

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

Политехнический институт

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет
им И. Н. Ульянова»



Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования

Сборник статей
Всероссийской научно-практической конференции
12 - 14 февраля 2025 года



Севастополь, 2025

УДК 621:004.9(063)
ББК 34.4-1в6я43
П278

Организаторы конференции:

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им И. Н. Ульянова»

Редакционная коллегия:

В.И. Головин - канд. техн. наук, доцент, директор Политехнического института;
А.Ю. Тараховский - канд. техн. наук, доцент, зав. каф. «Цифровое проектирование»;
О.В. Мухина - канд. техн. наук, PhD, доцент каф. «Цифровое проектирование»;
Т.А. Перевай - канд. техн. наук, доцент каф. «Цифровое проектирование»;
А.Ю. Бут - канд. техн. наук, доцент каф. «Цифровое проектирование».

Рецензент:

Д.В. Чавкин - директор ООО «Морской сервис»

П278 Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования:
сборник статей Всероссийской научно-практической конференции (12 - 14 февраля 2025 г.) /
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Севастопольский
государственный университет, Политехнический институт, кафедра цифрового
проектирования; главный редактор О.В. Мухина. – Севастополь: ФГАОУ ВО
«Севастопольский государственный университет», 2025. – 111 с.: ил. – Текст : электронный.

Публикуется по решению оргкомитета Всероссийской научно-практической
конференции, проведенной 12 - 14 февраля 2025 г. в ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», г. Севастополь (приказ №194-п от 05.02.25).

Материалы публикуются в авторской редакции.

В сборнике представлены результаты научно-исследовательской работы по проблемам
технологий реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования.

Сборник предназначен всем, специализирующимся в областях:

1. Реверс-инжиниринг. Особенности и преимущества.
2. Практическое применение аддитивных технологий.
3. Применение перспективных технологий в различных отраслях промышленности.
4. Возможности прототипирования для различных отраслей.

УДК 621:004.9(063)
ББК 34.4-1в6я43

ISBN 978-5-6053780-1-3



© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. Реверс-инжиниринг. Особенности и преимущества	5
<i>Денисенко Д.Д., Тараховский А.Ю.</i> Реверс-инжиниринг водомётного двигателя: от сканирования создания 3D модели	5
<i>Тараховский А.Ю.</i> Этика и законность реверс-инжиниринга в машиностроении	10
<i>Титов Д.И., Коротаева Е.В., Батинов И.В.</i> Реверс-инжиниринг как метод исследования и проектирования деталей, узлов, сборок.	17
<i>Якимович Б.А.</i> Алгоритм технологии изготовления сложных сборных изделий с использованием цифровых измерительных и обрабатывающих систем	22
Секция 2. Практическое применение аддитивных технологий	26
<i>Габдрахманов А.Т., Шафигуллин Л.Н., Галиакбаров А.Т.</i> Исследования и применение металлических порошков, полученных при плазменно-дуговом распылении	26
<i>Киселев П.А., Поздеева Т.Ю., Оглезнева С.А., Каченюк М.Н.</i> Исследование химического состава двухкомпонентного связующего для технологии 3D печати «METAL BINDER JETTING» физико-химическими методами	31
<i>Кричевец Д.С.</i> Применение методов быстрого прототипирования в ремонте автомобилей	36
<i>Шпенглер Р.Д., Маринин Е.А., Широкова Е.С.</i> Метод оценки прочностных характеристик изделий, полученных с использованием FFF-печати	42
<i>Махмутов И.Ф., Галиев А.Р., Тимербаев И.Ф.</i> Исследование прочности деталей полученных методом аддитивного производства	46
<i>Тараховский А.Ю.</i> Оптимизация выбора материалов для 3D-печати (FDM): влияние теплового расширения и механических свойств	49
<i>Тараховский А.Ю., Тараховский М.А.</i> Реверсинжиниринг клипсы крепления светильника	55
<i>Шафигуллин Л.Н., Романова Н.В., Габдрахманов А.Т.</i> Анализ материалов и технологий гранульной 3D печати для изготовления деталей автомобилей	61
Секция 3. Применение перспективных технологий в различных отраслях промышленности	67
<i>Емельянов И.А., Байчоров Р.А., Албул С.В.</i> Реверс-инжиниринг деталей вертолетного двигателя с использованием 3D-сканирования	67
<i>Вишняков А.Н., Ткаченко В.Р., Пичугова Л.Н.</i> Обоснование применения конструкционных материалов с учетом коэффициента теплового расширения и теплопроводности для трубопроводов	70
<i>Бут А.Ю.</i> Применение искусственного интеллекта в трёхмерном моделировании	73
<i>Перевай Т.А., Мухина О.В., Кравцова В.М.</i> Ультразвуковое электроконтактное уплотнение и его перспективы	82
<i>Першин О.В., Раскатов Е.Ю., Булганина М.Ю.</i> Сравнение уровней технологических нагрузок прошивных станов в различных трубопрокатных агрегатах	85
<i>Перевай Т.А.</i> Анализ и моделирование предприятия общественного питания	92

<i>Столяр И.Е., Стреляная Ю.О.</i> Использование перспективных технологий в автомобилестроении и автоспорте: революция 3D-печати и обратного инжиниринга.....	94
<i>Тараховский А.Ю.</i> Современные технологии 3D-сканирования: принципы работы, области применения и перспективы развития.....	98
Секция 4. Возможности прототипирования для различных отраслей	103
<i>Карфидов А.О. , Чиченев Н.А., Васильев М.В. , Чиченева О.Н.</i> Применение ступенчатой гибки для прототипирования дугообразных элементов тонколистовых деталей	103
<i>Паращук И.Б., Саяркин Л.А., Владимирова Е.С., Селезнев А.В.</i> Анализ сходных черт и различий в физической сущности, принципах и функциональном наполнении процессов быстрого прототипирования и создания цифровых двойников алгоритмов и программных средств для реализации поисковых запросов	106

Секция 1

РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ. ОСОБЕННОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА

УДК 621.01

РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ ВОДОМЁТНОГО ДВИГАТЕЛЯ: ОТ СКАНИРОВАНИЯ СОЗДАНИЯ 3D МОДЕЛИ

Д. Д. Денисенко¹, Тараховский А.Ю²

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь,
299001, Россия, denisenko.dd.56@gmail.com

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299001,
Россия, atarahovsky@gmail.ru

Аннотация. В статье рассматривается процесс реверс-инжиниринга водометного двигателя, включающий захват физической формы объекта с помощью лазерного 3D-сканирования и последующее создание точной цифровой 3D-модели. Описываются этапы обработки облака точек в Geomagic Design X, построения полигональной сетки и создания параметрической модели в связке Geomagic Design X + КОМПАС-3D/ SolidWorks. Особое внимание уделяется нахождению ориентиров для правильной ориентации скана и созданию детали фронтальной крепежной части для интеграции в сборку судна. Представлен метод верификации точности полученной 3D-модели с использованием Control X для Geomagic.

