновых пресс-форм по их фасону;

– полость в пресс-форме по металлической мастер-модели возможно получить холодным и горячим прессованием;

– при холодной — меньше усадка (до 1%), разрезается через ~12 часов после запрессовки;

– при горячей — усадка примерно 4-5%, в зависимости от объема формы. Дешевле холодной, разрезается через ~3 часа после вулканизации.

Перечень ориентировочных цен, актуальных на март 2024 года, сформированных по результатам анализа открытых источников применяется в качестве расчетных данных:

– Резина для горячего прессования — 7 руб/г;

– Резина для холодного прессования — 9 руб/г;

– Для создания пресс-формы — 300 г (резины);

– Холодная резиновая форма ~ 2700 руб;

– Горячая резиновая форма ~ 2100 руб;

– Рост восковым филаментом по MJP — 1 руб/мм^3;

– Модельный воск — 0,25 руб/мм^3.

В результате получаем, что для модели объёмом 4800 мм^3:

– рост филаментом 10 штук восковых моделей ~ 48000 руб;

– создание 2 холодных пресс-форм и получение 20 штук восковых моделей (10 штук после припаивания половин) ~29400 руб.

Проведенный расчет показывает, что применение резиновых пресс-форм существенно снижает материальные затраты при изготовлении партии изделий.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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 СрМ925 и М67/33 — 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 СрМ925 и М67/33 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 СрМ925, 0% и 6% для М67/33, 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 СрМ925 и М67/33.

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 основаниями питателей 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 ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Vevers A. et al. Additive Manufacturing and Casting Technology Comparison: Mechanical Properties, Productivity and Cost Benchmark // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2018. Т. 55. № 2. pp. 56–63.

2. Толочко Н.К., Андрушевич А.А., Василевский П.Н., Чугаев П.С. Применение технологии экструзионной 3D-печати в литейном производстве // Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск. – 2018. – 140 с.

3. Лившиц В.Б., Соколов В.П., Ивлева Л.П. Технология и дизайн художественного литья // Учебное пособие — Москва: ОнтоПринт. – 2017. — 220 с.

4. Лившиц В.Б., Комиссарова Л.А. Изготовление промоделей и мастер-моделей методом 3D-печати // Рецензируемое периодическое сетевое научное издание «Дизайн. Теория и практика». Выпуск 22. – 2015. – С. 67-68.

5. Wang J. et al. Design and Topology Optimization of 3D-Printed Wax Patterns for Rapid Investment Casting // Procedia Manufacturing. 2019. Т. 34. pp. 683–694.

6. Hohkraut U. Rapid prototyping and jewelry design // DAAAM International, Vienna, Austria, EU. 2010. pp. 2.

7. Binnion J. A new method for preparing 3d acrylic photopolymer patterns for investment casting // Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2016. pp. 103-122.

8. Лившиц В.Б., Дрюкова А.Э., Безпалько В.И., Кобзев Д.С. Технологические режимы изготовления восковых моделей для литья ювелирных изделий // ООО «Литейное производство». – 2018. – С. 21-23.

9. Cooper F. Sintering and Additive Manufacturing: The New Paradigm for the Jewellery Manufacturer // Johnson Matthey Technology Review. 2015. Т. 59. № 3. pp. 233–242.

10. Митраков Г.Н., Сазонов В.С., Полякова А.В., Аникин И.С. Повышение эффективности литья по выплавляемым моделям при использовании аддитивных технологий // Омский научный вестник. – 2015. – С. 85-87.

11. Кушнир А.П., Лившиц В.Б., Кобзев Д.С. Специальные виды литья художественных изделий // LAP LAMBERT. – 2015. – 305 с.

12. Purwar U., Javed M. A., Vidya S. A review on research aspects and trends in rapid prototyping and tooling assisted investment casting // Materials Today: Proceedings. 2021. Т. 46. pp. 6704–6707.

13. Равочкин А.С., Чибирнова Ю.В., Петушкова А.В. Получение отливок с топологической оптимизацией конструкции методом литья по выплавляемым моделям // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2020. – С. 118-126.

14. Жукова Л.Т. Технология художественного литья : учебное пособие для вузов / Л. Т. Жукова, В. Б. Лившиц, В. П. Соколов, И. В. Ульянов ; под редакцией В. Б. Лившица, В. П. Соколова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 152 с.
15. Карпенко В.М. Художественное литье: материалы, технологии, оборудование : монография / В. М. Карпенко. — Минск : Белорусская наука, 2019. — 347 с.
16. Пикунов М.В. Плавка металлов, кристаллизация сплавов,затвердевание : Учеб.пособие для МИСИС М: 2005. — 416 с.
17. Акутин А.А. Методические указания к выполнению практических занятий по дисциплине «Специальные технологии производства заготовок» для аспирантов специальности 05.16.01 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов // «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» – Пермь. – 2016. – 80 с.
18. Баландин Г.Ф., Васильев В.А. «Физико-химические основы литейного производства» – М., Машиностроение, 1971. – 216 с.
19. Вальтер А.И., Протопопов А.А. «Основы литейного производства: учебник» – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 332 с.
20. Могилев В.К., Лев О.И. «Справочник литейщика: Справочник для профессионального обучения рабочих на производстве» – М., Машиностроение, 1988. – 272 с.
21. Азгальдов Г.Г. Построение дерева показателей свойств объекта // Стандарты и качество. - 1996.-№11. - С. 97-104.
22. Азгальдов Г.Г. Количественная оценка качества (квалиметрия) / Г. Г. Азгальдов, Л. А. Азгальдова. - М.: Издательство стандартов, 1971. - 176 с.
23. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров / Г. Г. Азгальдов. - М.: Экономика, 1982. - 256 с.
24. Богданович Л.Б. Художественное конструирование в машиностроении / Л.Б. Богданович, В.А. Бурьян, Ф.И. Раутман. - Киев ; Техніша, 1976. — 183 с.
25. Арнхейм Р. Искусство и визуальное восприятие [Текст] / Арнхейм Р. - М.: Архитектура-С, 2012. - 392 с.: ил. - Библиогр.: с. - 220 р. р.
26. Урвачев В.П., Кочетков В.В., Горина Н.Б. Ювелирное и художественное литье по выплавляемым моделям сплавов меди — Челябинск: Металлургия, 1991 - с.166
27. Севостьянова Е.А. Методика оценки качества художественно-конструкторских изделий / Е.А. Севостьянова, Г.И., Бандаевский // XIII Всерос. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и образование». В 6 т. Т. VI. - Томск : Изд-во ТГПУ, 2009. - С. 26-31.

28. Рунге В.Ф. История дизайна, науки и техники/Рунге В.Ф.: Учеб. пособие. Издание в двух книгах. Книга 1. — М.: Архитектура-С, 2006. — 368 с.
29. Бычков В.В. Эстетика / В. В. Бычков. - М. ; Гардарики, 2004. - 556 с
30. Варламов Р.Г. Элементы художественного конструирования и технической эстетики / Р. Г. Варламов, О.Д. Струков. - М. ; Советское радио, 1980. - 97 с.
31. Дронов В.В. Разработка дизайна изделий методом автоматизированного варьирования параметров модели: дис. канд. техн. наук. – Томск, 2012. – 112 с.
32. Захаров А.И. Особенности формообразования предметно-функциональных структур в дизайне / Захаров А.И., Кухта М.С.. - Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. - 2012. - Т. 321, № 6. - С. 204 - 209
33. Шпара П.Е. Техническая эстетика и основы художественного конструирования / П. Е. Шпара, И. П. Шпара. - Киев; Выща школа, 1989. - 247 с.
34. Ленсу Я.Ю. Экспертиза проектов дизайна : учебное пособие / Ленсу Я.Ю.. — Минск : Вышэйшая школа, 2022 — 128 с.
35. Федоров М.В. Оценка эстетических свойств товаров / М. В. Федоров, Ю. С. Сомов. - М. : Экономика, 1970. — 224 с.
36. Дронова Н.Д. Ювелирные изделия. Справочник-энциклопедия. Классификация. Описание. Оценка. — М.: Ювелир, 1996. — 352 с.
37. Сомов Ю.С. Художественное конструирование промышленных изделий / Ю. С. Сомов. - М. : Машиностроение, 1967. - 176 с.
38. Райхман Э.П. Экспертные методы в оценке качества товаров / Э. П. Райхман, Г. Г. Азгальдов. - М. : Экономика, 1974. - 151 с.
39. Ковешникова Н.А. Дизайн: история и теория / Н. А. Ковешникова. – М.: Омега-Л, 2006. – 224 с.
40. Разработка терминологического аппарата дизайна: метод. материалы / отв. ред. Г. Л. Демосфенова. – М.: ВНИИТЭ, 1982. – 118 с.
41. Глазычев В.Л. О дизайне: очерки по теории и практике дизайна на Западе / В. Л. Глазычев. – М.: Искусство, 1970. – 192 с.
42. ГОСТ 22851-77. Выбор номенклатуры показателей качества промышленной продукции. Основные положения.-М.:Изд-во стандартов, 1978. 10 с.
43. Методические указания по оценке эстетических показателей качества промышленной продукции. М., ВНИИТЭ, ВНИИС, 1975.
44. Wannarumon Somlak et al. An approach of generative design system: Jewelry design application. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2014. — с. 1329-1333

45. Груздева И.А. Современные технологии в ювелирном деле // Литейщик России. 2017. № 10. С. 35–37.
46. Луговой В.П. Технология ювелирного производства : учеб. пособие.М. : ИНФРА-М, 2012. 526 с.
47. Халилов И.Х., Халилов М.И. Ювелирное литье. Махачкала, 2000. 103 с.
48. Груздева И.А. Проектирование и изготовление ювелирных изделий: учебное пособие / И.А. Груздева, Е.В. Денисова, О.И. Ильвес, В.М. Карпов ; М-во образования и науки РФ.— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021.— 124 с.
49. Kumar M., Garg N. Aesthetic Principles and Cognitive Emotion Appraisals: How Much of the Beauty Lies in the Eye of the Beholder?. Journal of Consumer Psychology. 20. 2010. — с. 485-494
50. Kim N. A history of design theory in art education. The Journal of Aesthetic Education, 40(2). 2006. — с. 12−28.
51. Khalighy S., Green G., Scheepers C., Whittet C. Measuring aesthetic in design. 13th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia. 2014. — с. 2083−2094.
52. Берг П.П. Формовочные материалы / П.П. Берг. – М.: Машиностроение. 1963. – 407 с.
53. Аммер В.А. Кристаллизация металла в отливках: учеб. пособие / В.А. Аммер. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2012. — 156 с.
54. Зотов Б.Н. Художественное литье / Б.Н. Зотов. – М.: Машиностроение, 1982. – 288 с.
55. Александров И.В. Актуальные проблемы качества литых заготовок, получаемых методом ЛВМ и их неразъемных соединений / И. В. Александров, Е. А. Бем // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2018. – Т. 1, № 14. – с. 401-403.
56. ГОСТ 125-2018. Вяжущие гипсовые. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2018, 12 с.
57. Корбанов В.Д. Литье топологически оптимизированных отливок // Литейное производство. – 2022. – № 7. – С. 29-31.
58. Никитин А.Р. Технология изготовления топологически оптимизированных деталей методом литья / А. Р. Никитин, Н. А. Рынгач // Наука Промышленность Оборона : Труды XXII Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 60-летию со дня первого полёта человека в космос. Том I. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет. – 2021. – С. 39-43.
59. Kang J., Ma Q. The role and impact of 3D printing technologies in casting // China Foundry. 2017. Т. 14. № 3. pp. 157–168.
60. Witherell P., Herron J., Ameta G. Towards Annotations and Product Definitions for Additive Manufacturing // Procedia CIRP. 2016. Т. 43. pp. 339–344.

61. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении – Пособие для инженеров – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». – 2015. – 220 с.
62. Li S. et al. Additive manufacturing-driven design optimization: Building direction and structural topology // Additive Manufacturing. 2020. Т. 36. P. 37.
63. Moetazedian A. et al. CONVEX (CONtinuously Varied EXtrusion): A new scale of design for additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2021. Т. 37. P. 41.
64. Feng J. et al. Efficient generation strategy for hierarchical porous scaffolds with freeform external geometries // Additive Manufacturing. 2020. Т. 31. P. 15.
65. Moretti M., Rossi A., Senin N. In-process monitoring of part geometry in fused filament fabrication using computer vision and digital twins // Additive Manufacturing. 2021. Т. 37. P. 17.
66. Wahab Hashmi A., Singh Mali H., Meena A. Improving the surface characteristics of additively manufactured parts: A review // Materials Today: Proceedings. 2023. Т. 81. pp. 723–738.
67. Großmann A. et al. Optimization and re-design of a metallic riveting tool for additive manufacturing—A case study // Additive Manufacturing. 2020. Т. 31. P. 30.
68. Pratheesh Kumar S. et al. Review on the evolution and technology of State-of-the-Art metal additive manufacturing processes // Materials Today: Proceedings. 2021. Т. 46. P. 14.
69. Kermavnar T., Shannon A., O'Sullivan L.W. The application of additive manufacturing / 3D printing in ergonomic aspects of product design: A systematic review // Applied Ergonomics. 2021. Т. 97. P. 25.
70. Mallakpour S., Tabesh F., Hussain C.M. 3D and 4D printing: From innovation to evolution // Advances in Colloid and Interface Science. 2021. Т. 294. P. 21.
71. Naboni R., Breseghello L., Kunic A. Multi-scale design and fabrication of the Trabeculae Pavilion // Additive Manufacturing. 2019. Т. 27. pp. 305–317.
72. Galetto M., Verna E., Genta G. Effect of process parameters on parts quality and process efficiency of fused deposition modeling // Computers & Industrial Engineering. 2021. Т. 156. P. 27
73. Robbins J. et al. An efficient and scalable approach for generating topologically optimized cellular structures for additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2016. Т. 12. pp. 296–304.
74. Primo T. et al. Additive manufacturing integration with topology optimization methodology for innovative product design // Int J Adv Manuf Technol. 2017. Т. 93. № 1–4. pp. 467–479.
75. Plessis A. du et al. Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing // Additive Manufacturing. 2019. Т. 27. pp. 408–427.

76. Wang J. et al. Design and Topology Optimization of 3D-Printed Wax Patterns for Rapid Investment Casting // Procedia Manufacturing. 2019. Т. 34. pp. 683–694.
77. Wang Z., Zhang Y., Bernard A. A constructive solid geometry-based generative design method for additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2021. Т. 41. P. 19.
78. Zhang Y. et al. Bio-inspired generative design for support structure generation and optimization in Additive Manufacturing (AM) // CIRP Annals. 2020. Т. 69. № 1. pp. 117–120.
79. Dong G. et al. Design and optimization of solid lattice hybrid structures fabricated by additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2020. Т. 33. P. 12.
80. Khan S., Awan M.J. A generative design technique for exploring shape variations // Advanced Engineering Informatics. 2018. Т. 38. pp. 712–724.
81. Plocher J., Panesar A. Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures // Materials & Design. 2019. Т. 183. P. 22.
82. Федчун Д.О., Тлустый Р.Е. Генеративные методы создания малых архитектурных форм // Архитектура и дизайн: история, теория, инновации. Выпуск 3. – 2018. – С. 321-327.
83. Камардина Н.В., Гусейнов Р.М., Данилов И.К., Коноплёв В.Н., Иванов К.А., Жарко А.С., Полищук Г.М. Топологическая оптимизация детали «Серьга» // Вестник российского университета дружбы народов. Серия: инженерные исследования. – 2020. – С. 20-26.
84. Кротких А.А. Введение дополнительного критерия оценки качества результата использования алгоритма топологической оптимизации // Электрофизические методы обработки в современной промышленности : Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2019. – С. 173-176.
85. Пархимович А.Б., Краснова А.В., Воейко О.А. Генеративный дизайн как новая ступень проектирования» // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем. Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции. Юго-Западный государственный университет. – 2019. – С. 125-129.
86. Рукавишникова Е.Л., Иванова М.Л. Использование принципов бионики в проектировании малых архитектурных форм // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей XXV международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 316-325.
87. Баранова В.А. Генеративный дизайн в проектировании промышленных изделий // Молодость. Интеллект. Инициатива. Материалы VIII международной научно-практической конференции студентов и магистрантов. – 2020. – С. 426-427.
88. Брюхова К.С. Алгоритм топологической оптимизации на основе метода ESO // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 9-2(51). – С. 16-18.

89. Hemmerling M., Nether U. Generico: A case study on performance-based design // Proceedings of the XVIII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics - SIGraDi: Design in Freedom. 2014. – pp. 126-129.
90. Taheri-Behrooz F., Omidi M. Buckling of axially compressed composite cylinders with geometric imperfections // Steel and Composite Structures. 2018. Т. 29. № 4. pp. 557–567.
91. Dai Y., Li Y., Liu L.-J. New Product Design with Automatic Scheme Generation // Sens Imaging. 2019. Т. 20. № 1. – P. 16.
92. Oh S. et al. Deep Generative Design: Integration of Topology Optimization and Generative Models // Journal of Mechanical Design. 2019. Т. 141. № 11. – P. 18.
93. Боровиков А.А. Модифицированный алгоритм топологической оптимизации на основе метода SIMP // XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Том 4. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – С. 507-510.
94. Громова В.К. Топологическая оптимизация для аддитивных технологий / В. К. Громова, С. Ю. Громов // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2021. – № 2(25). – С. 25-28.
95. Титова М.А. Генеративный дизайн на основе оптимизации топологии с использованием глубокого обучения / М. А. Титова, А. Ю. Громов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 246-248.
96. Сорокин Д.В. Проектирование элементов конструкций различного назначения на основе топологической оптимизации / Д. В. Сорокин, Л. А. Бабкина, О. В. Бразговка // Космические аппараты и технологии. – 2022. – Т. 6, № 2(40). – С. 61-82.
97. Боровков А.И., Марусева В.М., Рябов Ю.А., Щербина Л.А. Бионический дизайн // Санкт-Петербург : Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2015. – 92 с.
98. Максимов П.В., Муратов К.Р., Абляз Т.Р. Оценка коробления топологически оптимизированных деталей при аддитивном производстве // СТИН. – 2021. – № 2. – С. 35-38.
99. Зарифжонов Ж.Ф. Методы топологической оптимизации конструкций / Ж. Ф. Зарифжонов // Наука в XXI веке: инновационный потенциал развития : Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр "Вестник науки"», 2021. – С. 93-98.