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, водометный двигатель, 3D-сканирование, Geomagic Design X, КОМПАС-3D, SolidWorks, облако точек, полигональная сетка, параметрическое моделирование, верификация 3D-модели, Control X.

REVERSE-ENGINEERING OF A WATER JET ENGINE: FROM SCANNING TO 3D MODEL CREATION

D. D. Denisenko¹, Tarakhovskiy A.Yu²

¹FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299001, Russia,
denisenko.dd.56@gmail.com

²FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299001, Russia, atarahovsky@gmail.ru

Annotation. The paper deals with the process of reverse-engineering of a water jet engine, which includes capturing the physical shape of the object using 3D laser scanning and subsequent creation of an accurate digital 3D model. The stages of point cloud processing in Geomagic Design X, polygonal mesh construction and parametric model creation in Geomagic Design X + KOMPAS-3D/ SolidWorks are described. Particular attention is paid to finding landmarks for correct orientation of the scan and creation of the frontal fastener part detail for integration into the ship assembly. A method for verifying the accuracy of the resulting 3D model using Control X for Geomagic is presented.

Keywords: reverse engineering, water jet engine, 3D scanning, Geomagic Design X, KOMPAS-3D, SolidWorks, point cloud, polygonal mesh, parametric modelling, 3D model verification, Control X.

Введение

В статье разрабатывается процесс реверс-инжиниринга водометного двигателя, сложный и многоэтапный процесс, который начинается с захвата физической формы объекта и заканчивается созданием его точной цифровой 3D-модели [12]. Основная цель — получить параметрическую 3D-модель, пригодную для дальнейшего анализа, модификации и производства новых деталей. Процесс включает в себя несколько ключевых этапов, таких как объект сканирования для «облака точек», получение и обработка этих данных, создание полигональной сетки, преобразование сетки в твердотельную 3D-модель в САПР и, наконец, верификация полученной модели на соответствие оригиналу.

Сканирование объекта

Сканер направляет лазерный луч на поверхность объекта, а затем фиксирует отраженный сигнал. Это позволяет создать «облако точек» — набор координат в трехмерном пространстве, которые точно описывают форму и размеры объекта.

Сканирование проводится с разных ракурсов, чтобы охватить все части водометного двигателя, включая труднодоступные участки (рис. 1). Точность сканирования зависит от качества оборудования и правильности его настройки [2, 6, 7, 10].

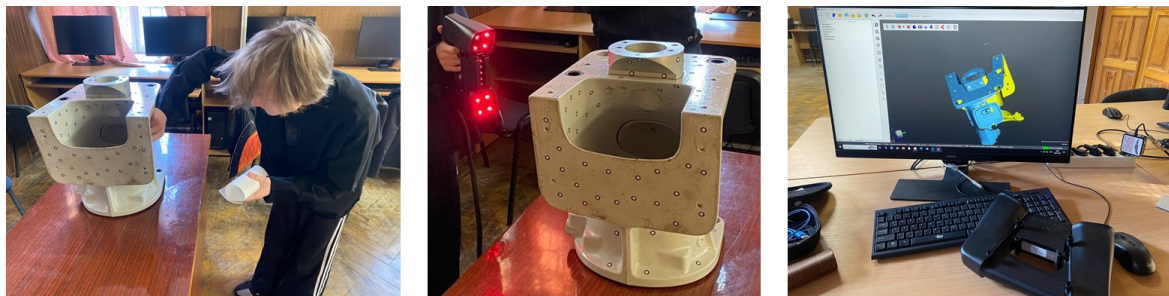


Рис. 1. Сканирование корпуса двигателя

Полученное облако точек является основой для всех последующих этапов, поэтому важно минимизировать ошибки на этом этапе.

После завершения сканирования у нас есть облако точек, которое представляет собой цифровую копию поверхности двигателя (рис. 2). Однако это еще не готовая модель, а лишь сырые данные, которые требуют дальнейшей обработки.

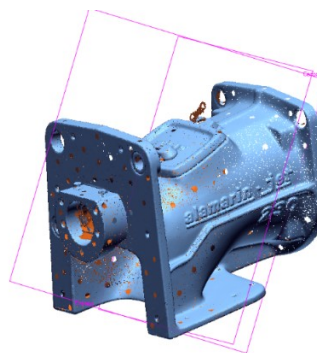


Рис. 2. Графическое представление облака

Очистка облака точек

После включения водометного двигателя с помощью ручного лазерного 3D-сканера *Scanform L5* и получения облака точек, возникает необходимость очистки его от лишних данных, шумов и артефактов, вызванных отражениями, неровностей поверхности или ошибок устройства. Для подготовки данных к дальнейшей работе, а именно к созданию качественной полигональной сетки, проводится очистка [5, 8]. Все операции по очистке и обработке облаков выполняются в специализированном программном обеспечении *Geomagic Design X* (рис. 3).

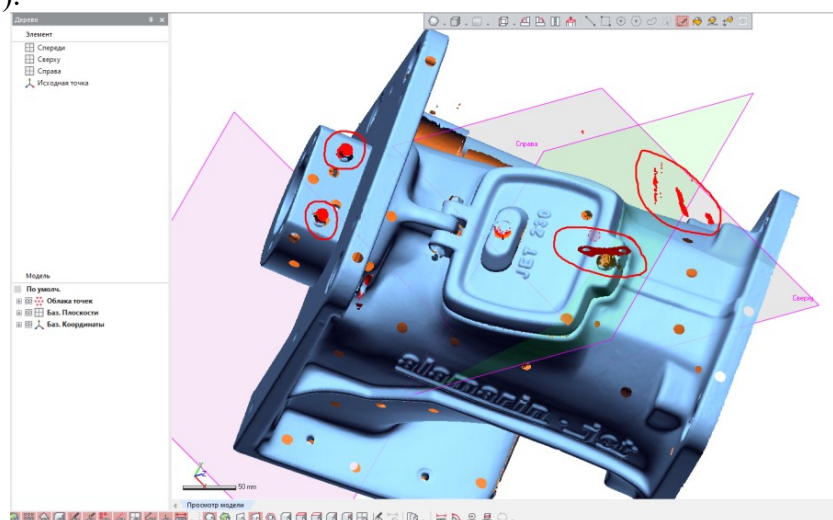


Рис. 3. Очистка облака точек и подготовка скана для построения полигональной сетки

Процесс очистки включает следующие этапы:

Импорт данных: Облако точек в виде *ply*-файла, полученное с помощью программного обеспечения Scanform, импортируется в *Geomagic Design X*.