100. Никольский А.Е. Дизайн перспективных объектов и вещей на основе бионических и цифровых технологий / А. Е. Никольский, А. А. Никольский // Бионика - 60 лет. Итоги и перспективы : Сборник статей Первой Международной научно-практической конференции, Москва, 17–19 декабря 2021 года / Под редакцией А.П. Карпенко. – Москва: Ассоциация технических университетов, 2022. – С. 141-152.
101. Пугачев И.А. Технология применения современных компьютерных систем в художественном литье / И. А. Пугачев, А. И. Ямбогло // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2017. – № 2(32). – С. 31-38.
102. Шелякина Г.Г. Сравнение способов доработки геометрии после топологической оптимизации в пакете для оптимизации и сторонних пакетах / Г. Г. Шелякина, Д. Д. Попова, Н. А. Самойленко // Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и инновации. – 2019. – Т. 1. – С. 173-178.
103. Махмутов Р.Г., Кутлугаллямов Г.Г., Гарифуллин В.И. Топологическая оптимизация кронштейна авиадвигателя в Ansys Mechanical // Форум молодых ученых. – 2019. – №12 (40). С. 518-525.
104. Братчик В.В. Топологическая оптимизация в среде SOLIDWORKS / В. В. Братчик, А. В. Калиниченко // Colloquium-Journal. – 2019. – № 12-3(36). – С. 39-41.
105. Ложкин Д.В. Топологическая оптимизация кронштейна в ANSYS / Д. В. Ложкин, П. В. Максимов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 11. – С. 107-110.
106. Ефременко К.Д. Топологическая оптимизация геометрии детали с целью облегчения массы в Siemens NX / К. Д. Ефременко, К. А. Жигалкин // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 238-240.
107. Синицин Е.А. Модуль подготовки деталей к печати в программном комплексе «Виртуальный 3D-принтер» / Е. А. Синицин, О. И. Бритова, В. В. Попов // Молодежь в науке : Сборник докладов 19-й научно-технической конференции, Саров, 09–11 ноября 2021 года. – Саров: ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», 2022. – С. 150-156.
108. Дьянов Д.Ю., Медведкина М.В., Быков А.Н., Попов В.В. Методы топологической оптимизации в программном комплексе 3D Printer // Матем. моделирование, 31:7 (2019), 75–90; Math. Models Comput. Simul., 12:2. – 2020. – С. 143–153.

109. Бастов Г.А. Значение структурно-графического анализа творческого источника в образно-ассоциативном проектировании ювелирных украшений / Г. А. Бастов, С. В. Смирнова // Костюмология. – 2022. – Т. 7, № 3. – 12 с.
110. Бастов Г.А. Новый алгоритм цифрового проектирования ювелирных украшений с использованием возможностей программы Blender / Г. А. Бастов, Д. Д. Чиркова // Костюмология. – 2022. – Т. 7, № 2. – 8 с.
111. Информация о работе с поисковой патентой базой – URL: http://fips.ru (Дата обращения: 21.03.2021)
112. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614444 Российская Федерация. Компьютерная программа для реализации адаптивного подхода к генерации внутренней структуры модели при трехмерной печати : № 2021611298 : заявл. 05.02.2021 : опубл. 24.03.2021 / А. А. Холодилов, М. В. Холодилова.
113. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619952 Российская Федерация. Поисковая система по 3D моделям : № 2014618076 : заявл. 12.08.2014 : опубл. 25.09.2014
114. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613797 Российская Федерация. Программа Topology Postprocessor оценки напряжённо-деформированного состояния результатов топологической оптимизации : № 2018611128 : заявл. 06.02.2018 : опубл. 22.03.2018 / В. А. Комаров, Е. А. Кишов, Е. И. Куркин, М. О. Спирина ; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева" (Самарский университет).
115. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020665941 Российская Федерация. "LevelSet3D" (Программа для реализации численного алгоритма топологической оптимизации на основе Level-set метода в трехмерной постановке) : № 2020663447 : заявл. 02.11.2020 : опубл. 02.12.2020 / А. А. Кротких, П. В. Максимов ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».
116. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618879 Российская Федерация. TopOpt: топологическая оптимизация : № 2020618298 : заявл. 31.07.2020 : опубл. 06.08.2020 ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью Научно-технический центр «АПМ» (ООО НТЦ «АПМ»).
117. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611046 Российская Федерация. "TOSolutions4NN" (Программа для генерации обучающей выборки нейронной сети на основе решений задачи топологической оптимизации) : № 2020668067 :

заявл. 29.12.2020 : опубл. 20.01.2021 / А. А. Кротких, П. В. Максимов ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».
118. Обзор: технологии 3D-печати для литья металлов – URL: https://top3dshop.ru/blog/3dprint-for-metal-casting.html (Дата обращения: 01.05.2019)
119. Заблоцкая Е.В. 3D-технологии в ювелирном искусстве – Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2016г. – 4 с.
120. 3D-принтеры для ювелиров, как дополнение к фрезеру – URL: https://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/3d-printers-for-jewelers-as-a-complement-to-the-cncfrezer/ (Дата обращения: 10.12.2018)
121. 6 особенностей селективного лазерного спекания (SLS) – URL: http://blog.iqb.ru/sls-technology/ (Дата обращения: 27.03.2019)
122. Технология 3D-печати MJM – URL: https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/mjm/ (Дата обращения: 17.04.2019)
123. Цифровая светодиодная проекция (DLP) – URL: https://top3dshop.ru/wiki/dlp.html (Дата обращения: 15.05.2019)
124. Технологии DLP и SLA и что есть качество печати – URL: https://3dtoday.ru/blogs/igo3d-russia/technology-dlp-and-sla-and-what-is-the-print-quality (Дата обращения: 23.09.2019)
125. Изготовление мастер-моделей для литья – URL: https://klona.ru/ (Дата обращения: 11.04.2019)
126. Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. Обоснование выбора материала и технологии изготовления моделей в ювелирном производстве – XXII-я Всероссийская научно-практическая студентов, магистрантов и аспирантов по направлению «Технология художественной обработки материалов» — Иркутск: «Компания «Дани-Алмас», 2019. — 200-205 с.
127. Ивлева Л.П., Битюцкий А.Д. Разработка рекомендаций по подбору аддитивной технологии и материала модели для литья художественных и ювелирных изделий – Наука и образование в области технической эстетики, дизайна и технологии художественной обработки материалов: матер. XII междунар. науч.-практ. конф. вузов России/ СПбГУПТД. - ФГБОУВО «СПбГУПТД», 2020. – 198-205 с.
128. Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. Преимущества применения аддитивных технологий над фрезерованием при создании моделей для литья художественных и ювелирных изделий – Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием «Инновационные технологии в электронике и приборостроении», том 2 — Москва: «МИРЭА - Российский технологический университет», 2020. — 405-407 с.