Фильтрация: Использование таких инструментов, как «Удаление выбросов» (случайная ошибочная геометрия) и «Шумоподавление» (снижение шумов скана), автоматически исключаются случайные и нежелательные элементы, такие как смещённые плоскости и артефакты от зеркальных поверхностей.

Ручная коррекция: оператор вручную удаляет артефакты или добавляет недостающие точки, если это необходимо для восстановления точных данных геометрии.

После очистки получается оптимизированное облако точек, готовое для преобразования в полигональную сетку.

Создание полигональной сетки

Очищенное облако точек преобразуется в полигональную сетку — набор связанных между собой треугольников или других многоугольников, которые формируют поверхность объекта [1, 11]. Этот этап важен для перехода от точечного представления к более удобной для моделирования форме.

Процесс создания сетки:

Импорт данных: Очищенное облако точек загружается в *Geomagic Wrap*.

Генерация сетки: С помощью инструмента *Surface Reconstruction* создается полигональная сетка.

Оптимизация: Плотность полигонов регулируется для снижения нагрузки на вычислительные ресурсы без потери детализации.

Получается полигональная сетка, которая точно повторяет форму водометного двигателя и готова для импорта в САПР.

Проектирование 3D-модели

На данном этапе с помощью полигональной сетки производится построение параметрической 3D-модели, подходящей для дальнейшего проектирования, анализа и производства [3, 4]. Для этого используются системы автоматизированного проектирования (САПР), такие как SolidWorks, Autodesk Inventor или KOMPAS-3D. В нашем случае использовалась связка ПО Geomagic Design X + KOMPAS-3D/ SolidWorks.

Процесс создания параметрической модели включает в себя следующие основные шаги:

Нахождение ориентиров:

Для точного перемещения модели в пространстве использовались ориентиры, сохраненные из поврежденных поверхностей с помощью инструмента «Автоматическое разбиение» (рис. 4).

Правильная ориентация скана:

Ориентация скана корректируется координатами нулевых осей САПР, что обеспечивает правильное расположение модели (рис. 5).

Создание твердого тела:

На основе 2D-эскизов, полученных с использованием инструмента «Эскиз по сетке», переносим через *LiveTransfer* сам скан и вспомогательную геометрию в *SolidWorks* для дальнейшего построения твердотельной модели.

Получение детали фронтальной крепежной части:

Отдельно отделяется и моделируется деталь фронтальной крепежной части корпуса водомета. Это необходимо для дальнейшего продвижения моделей при сборке судна и точной корректировки креплений на корпусе.

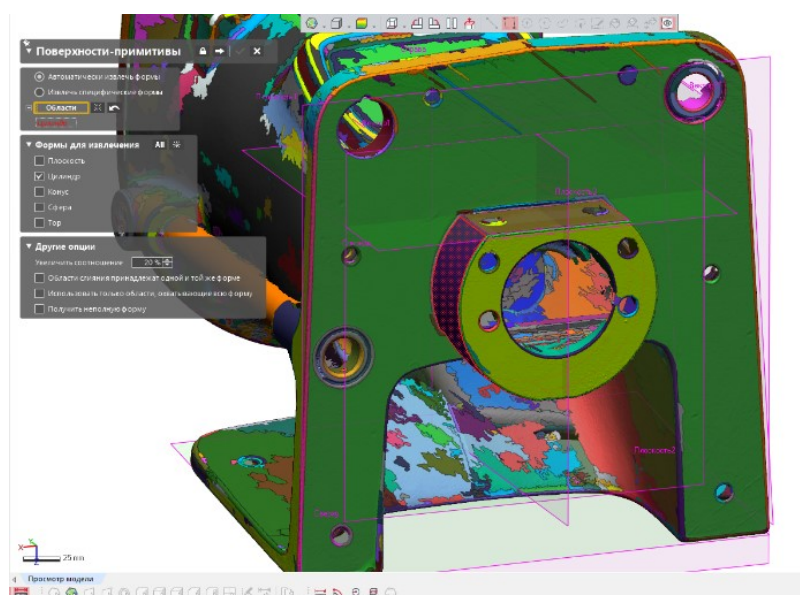


Рис. 4. Нахождение ориентиров по примитивам

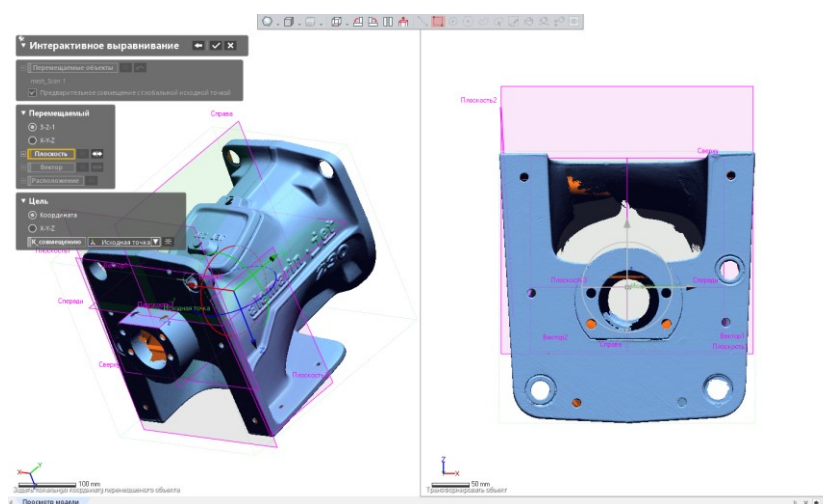


Рис. 5. Выравнивание скана относительно нулевых плоскостей

В результате этих операций получается готовая параметрическая 3D-модель водометного двигателя, включающая все необходимые элементы для анализа и модификации (рис. 6). Особое внимание уделяется точности крепежных элементов для обеспечения точной фиксации водомета.

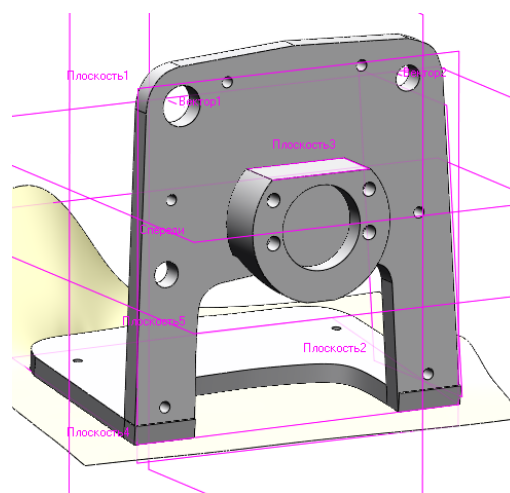


Рис. 6. Твердое тело, полученное при построении

Верификация и анализ

Заключительный этап включает проверку соответствия созданной 3D-модели оригинальному объекту [9]. Для верификации модели относительно оригинала используется расширение Control X для Geomagic. Этот инструмент позволяет создавать 3D-модели с

внешним объектом, анализировать отклонения и выявлять ошибки, а также предоставлять отчеты с подробной информацией о точности модели (рис. 7). После верификации мы получаем точную и проверенную 3D-модель водометного двигателя, которая готова к использованию в дальнейшем производстве, анализе и модификации.