129. Битюцкий А.Д. 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
130. Битюцкий А.Д. О технологии изготовления моделей в ювелирном и художественном литье / Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. // Литейное производство. 2020. № 12. С. 30-34
131. Битюцкий А.Д. 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
132. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Воронцов Р.В. Материалы, доступные в рамках различных технологий 3D-печати – Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 5. – С. 20-25
133. 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
134. Anthony P. Garland, Benjamin C. White, Scott C. Jensen, Brad L. Boyce. Pragmatic generative optimization of novel structural lattice metamaterials with machine learning – Materials and Design, 2021. – 13 c.
135. Nikola Aulig, Markus Olhofer. Evolutionary Computation for Topology Optimization of Mechanical Structures: An Overview of Representations – IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2016. – 8 c.
136. Битюцкий А.Д. 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
137. Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. 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
138. Битюцкий А.Д. 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

139. Битюцкий А.Д. 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

140. Битюцкий А.Д. 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

141. Генеративный дизайн — ключ к будущему дизайна экономичных автомобилей — URL: https://www.youtube.com/watch?v=nyktrIgj2C4 (дата обращения: 21.02.2021)

142. Битюцкий А.Д. 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

143. Подготовка моделей для 3D-печати: самый полный гид по Magics — URL: https://www.materialise.com/en/software/magics (дата обращения: 25.02.2021)

144. Обзор Autodesk Netfabb — URL: https://www.autodesk.com/products/netfabb/overview (дата обращения: 25.02.2021)

145. Autodesk Within Medical: Описание программы — URL: https://www.autodesk.com/products/within-medical/overview (дата обращения: 25.02.2021)

146. Autodesk Fusion 360: Особенности работы — URL: https://www.autodesk.com/products/fusion-360/features (дата обращения: 01.04.2021)

147. Описание и преимущества ANSYS Mechanical — URL: https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical (дата обращения: 21.03.2021)

148. Твердотельное проектирование с помощью Solid Edge — URL: https://solidedge.siemens.com/ru/ (дата обращения: 15.03.2021)

149. Программное обеспечение NX для проектирования — URL: https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/nx/nx-for-design.html (дата обращения: 21.03.2021)

150. Функциональные возможности Altair OptiStruct — URL: https://www.altair.com/optistruct/ (дата обращения: 25.03.2021)
151. Лившиц В.Б. «Технология литья художественных изделий» // Издательство: «URSS». – 2017. – с. 272
152. ГОСТ IEC 60598 ч.1. Светильники. Общие требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2020
153. Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. Реализация прототипа бионического светильника с применением технологии топологической оптимизации / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева // Дизайн. Материалы. Технология. – 2023. – № 1(69). – С. 89-95
154. Ивлева Л.П., Битюцкий А.Д. 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
155. Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. 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
156. Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. 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
157. Ивлева Л.П., Битюцкий А.Д. 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
158. Ивлева Л.П., Битюцкий А.Д. 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

159. ОСТ 117-3-002-95. Отраслевой стандарт. Изделия ювелирные из драгоценных металлов. Общие технические условия – М.: Минприбор СССР, 1988
160. Симонов Ю.Н. Физика прочности и механические испытания металлов : курс лекций / Ю.Н. Симонов, М.Ю. Симонов. – Пермь : Издво Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. – 199 с.
161. ProCAST | Приложение для симуляции — URL: https://www.esi-group.com/products/procast (дата обращения: 21.03.2021)
162. Актуальное состояние симуляции процессов литья в Flow 3D — URL: https://www.flow3d.com/products/flow-3d-cast/ (дата обращения: 15.03.2021)
163. ГОСТ 19551-74-19568-74. Литье по выплавляемым моделям // Под ред. Я.И. Шкленника и В.А. Озерова. — М.: Машиностроение, 1971, с. 78.
164. Сидельников С.Б. Технология производства ювелирных изделий : учебное пособие для практических занятий / сост.: С. Б. Сидельников, С.В. Беляев, И.В. Усков [и др.]. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 52 с.
165. Руководящий документ: РД 117-3-015-95. Пооперационные нормативы съема и потерь сплавов драгоценных металлов при изготовлении ювелирных изделий — СПб.: ВНИИювелирпром, 1995. – 34 с.
166. Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. Разработка справочно-рекомендательного приложения по топологической оптимизации художественных изделий / А. Д. Битюцкий, Л. П. Ивлева // Литейное производство. – 2023. – № 4. – С. 33-36
167. Битюцкий А.Д., Ивлева Л.П. 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
168. 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
169. Mason M. Sample Size and Saturation in PhD Studies Using Qualitative Interviews, FQS, vol. 11, no. 3, 2010. pp. 19
170. Могильчак Е.Л. Выборочный метод в эмпирическом социологическом исследовании: учеб. пособие / М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 120 с.

171. Dattalo P. Determining Sample Size: Balancing Power, Precision, and Practicality, Oxford University Press, 2008. pp. 167
172. Шмарион Ю.В. Методология и методы социологического исследования: практикум / сост. Ю. В. Шмарион, Ю. В. Караваева, С. В. Литвинова ; Липецкий государственный педагогический университет им. П. П. Семенова-Тян-Шанского. – Липецк : Липецкий государственный педагогический университет им. П.П. Семенова-Тян-Шанского, 2017. – 131 с.
173. Kandakoglu A., Frini A., Ben Amor S. Multicriteria decision making for sustainable development: a systematic review Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 2019, Vol 26, Iss 5–6. pp. 202–251
174. Бараз В.Р. Выборочный метод статистического анализа / ГОУ ВПО УГТУ−УПИ, Екатеринбург, 2008. – 67 с.
175. Подиновский В.В. Многокритериальные задачи принятия решений: теория и методы анализа: учебник для вузов / В. В. Подиновский. – Москва: Изд-во Юрайт, 2022. – 486 с.
176. Рыков А.С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации – М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 608 с.
177. Оценка художественных изделий: опрос – URL: https://forms.gle/u3eJJ7XExwEoqgCbA (Дата обращения: 01.03.2024)

ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Справочная информация по аддитивным технологиям и материалам

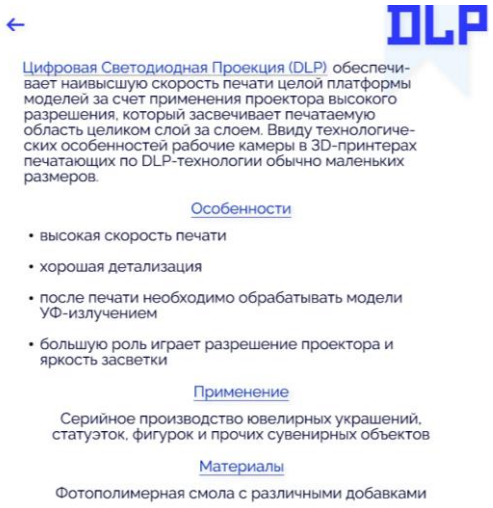


Рис. А.1. Окно со справочной информацией о цифровой светодиодной проекции (DLP)

Рис. А.2. Окно со справочной информацией о технологии многоструйной 3D-печати (MJP)

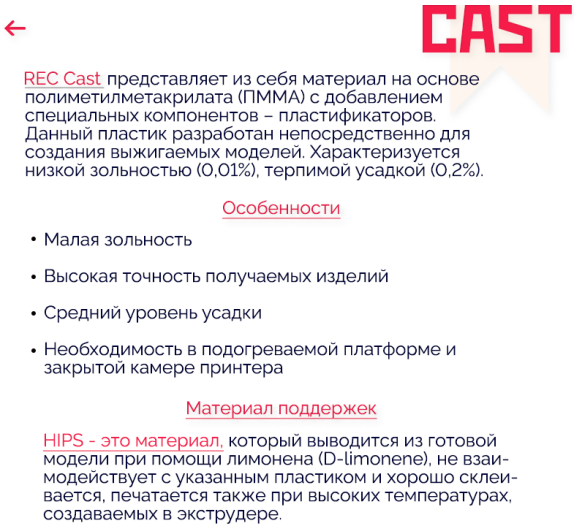


Рис. А.3. Окно со справочной информацией о REC Cast

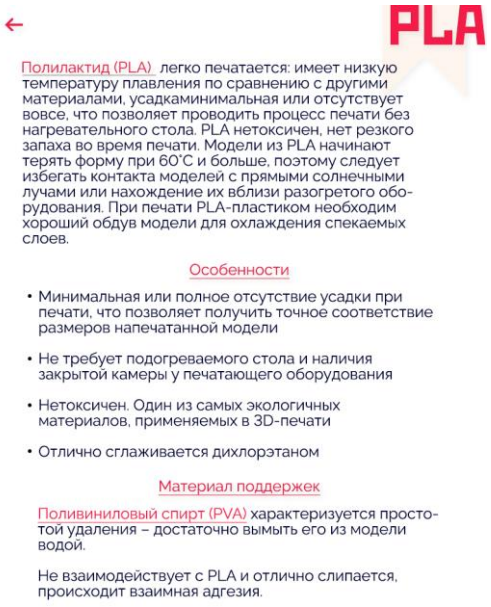


Рис. А.4. Окно со справочной информацией о полилактиде (PLA)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ

Пример алгоритма оптимизации и справочная информация

>> Перед началом

Для получения желаемого результата необходимо увеличить габариты шаблона (болванки) **на 10%** и добавить в цилиндр **сквозное отверстие** диаметром 10-15 мм по горизонтальной оси (в случае вертикальной ориентации наиболее продолговатой части модели) с целью получения оснований для приложения прямых и вращающих сил.

>> Начало работы

После импорта модели в программную среду **SolidWorks** включите расширение Simulation в панели Add-ins. Затем в списке Study запустите новый анализ (New Study). Из списка выберите Topology Study (анализ топологии модели).

>> Выбор материала

Для выбора материала перейдите в раздел Apply Material, затем откройте вкладку «Plastics» и выберите **ABS/PLA**. Нажмите Apply. Внешний вид модели видоизменился.

Если необходимо добавить «пользовательский» вариант пластика с заданными вручную физическими свойствами, то пройдите по следующему пути **Custom Materials > Plastic > Custom Plastic** и внесите необходимые значения в соответствующие поля.

>> Указание креплений

Правой кнопкой мыши нажмём по вкладке Fixtures в меню свойств объекта. Для указания **крепления** вам необходимо выбрать целиком области крепления, осмотреть модель с разных сторон и убедиться в полном выделении необходимых областей. Устанавливаем **Fixed Geometry** на внутреннюю полость окружности цилиндра.

>> Приложение нагрузки

Во вкладке External Loads выбираем **Force —** вертикальное приложение силы к плоскости по оси X в интервале **30-300 Н.**

Повторно в нагрузках добавляем **Torque** (вращательное приложение силы) к полостям двух сквозных отверстий, созданных на первом этапе. Подбираем значения в интервале **12.5-25 Н•м.**

>> Цели и ограничения

Во вкладке Goals and Constraints выбираем **Best Stiffness to Weight Ratio**, то есть наилучшее соотношение жесткости при снижении веса модели.

В дополнительных параметрах указываем следующее:
— Mass Reduction: 50%
Displacement: 1.4
— Factor of Safety: 2

>> Параметры производства

Во вкладке Manufacturing Controls нам необходимо задать параметры производства, к которым относятся зарезервированные зоны, максимальная и минимальная толщина модели, способ разъема пресс-формы, симметричность модели.

Preserved Regions: Выбираем области, которые не будут подвергаться оптимизации и останутся неизменными, также задаём **Area Depth,** что означает глубину (и ширину) зарезервированной области. Установим значение **2 мм.**

De-mold control: Указываем разъем пресс-формы **Mid-Plane по оси X.**

Symmetry control: При необходимости симметрии выбирается значение **от 1/2 — 1/8** и указывается соответствующее количество плоскостей симметрии **(от 1 до 3).**

>> Сетка оптимизации

Создаём сетку при помощи команды Create Mesh. Сетка определяет точность и разнообразие генерируемых структур. Чем она **точнее (Fine)**, тем более аккуратной и содержательной будет финальная структура, однако время оптимизации значительно увеличится. **Грубая сетка (Coarse)** позволит получить черновой вариант оптимизации, передавая в художественных изделиях стиль брутализм и индустриализм.

Mesh Type: Standard.

Mesh Quality: Оставляем значение по умолчанию.

>> Запуск оптимизации (Run Study)!

>> Анализ результатов и экспорт

Вы можете подобрать наиболее приемлемый результат оптимизации, изменяя значения распределения материала **от Light до Heavy** (наименьшее и наибольшее количество материала в оптимизированной модели). После этого нажимаем **Calculate Smoothed Mesh** для отображения сглаженного варианта модели.

На вкладке Results нажимаем на Export Smoothed Mesh, где можно выбрать тип сохранения файла. Для перехода к этапу 3D-печати необходимо сохранить файл как **Solid Body** и **New Part File,** что позволит в дальнейшем пересохранить модель в формате stl.

Если модели необходима ручная постобработка, рекомендуется сохранить полученный результат оптимизации как **Graphic Body,** что облегчит повторное моделирование в САПР на основании оптимизированной структуры.

Рис. Б.1. Алгоритм оптимизации

>> Основные операции топологической оптимизации

Этапы алгоритма содержат опциональные решения, в таблице собраны базовые вариации параметров для каждой операции.