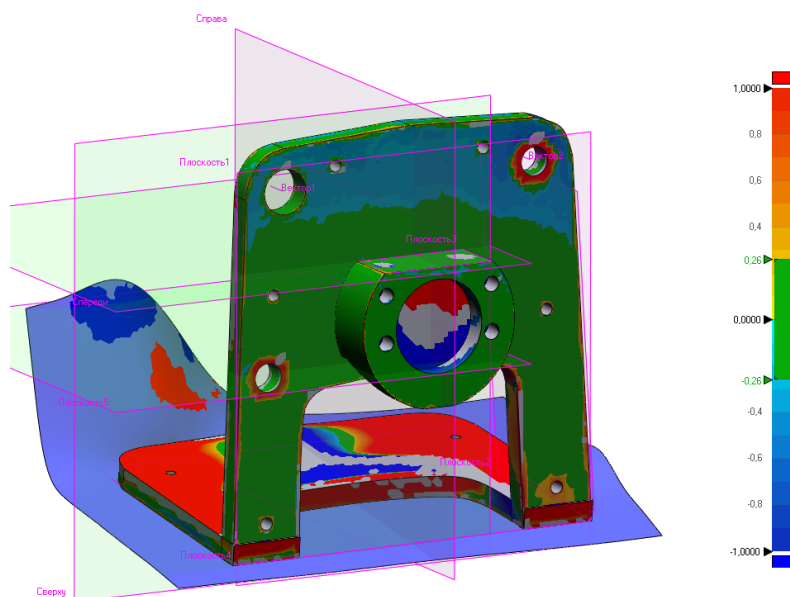


Рис. 7. Проверка точности построения с помощью Accuracy Analyzer (TM)

Заключение

1. Эффективность метода: Представленная методика позволяет получать точные цифровые копии сложных объектов, таких как водометные двигатели, благодаря применению современных технологий сканирования и специализированного программного обеспечения.

2. Многоэтапность процесса: Процесс создания цифровой модели требует нескольких последовательных шагов, начиная от сканирования до конечной проверки точности, что подчеркивает важность каждого этапа для достижения качественного результата.

3. Инструменты и технологии: Применение различных программных решений и методов обработки данных делает процесс универсальным и применимым для широкого спектра инженерных задач.

4. Практическое применение: Готовые 3D-модели могут использоваться для дальнейших исследований, оптимизации конструкции, а также для изготовления деталей, что открывает возможности для автоматизации производственных процессов.

Таким образом, в статье демонстрирует комплексный подход к созданию цифровых моделей сложных технических объектов, который основывается на современных технологиях и инструментах, обеспечивая высокую точность и эффективность.

Список литературы

1. Krylova, E. E. Application of Coons and Gordon Surface Modeling Apparatus in Reverse Engineering of Turbomachinery Components / E. E. Krylova, S. E. Slyadnev, V. E. Turlapov // Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision "Graphicon". – 2023. – No. 33. – P. 896-901.
2. Бологов, А. В. Влияние параметров освещения на процесс сканирования / А. В. Бологов, А. А. Голунов, А. Д. Горбатов // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2024 по направлению "Инновационные ядерные технологии" : сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции, Снежинск, 31 января – 02 февраля 2024 года. – Москва : Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 2024. – С. 10-12.
3. Дорожкин, А. Д. Разработка и производство высокотехнологичных деталей для авиатехники с применением 3D-технологий / А. Д. Дорожкин, П. А. Лончих // Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств : материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 24–26 апреля 2024 года. – Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2024. – С. 255-258.

4. Кожарина, Т. В. Реверс-инжиниринг деталей почвообрабатывающих машин для проведения конечно-элементного анализа / Т. В. Кожарина, С. В. Карпов, А. Р. Гороновский. – DOI 10.52065/2519-402X-2024-276-20 // Труды БГТУ. Серия 1 : Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2024. – № 1(276). – С. 150-156.
5. Медведев, В. И. Программы для обработки данных лазерного сканирования местности / В. И. Медведев, Л. С. Райкова. – DOI 10.17273/CADGIS.2017.2.2 // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2017. – № 2(9). – С. 10-31.
6. Применение технологии трехмерного сканирования для создания цифровых двойников станочного оборудования / О. А. Рябинина, А. И. Болдырев, А. А. Болдырев, Д. Ю. Левин. – DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.2.030 // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20, № 2. – С. 199-206.
7. Саса, Д. А. Использование многофункционального измерительного манипулятора для контроля параметров получаемых после механической обработки / Д. А. Саса, А. Ю. Тараховский // Вестник современных технологий. – 2020. – № 3(19). – С. 54-59.
8. Саса, Д. А. Создание методики повышения производительности процесса создания твердотельной 3-D модели из реального объекта с помощью оптического сканера / Д. А. Саса, А. Ю. Тараховский // Современные технологии: проблемы и перспективы : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых ученых, Севастополь, 19–22 апреля 2021 года. – Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2021. – С. 49-55.
9. Сорокин, М. И. Преобразование данных облака точек в 3Б-модели с помощью pointnet++ и Transformer / М. И. Сорокин, Д. Д. Жданов, А. Д. Жданов. – DOI 10.31857/S0132347424030044 // Программирование. – 2024. – № 3. – С. 33-41.
10. Тараховский, А. Ю. Реверс-инжиниринг коленчатого вала компрессора / А. Ю. Тараховский, И. А. Смирнов. – DOI 10.26160/2658-3305-2023-18-91-97 // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 18. – С. 91-97.
11. Тараховский, А. Ю. Трехмерное моделирование объекта на основе данных лазерного 3D сканирования / А. Ю. Тараховский. – DOI 10.26160/2309-8864-2023-14-16-19 // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2023. – № 14. – С. 16-19.
12. Управление жизненным циклом продукции / В. Б. Богущкий, С. Н. Писарюк, Н. А. Русина [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – 133 с. – ISBN 978-5-8088-1657-2.