Операция	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Крепления (fixtures)	Полигональная геометрия	Слайдер, вал, ролик	Петля, округлый крепёж	-
Внешняя нагрузка (external loads)	Прямое приложение силы	Крутящий момент	-	-
Цели и ограничения	Наилучшее соотношение снижения веса и прочности	Снижение максимального показателя смещения	Максимальное уменьшение массы изделия	-
Требования по производству	Добавление неизменяемых областей	Указание максимальной, минимальной толщины	Направление разъема пресс-формы	Указать плоскости симметрии модели
Направление разъема пресс-формы	Двухсторонний разъем	Разъем через выдавливание (штамповка)	Разъем через вытягивание	-
Соотношение симметричности	1/2	1/4	1/8	-
Построение сетки оптимизации	Плотность сетки	Максимальный размер элемента	Минимальный размер элемента	Соотношение роста элементов
Модификация результата	Изменение массы материала	Количество циклов сглаживания	-	-
Сохранение сетки оптимизации	Актуальная конфигурация модели	Новая конфигурация	Новая деталь отдельным файлом	-
Сохранение файла оптимизации	Графический объект	Твердотельный объект	Полигональный объект	-

Рис. Б.2. Справочное окно об основных операциях ТО

>> Параметры подбора аддитивных технологий

В результате анализа данных по теме трехмерной печати в литейном производстве разработана таблица основных параметров, предоставляемых рассмотренными видами аддитивных технологий, для последующего выбора нужного варианта в зависимости от характеристик печатаемой модели и возможностей конкретного рабочего оборудования.

Вид технологии	Скорость печати	Детализация печати	Сложность геометрии модели	Наибольшие габариты модели	Объем производства	Вид модели
FDM	Средняя	(120+) µm	Низкая	Vм > 100*10^3 мм^3 X < 450 мм	Серийное, Единичное	Выжигаемая, выплавляемая
SLA	Средняя	(10+) µm	Высокая	Vм < 15000 мм^3 X < 250 мм	Массовое, Серийное	Выжигаемая, Мастер-модель
SLS	Средняя	(200+) µm	Высокая	Vм > 900*10^3 мм^3 X < 800 мм	Единичное	Выжигаемая
MJP	Высокая	(16+) µm	Высокая	Vм < 8500 мм^3 X < 200 мм	Массовое, Серийное	Выплавляемая
DLP	Высокая	(35+) µm	Средняя	Vм > 15000 мм^3 X < 150 мм	Массовое, Серийное, Единичное	Выжигаемая, Мастер-модель

Vм — рекомендуемый объем модели,
X — рекомендуемая максимальная длина стороны модели

Рис. Б.3. Справочное окно о параметрах подбора аддитивных технологий

ПРИЛОЖЕНИЕ В. СВИДЕТЕЛЬСТВА НА ПРОГРАММЫ

Свидетельства о государственной регистрации разработанных программ для ЭВМ в рамках диссертационного исследования

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU 2020661780

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) **ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):
2020661780

Дата регистрации: **01.10.2020**

Номер и дата поступления заявки:
2020615894 11.06.2020

Дата публикации: 01.10.2020

Контактные реквизиты:
bityutskiy.alexander@yandex.ru

Авторы:
Битюцкий Александр Дмитриевич (RU),
Ивлева Лидия Петровна (RU)

Правообладатель:
Ивлева Лидия Петровна (RU)

Название программы для ЭВМ:
Справочно-рекомендательное программное обеспечение по подбору аддитивной технологии и материала при создании моделей для ювелирного и художественного литья

Реферат:
Программа учитывает влияние геометрической структуры, габаритов и прочих свойств моделей, создаваемых в рамках современного литейного и аддитивного производства, позволяет снизить риск получения нежелательного результата при производстве художественных и ювелирных отливок. Разработана для поиска эффективного применения структурированной и классифицированной информации в производственных целях, а также как единая образовательная система для студентов по применению аддитивных технологий в литейном производстве. Предоставляет рекомендации по выбору вариантов сотрудничества для компаний ювелирной отрасли, работающих с несколькими подрядчиками по трехмерной печати восковок и мастер-моделей.

Язык программирования: VBA

Объем программы для ЭВМ: 8,152 Мб

Рис. В.1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020661780

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU 2024616416

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):
2024616416

Дата регистрации: **20.03.2024**

Номер и дата поступления заявки:
2024615337 14.03.2024

Дата публикации: 20.03.2024

Контактные реквизиты:
bityutskiy.alexander@yandex.ru

Авторы:
Битюцкий Александр Дмитриевич (RU),
Ивлева Лидия Петровна (RU)

Правообладатель:
Ивлева Лидия Петровна (RU)

Название программы для ЭВМ:
Справочно-рекомендательное программное обеспечение по подбору алгоритма топологической оптимизации и аддитивной технологии для создания ювелирных и художественных изделий «TechOpt»