УДК 17:34(075):621

ЭТИКА И ЗАКОННОСТЬ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА В МАШИНОСТРОЕНИИ

А.Ю. Тараховский¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299001, Россия, aytarakhovskiy@sevsu.ru

Аннотация. В статье рассматриваются этика и законность реверс-инжиниринга в машиностроении. Реверс-инжиниринг – это анализ и воссоздание продуктов для изучения их конструкции и функций. Этот метод важен для машиностроения, так как помогает улучшать продукцию и стимулировать инновации. Однако он связан с этическими вопросами, такими как нарушение прав интеллектуальной собственности, конфиденциальность и безопасность. Международные соглашения (ТРИПС, Парижская конвенция) и национальные законы (ГК РФ, ДМСА) регулируют использование реверс-инжиниринга. Известны случаи судебных разбирательств, например, дела Sony против Connectix и Oracle против Google. Реверс-инжиниринг допустим при исследовательских целях, совместимости, исправлении ошибок и изучении безопасности. Важно соблюдать баланс между защитой прав и поддержкой инноваций.

Ключевые слова: Реверс-инжиниринг, машиностроение, интеллектуальная собственность, конкуренция, этические вопросы, правовые нормы, ТРИПС, судебные разбирательства, исследования, инновации.

ETHICS AND LEGALITY OF REVERSE ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

A.Y. Tarakhovsky ¹

¹*FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299001, Russia, aytarakhovskiy@sevsu.ru*

Abstract. *The article discusses the ethics and legality of reverse engineering in mechanical engineering. Reverse engineering is the analysis and reconstruction of products to study their design and functions. This method is important for mechanical engineering, as it helps to improve products and stimulate innovation. However, it involves ethical issues such as intellectual property infringement, privacy, and security. International agreements (TRIPS, Paris Convention) and national laws (Civil Code of the Russian Federation, DMCA) regulate the use of reverse engineering. There have been cases of litigation, such as Sony v. Connectix and Oracle v. Google. Reverse engineering is acceptable for research purposes, compatibility, bug fixing, and security studies. It is important to strike a balance between protecting rights and supporting innovation.*

Keywords: *Reverse engineering, mechanical engineering, intellectual property, competition, ethical issues, legal norms, TRIPS, litigation, research, innovation.*

Введение. Реверс-инжиниринг, как метод исследования и анализа существующих продуктов с целью воссоздания их функциональности или улучшения конструкции, занимает важное место в современном мире технологий. В машиностроении этот процесс играет ключевую роль в разработке новых решений, повышении конкурентоспособности компаний и улучшении качества продукции [1 - 7, 23]. Однако, несмотря на его очевидные преимущества, применение реверс-инжиниринга вызывает множество этических и правовых вопросов. Понимание этих аспектов поможет не только избежать юридических рисков, но и способствовать развитию отрасли машиностроения в рамках этически обоснованных и законных рамок.

Цель исследования – анализ этических и правовых аспектов применения реверс-инжиниринга в машиностроении. Исследование направлено на выявление основных проблем, связанных с использованием этой методики, а также на поиск путей их решения. Оно позволит лучше понять, каким образом можно сбалансировать интересы инновационного развития и защиты интеллектуальной собственности, что особенно важно в условиях растущей конкуренции и стремления к технологическим прорывам.

Изложение основного материала.

Реверс-инжиниринг (обратная разработка) – это процесс анализа готового изделия с целью воссоздания его конструкции, принципов работы или технологий производства. В машиностроении он используется для создания аналогов существующих изделий, улучшения продукции конкурентов или восстановления утраченных чертежей и документации.

Рассмотрим международные соглашения и стандарты о реверс-инжиниринге. На международном уровне существует несколько соглашений и стандартов, регулирующих реверс-инжиниринг, которые направлены на защиту интеллектуальной собственности и предотвращение недобросовестной конкуренции. Рассмотрим некоторые из них:

1. Соглашение ТРИПС (TRIPS): Это соглашение Всемирной торговой организации (ВТО) устанавливает минимальные стандарты защиты интеллектуальной собственности во всех странах-членах ВТО [8]. Оно охватывает патенты, торговые марки, авторские права и другие формы интеллектуальной собственности. В контексте реверс-инжиниринга важно отметить, что использование запатентованной технологии без согласия владельца может считаться нарушением этого соглашения.

2. Парижская конвенция по охране промышленной собственности: Этот международный договор, подписанный более чем 170 странами, защищает изобретения, полезные модели, промышленные образцы, товарные знаки и фирменные наименования [9]. Конвенция предусматривает меры против недобросовестного использования промышленных образцов и других объектов интеллектуальной собственности, включая реверс-инжиниринг.

3. Бернская конвенция об охране литературных и художественных произведений: Хотя эта конвенция касается преимущественно авторских прав, она также затрагивает

вопросы реверс-инжиниринга программного обеспечения [10]. Она требует от стран-участниц предоставления адекватной правовой охраны компьютерным программам как литературным произведениям.

4. **ISO/IEC 27001**: Этот стандарт информационной безопасности включает требования к защите данных и информации, которая может быть использована для реверс-инжиниринга. Он помогает компаниям обеспечить безопасность своих разработок и предотвратить несанкционированный доступ к конфиденциальной информации.

5. **Директива ЕС о правовой охране компьютерных программ (2009/24/ЕС)**: Эта директива Европейского Союза запрещает декомпилирование программного обеспечения, если оно осуществляется с целью создания аналогичного продукта или для нарушения авторских прав [11]. Однако есть исключения, например, для целей совместимости или исправления ошибок.

6. **WIPO Copyright Treaty (DCT)**: Договор ВОИС по авторскому праву расширяет защиту компьютерных программ и баз данных, что также влияет на возможности реверс-инжиниринга в этих областях [12].

Эти международные соглашения и стандарты создают основу для регулирования реверс-инжиниринга на глобальном уровне, обеспечивая баланс между защитой интеллектуальной собственности и необходимостью инновационного развития.

Кроме международных соглашений и стандартов существуют и национальные законодательные акты о реверс-инжиниринге. Национальные законодательные акты о реверс-инжиниринге варьируются в зависимости от страны, но большинство государств имеют законы, направленные на защиту интеллектуальной собственности и регулирование этой практики. Рассмотрим несколько примеров национальных законодательств:

Россия

1. **Гражданский кодекс Российской Федерации (ГК РФ)**: Статья 1358 ГК РФ регулирует патентное право и указывает, что использование запатентованного объекта без разрешения патентообладателя считается нарушением [13]. Это относится и к случаям реверс-инжиниринга, когда используются запатентованные технологии.

2. **Федеральный закон «О коммерческой тайне»**: Закон защищает информацию, составляющую коммерческую тайну, включая технологические секреты. Несанкционированное получение такой информации через реверс-инжиниринг может повлечь ответственность [14].

США

1. **Закон о патентах (35 U.S.C.)**: Согласно этому закону, реверс-инжиниринг не нарушает патентные права, если проводится исключительно для исследовательских целей или для понимания принципа действия устройства. Однако использование результатов реверс-инжиниринга для создания конкурирующего продукта может привести к нарушению патентов.

2. **Digital Millennium Copyright Act (DMCA)**: Этот акт запрещает обход технических средств защиты авторских прав, что может включать реверс-инжиниринг программного обеспечения. Исключением являются случаи, связанные с исследованием уязвимостей или обеспечением совместимости.

Европейский Союз

1. **Директивы и регламенты ЕС**: Как уже упоминалось ранее, Директива ЕС о правовой охране компьютерных программ (2009/24/ЕС) запрещает декомпилирование программного обеспечения с целью создания аналогичных продуктов. Однако существуют исключения для целей совместимости и устранения дефектов.

2. **Регламент ЕС № 1257/2012**: Регулирует процедуру регистрации и защиты промышленных образцов в рамках ЕС. Нарушение прав на зарегистрированные образцы путем реверс-инжиниринга может повлечь юридическую ответственность.

Китай

1. **Закон КНР о патентах:** Китайское законодательство о патентах защищает изобретения, полезные модели и промышленные образцы [15]. Использование запатентованных технологий без разрешения может быть признано нарушением закона.

2. **Закон КНР о борьбе с недобросовестной конкуренцией:** Этот закон направлен на предотвращение незаконной деятельности, связанной с использованием коммерческих секретов и неправомерным получением преимуществ на рынке, что может охватывать реверс-инжиниринг.

Япония

1. **Патентный закон Японии:** Японское законодательство защищает патенты и права на изобретения. Нарушение патентных прав через реверс-инжиниринг может повлечь за собой судебные разбирательства и штрафы.

2. **Закон о недобросовестной конкуренции:** Этот закон запрещает использование методов, которые могут нанести ущерб конкурентоспособности компаний, включая реверс-инжиниринг, если он проводится с целью получения несправедливого преимущества.

Таким образом, национальные законодательные акты о реверс-инжиниринге направлены на защиту интеллектуальной собственности и предотвращение недобросовестной конкуренции. Важно помнить, что конкретные правила и ограничения могут различаться в разных юрисдикциях, поэтому перед проведением реверс-инжиниринга следует ознакомиться с местным законодательством.

Рассмотрим этические вопросы реверс-инжиниринга в машиностроении. Этика реверс-инжиниринга в машиностроении связана с рядом моральных и правовых вопросов, касающихся добросовестности и уважения к правам интеллектуальной собственности. Рассмотрим основные аспекты:

1. **Нарушение прав интеллектуальной собственности.** Одним из главных этических вопросов является возможное нарушение прав владельцев патентов, торговых марок и других форм интеллектуальной собственности. Даже если реверс-инжиниринг формально не нарушает закон, использование чужих идей и технологий без согласия может восприниматься как неэтичное поведение.

2. **Недобросовестная конкуренция.** Создание аналогов или копий машин и оборудования с помощью реверс-инжиниринга может рассматриваться как попытка обойти традиционные методы инновации и разработки новых продуктов. Это может подрывать доверие потребителей и наносить вред репутации компании.

3. **Конфиденциальность и коммерческая тайна.** Получение доступа к конфиденциальной информации через реверс-инжиниринг может представлять угрозу для бизнеса и конкурентоспособности компании. Этически правильным будет уважать границы частной собственности и избегать несанкционированного доступа к закрытым данным.

4. **Безопасность и качество продукции.** При создании аналогов через реверс-инжиниринг существует риск снижения качества и безопасности продукции. Недостаточно точное воспроизведение может привести к дефектам, авариям и другим негативным последствиям. С точки зрения этики, производители обязаны обеспечивать безопасность своей продукции.

5. **Инновационное развитие.** Реверс-инжиниринг может тормозить инновационные процессы, поскольку компании вместо того, чтобы разрабатывать новые продукты, сосредотачиваются на копировании существующих. Это противоречит принципам прогресса и технического совершенствования.

6. **Социальная ответственность.** Компании несут социальную ответственность за свою деятельность, включая уважение к правам других участников рынка. Неэтичные практики реверс-инжиниринга могут подорвать доверие общества и негативно сказаться на репутации компании.

Этические вопросы реверс-инжиниринга в машиностроении требуют внимательного подхода со стороны компаний и инженеров. Уважение к правам интеллектуальной

собственности, добросовестная конкуренция и забота о безопасности продукции являются ключевыми аспектами этического поведения в данной сфере.

Проведем анализ известных судебных разбирательств в области реверс-инжиниринга машиностроительных изделий.

Судебные разбирательства в области реверс-инжиниринга машиностроительных изделий представляют собой важные прецеденты, которые помогают формировать правоприменительную практику и определять границы допустимого использования этой методики. Рассмотрим несколько известных случаев:

1. Дело "Sony Computer Entertainment Inc. v. Connectix Corp." (США)

Это дело связано с созданием эмулятора PlayStation, разработанного компанией Connectix. Sony утверждала, что Connectix нарушила её авторские права, проводя реверс-инжиниринг консоли PlayStation для создания эмулятора. Окружной суд Калифорнии признал, что реверс-инжиниринг был необходим для создания совместимой программы и не нарушал авторские права Sony. Однако Апелляционный суд девятого округа отменил это решение, указав, что реверс-инжиниринг мог быть оправдан только в случае необходимости, а не для создания конкурирующей продукции.

2. Дело "Sega Enterprises Ltd. v. Accolade Inc." (США)

Компания Sega обвинила Accolade в нарушении её авторских прав путём реверс-инжиниринга игровой консоли Sega Genesis для создания игр, совместимых с этой системой. Суд постановил, что реверс-инжиниринг был правомерным, поскольку Accolade использовала полученные данные для создания собственных игр, а не для копирования существующего контента Sega.

3. Дело "Lexmark International, Inc. v. Static Control Components, Inc." (США)

Lexmark, производитель принтеров, подал иск против Static Control Components (SCC), обвиняя компанию в нарушении своего патента и авторских прав на программное обеспечение, используемое в картриджах для принтера. SCC утверждал, что использовал реверс-инжиниринг для создания чипов, совместимых с принтерами Lexmark. Суд решил, что SCC действовал правомерно, поскольку реверс-инжиниринг был использован для создания совместимых компонентов, а не для копирования оригинальной продукции Lexmark.

4. Дело "Oracle America, Inc. v. Google Inc." (США)

Google была обвинена Oracle в нарушении авторских прав на Java API при разработке операционной системы Android. Google утверждал, что использовал реверс-инжиниринг для создания совместимых интерфейсов программирования. Дело дошло до Верховного суда США, который направил его обратно в нижестоящий суд для дальнейшего рассмотрения.