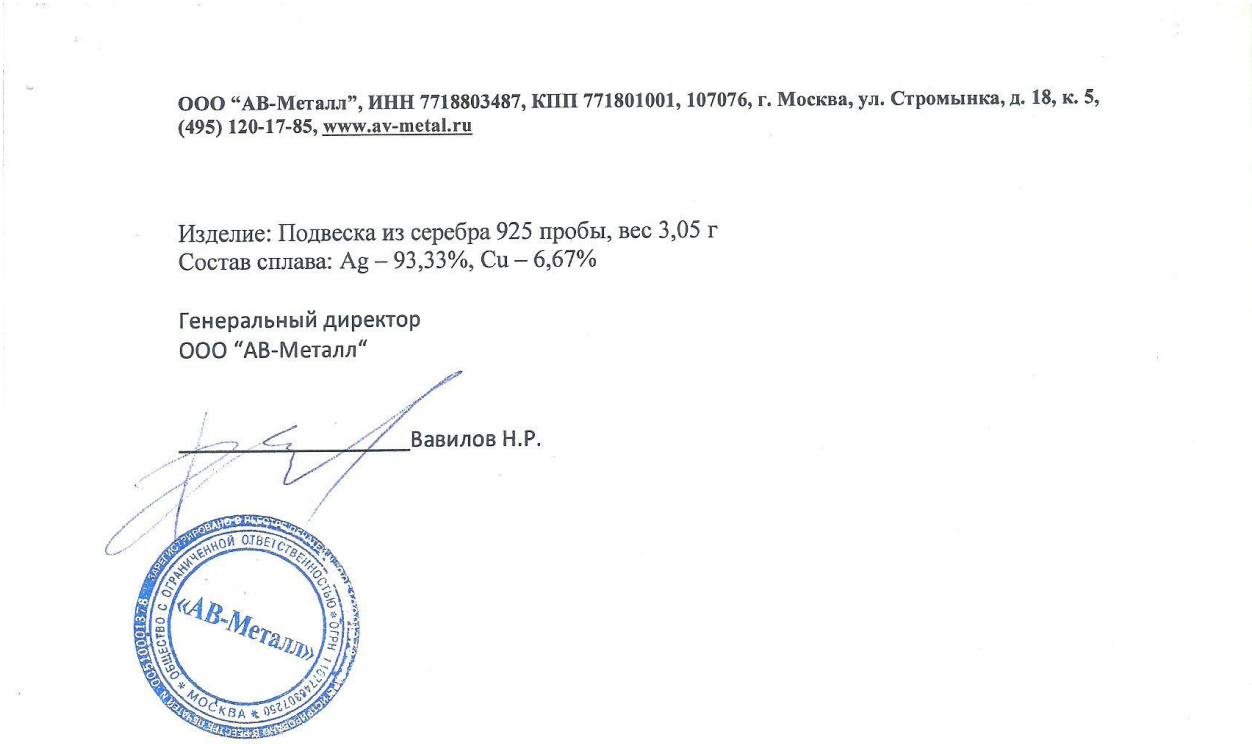
Реферат:
Программа расширяет применение топологической оптимизации в художественной области. Первый модуль с формируемым алгоритмом позволяет использовать топологическую оптимизацию как прикладной инструмент получения облегченных изделий с оригинальными узорами и структурами. Алгоритм оптимизации формируется в виде руководства для пользователя, исходя из заданных им параметров. Программа ускоряет освоение технологии, знакомит с методами бионического проектирования, помогает реализовать стандартные модели в новом оптимизированном виде. Второй модуль программы предназначен для подбора эффективного варианта аддитивной технологии для производства литейной модели в результате оптимизации.

Язык программирования: VBA для Access

Объем программы для ЭВМ: 33,8 МБ

Рис. В.2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024616416

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ



ООО "АВ-Металл", ИНН 7718803487, КПП 771801001, 107076, г. Москва, ул. Стромынка, д. 18, к. 5, (495) 120-17-85, www.av-metal.ru

Изделие: Подвеска из серебра 925 пробы, вес 3,05 г
Состав сплава: Ag – 93,33%, Cu – 6,67%

Генеральный директор
ООО "АВ-Металл"

_____Вавилов Н.Р.

«АВ-Металл»

Рис. Г.1. Заверенный результат рентгенофлуоресцентного анализа образца

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. АКТ О ВНЕДРЕНИИ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «АВ-Металл»

Вавилов Никита Робертович

«07» мая 2024 г.

Акт о внедрении
результатов диссертационной работы
Битюцкого Александра Дмитриевича

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационного исследования Битюцкого А.Д. на тему: «Применение аддитивных технологий в литейном производстве для изготовления художественных и ювелирных изделий с целью повышения их качества и художественной привлекательности» обладают актуальностью в области литейного производства, представляют практический интерес и применимы для проектирования и мелкосерийного производства художественных изделий в деятельности предприятия.

Результаты указанной диссертационной работы использованы в деятельности предприятия:

- Методика изготовления и постобработки бионических художественных изделий по технологиям 3D-печати и литья по выплавляемым моделям;
- Практические рекомендации по трехмерной печати моделей с литниками 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.

По предложенной в диссертации методике проведено опытно-промышленное опробование: разработаны топологически оптимизированные ювелирные и художественные модели, проведена постобработка их поверхности и формы на основании сформированных правил. Изготовлены качественные опытные образцы с бионической структурой по технологии литья по выплавляемым моделям.

Внедрение в производственный процесс указанных разработок позволило повысить художественную привлекательность разрабатываемых изделий и достичь снижения затрачиваемого материала на этапах трёхмерной печати восковых моделей и получения отливок по технологии литья по выплавляемым моделям.

Генеральный директор
ООО «АВ-Металл» М.П. Вавилов Н.Р.

Рис. Д.1. Акт о внедрении результатов диссертационной работы

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. АКТ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ОПРОБОВАНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «АВ-Металл»

Вавилов Никита Робертович

«01» августа 2024 г.

Акт опытно-промышленного опробования результатов диссертационной работы Битюцкого Александра Дмитриевича

Настоящим актом подтверждается, что по результатам диссертационного исследования Битюцкого А.Д. на тему: «Применение аддитивных технологий в литейном производстве для изготовления художественных и ювелирных изделий с целью повышения их качества и художественной привлекательности» было проведено изготовление опытных образцов — отливок двух конфигураций (кулонов) по разработанной аспирантом методике с применением топологической оптимизации — литьем по выплавляемым моделям из сплавов СрМ 925 и М67/33.

По результатам опробования установлено:

- Плавление металлов в вакуумной среде (при -1 бар) и заливка опоки расплавом при избыточном давлении (до +3 бар) в литейной вакуумной индукционной машине Indutherm VC 600 позволяет устранить образование усадочных раковин, сократить газоусадочную пористость на 75% и способствует снижению трудоемкости механической обработки на 40% в сравнении с результатами, полученными плавкой в атмосфере;
- Применение формомассы с содержанием 50…70% кристобалита, 25…35% кварца, 20…30% гипса от общего объема формомассы охарактеризовано отсутствием термического, механического и химического пригаров на поверхности отливок;
- Трехмерная печать топологически оптимизированных моделей с основаниями питателей способствует частичной автоматизации процесса создания литниково-питающей системы и снижению риска повреждения восковых моделей при её монтаже;
- Применение модельных масс на основе воска Visijet Icast RealWax и SETWAX CAST3 повышает точность воспроизведения сложных геометрических форм, снижает образование дефектов поверхности за счет малой зольности (<0,05%), линейной усадки (<0,8%) и низкой температуры плавления (65 °С).

В ходе опытно-промышленного опробования достигнуто значительное улучшение чистоты поверхности отливок, что позволяет сократить трудоемкость механической обработки; обеспечено точное воспроизведение сложногеометрических конфигураций и тонких сечений (d < 0,8 мм) в отливках. По разработанной аспирантом методике проектирования удалось добиться значительного снижения массы изделий, что улучшает их функциональные и эстетические характеристики.

Генеральный директор
ООО «АВ-Металл» М.П. Вавилов Н.Р.

Рис. Е.1. Акт опытно-промышленного опробования результатов диссертационной работы