Судебные разбирательства показывают, что реверс-инжиниринг может быть признан законным, если он используется для создания совместимых продуктов или исследований, направленных на улучшение существующей техники. Однако использование реверс-инжиниринга для создания прямых копий или нарушения прав интеллектуальной собственности чаще всего признается незаконным. Эти прецеденты помогают устанавливать четкие границы применения реверс-инжиниринга в машиностроительном секторе.

Реверс-инжиниринг допускает закон в ряде ситуаций, когда он служит целям, не противоречащим законодательству о защите интеллектуальной собственности и других нормативных актов. Рассмотрим основные случаи, когда реверс-инжиниринг может быть законным:

1. Исследовательские цели

Если реверс-инжиниринг проводится исключительно для научных исследований или изучения принципов работы устройства, это может быть разрешено. Например, исследование механизмов работы машины для улучшения будущих разработок или выявления недостатков.

2. Совместимость

Создание совместимых продуктов или компонентов также может быть основанием для легального реверс-инжиниринга. Примером может служить создание программного

обеспечения или аппаратуры, совместимой с существующими системами, такими как операционные системы или оборудование.

3. Исправление ошибок и устранение неисправностей

Реверс-инжиниринг может использоваться для диагностики и ремонта устройств, особенно если оригинальная документация или поддержка недоступны. Это особенно актуально для устаревшего оборудования, для которого больше нет технической поддержки.

4. Интероперабельность

Законодательство многих стран, включая США и Евросоюз, разрешает реверс-инжиниринг для обеспечения интероперабельности различных систем. Это означает, что компании могут использовать реверс-инжиниринг для создания продуктов, способных взаимодействовать с другими продуктами на рынке.

5. Изучение безопасности

Реверс-инжиниринг может применяться для оценки безопасности продуктов, поиска уязвимостей и разработки мер по их устранению. Это важно для повышения общей безопасности информационных систем и предотвращения кибератак.

6. Создание улучшенных версий

Если реверс-инжиниринг используется для создания улучшенной версии продукта, не нарушая при этом прав интеллектуальной собственности, это тоже может быть законным. Главное условие — не прямое копирование, а внесение существенных изменений и улучшений.

Заключение

1. Закон допускает реверс-инжиниринг в тех случаях, когда он служит полезным и общественно значимым целям, таким как научные исследования, повышение совместимости, ремонт и улучшение безопасности. Однако всегда важно учитывать местные законы и нормативные акты, чтобы избежать нарушений прав интеллектуальной собственности и других юридических ограничений.

2. Правовые нормы играют важную роль в защите интеллектуальной собственности и обеспечении справедливой конкуренции. Однако чрезмерные ограничения могут стать препятствием для инновационного процесса в машиностроении. Для поддержания здорового баланса между защитой прав и стимуляцией инноваций необходимы гибкие подходы к регулированию, учитывающие интересы как разработчиков, так и пользователей новых технологий.

3. Реверс-инжиниринг является мощным инструментом для разработки новых продуктов в машиностроении. Он позволяет компаниям создавать совместимые запчасти, улучшать существующие изделия, адаптировать иностранные технологии и даже восстанавливать устаревшее оборудование. Важно, однако, соблюдать правовые нормы и этические принципы, чтобы избежать нарушений прав интеллектуальной собственности и недобросовестной конкуренции.

Список литературы.

1. Тараховский, А. Ю. Реверс-инжиниринг коленчатого вала компрессора / А. Ю. Тараховский, И. А. Смирнов. — DOI 10.26160/2658-3305-2023-18-91-97. — Текст : непосредственный // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2023. — № 18. — С. 91-97.
2. Рожкова, Л. Нужен системный подход. Реверс-инжиниринг как один из инструментов импортозамещения / Л. Рожкова. — Текст : непосредственный // Русский инженер. — 2024. — № 2(83). — С. 18-21.
3. Управление жизненным циклом продукции / В. Б. Богуцкий, С. Н. Писарюк, Н. А. Русина [и др.]. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. — 133 с. — ISBN 978-5-8088-1657-2. — Текст : непосредственный.
4. Импортозамещение компрессорного оборудования иностранного производства посредством реверс-инжиниринга / А. Ф. Сарманаева, Н. В. Соколов, А. М. Ахметзянов [и др.]. — Текст : непосредственный // Новые направления и тренды инновационной деятельности на предприятиях газовой промышленности : сборник тезисов XIV научно-практической конференции молодых ученых и специалистов ООО «Газпром трансгаз Казань», Казань, 19–22 декабря 2023 года. — Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2024. — С. 25-33.
5. Тараховский, А. Ю. Реверс инжиниринг импеллера / А. Ю. Тараховский, М. А. Тараховский, И. А. Кинаш. — Текст : непосредственный // Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого

прототипирования : сборник статей всероссийской научно-практической конференции, Севастополь, 13–15 мая 2024 года. – Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2024. – С. 41–45.

6. Медведев, И. А. Реверс инжиниринг: поиск механизма технологических решений / И. А. Медведев, Ю. Н. Маркова. — Текст : непосредственный // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) : материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции, Иркутск, 13–14 мая 2024 года. – Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2024. – С. 133–138.

7. Тараховский, А. Ю. Трехмерное моделирование объекта на основе данных лазерного 3D сканирования / А. Ю. Тараховский. – DOI 10.26160/2309-8864-2023-14-16-19. — Текст : непосредственный // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2023. – № 14. – С. 16–19.

8. Соглашение по торговым аспектам прав интеллектуальной собственности (ТРИПС) : марракешское соглашение об учреждении Всемирной торговой организации от 15 апреля 1994 г. Приложение 1С. — Текст : непосредственный // Сборник действующих договоров, соглашений и конвенций, заключенных СССР с иностранными государствами. – М. : Международные отношения, 2002. – Вып. XLVI. – С. 485–518.

9. Парижская конвенция по охране промышленной собственности : заключена в Париже 20 марта 1883 года : изменена в Брюсселе 14 декабря 1900 года, в Вашингтоне 2 июня 1911 года, в Гааге 6 ноября 1925 года, в Лондоне 2 июня 1934 года, в Лиссабоне 31 октября 1958 года и в Стокгольме 14 июля 1967 года : пересмотрена в Мюнхене 28 сентября 1979 года. — Текст : электронный // Консультант Плюс : справочно-правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5111/ (дата обращения: 01.02.2025).

10. Бернская конвенция об охране литературных и художественных произведений : заключена в Берне 9 сентября 1886 года : изменена в Париже 4 мая 1896 года : пересмотрена в Берлине 13 ноября 1908 года : дополнена в Берне 20 марта 1914 года : пересмотрена в Риме 2 июня 1928 года, в Брюсселе 26 июня 1948 года, в Стокгольме 14 июля 1967 года, в Париже 24 июля 1971 года : изменена 2 октября 1979 года. — Текст : электронный // Консультант Плюс : справочная правовая система. — Коммерческая версия. – URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=LAW&n=5112&dst=100002,1> (дата обращения: 01.02.2025). — Режим доступа: из локальной сети Севастопольского государственного университета.

11. Directive 2009/24/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the legal protection of computer programs. — Text : direct // Official Journal of the European Union. – 2009. – L 111. – Pp. 16–22.

12. WIPO Copyright Treaty (WCT) : adopted in Geneva on December 20, 1996. — Text : direct // World Intellectual Property Organization (WIPO). – Geneva : WIPO Publication, 1997. — 9 p.

13. Гражданский кодекс Российской Федерации (часть первая) : от 30 ноября 1994 г. №51-ФЗ : ред. от 25 февраля 2022 г. — Текст : непосредственный // Российская газета. – 2022. – 27 февраля.

14. О коммерческой тайне : Федеральный закон от 29 июля 2004 г. №98-ФЗ : ред. от 08.08.2024 № 251-ФЗ. — Текст : электронный // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?searchres=&bpas=cd00000&a3=&a3type=1&a3value=&a6=&a6type=1&a6value=&a15=&a15type=1&a15value=&a7type=1&a7from=&a7to=&a7date=&a8=&a8type=1&a1=%CE+%EA%EE%EC%EC%E5%F0%F7%E5%F1%EA%EE%E9+%F2%E0%E9%ED%E5&a0=&a16=&a16type=1&a16value=&a17=&a17type=1&a17value=&a4=&a4type=1&a4value=&a23=&a23type=1&a23value=&textpres=&sort=7&x=68&y=15> (дата обращения: 01.02.2025).

15. Regulation (EU) No 1257/2012 of the European Parliament and of the Council of 17 December 2012 implementing enhanced cooperation in the area of the creation of unitary patent protection. — Text : direct // Official Journal of the European Union. — 2012. — L 361. — Pp. 1–8.

16. Tarakhovskiy, A. Mechanical Device for Sealing Ring Mounting into Internal Groove and its Opening Technical and Economic Justification / A. Tarakhovskiy, B. Bukach, D. Tabakaev. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.658. — Text : direct // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, Saint-Petersburg, 16–19 мая 2017 года. – Saint-Petersburg, 2017. – P. 1438–1442.

17. Parametric synthesis of assembly device for fitting rubber sealing ring into the inner groove of the basic item / A. Tarakhovskiy, S. Sazonov, D. Tokarev, Y. Moroz. – DOI 10.1051/mateconf/201712901081. — Text : direct // MATEC Web of Conferences, Sevastopol, 11–15 сентября 2017 года. – Sevastopol : EDP Sciences, 2017. – Vol. 129. – P. 01081.

УДК 621.225.2

РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ, УЗЛОВ, СБОРОК

Д. И. Титов¹, Е. В. Коротаева², И. В. Батинов³¹ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск, 426069, Россия, sternhack02@gmail.com²ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск, 426069, Россия, lenakorotaeva14@mail.ru³ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск, 426069, Россия, ig.batinoff@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена понятию «реверс-инжиниринг», в условиях современного производства. Описываются наиболее применяемые методы реверс-инжиниринга, их сущность. Приведен пример проектирования и разработки сборки с усовершенствованием, в условиях реального производства, расчётом и построением модели изделия по применяемой методике реверс-инжиниринга. Рассматриваемое изделие спроектировано и согласовано на соответствие входным техническим характеристикам относительно образца-референса.

Ключевые слова: входные данные, гидроцилиндр поворотный, машиностроение, методики реверс-инжиниринга, проектирование, реверс-инжиниринг, результат разработки.

REVERSE ENGINEERING AS A METHOD OF RESEARCH AND DESIGN OF PARTS, ASSEMBLIES, ASSEMBLIES

D. I. Titov¹, E. V. Korotaeva², I. V. Batinov³¹FSBEIOFE «Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov», Izhevsk, 426069, Russia, sternhack02@gmail.com²FSBEIOFE «Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov», Izhevsk, 426069, Russia, lenakorotaeva14@mail.ru³FSBEIOFE «Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov», Izhevsk, 426069, Russia, ig.batinoff@yandex.ru

Annotation. The article is devoted to the concept of "reverse engineering" in the context of modern production. The most widely used methods of reverse engineering and their essence are described. An example of the design and development of an assembly with improvement, in real-world production conditions, calculation and construction of a product model using the applied reverse engineering methodology is given. The product in question is designed and coordinated to meet the input technical specifications of the reference sample.

Keywords: input data, rotary hydraulic cylinder, mechanical engineering, reverse engineering techniques, design, reverse engineering, development result.

Введение

«Реверс-инжиниринг», как понятие в области разработки встречается, начиная с 20 века. Направление деятельности реверс-инжиниринга особенно актуально в современном машиностроении из-за частого отсутствия сопроводительной технической документации на изделие, в связи с чем возникает необходимость в её создании на основе имеющегося оборудования. Данное направление открывает простор при конструировании ввиду неполного копирования исходной изделия, а его доработка и оптимизация под имеющийся вид производства, экономическую доступность и конструкторскую составляющую.

В настоящее время практически невозможно встретить конструкторскую или технологическую документацию на изделия, в которых имеются чертежи основных узлов и деталей. Напротив, на сегодняшний день изделия сопровождают руководства по эксплуатации, на которых применяются изометрические проекции, взрыв-схемы, общие планы, а также графические изображения устройства различного исполнения. Уменьшение необходимости разработки чертежей вследствие автоматизации производства приводит к

тенденции развития в машиностроении, так как современные станки и обрабатывающие центры способны работать по объемной модели детали. В свою очередь, отсутствие технической документации на оборудование затрудняет его самостоятельный ремонт или замену расходных деталей на аналогичные в условиях отсутствия оригинальных запасных частей.

Направление реверс-инжиниринга становится наиболее актуальным из-за тенденции развития современного машиностроения, в связи с решением проблемы относительно небольшими трудозатратами при проектировании детали или узла по сравнению с изначально разрабатываемым изделием. Развитие направления («реверс-инжиниринг») оставалось затруднительным из-за отсутствия устройств, позволяющих производить точные измерения в ручном режиме, и отсюда не было актуально.

В настоящее время технологическое оснащение производств позволяет с максимальной точностью воспроизводить оригинальное изделие и такой его параметр как материал в его оригинальном физико-химическом составе и состоянии. Это возможно в случае наличия исходного образца в виде материального объекта и при условии, что разработка и проектирование не происходят по технической и/или конструкторской документации.

Входными данными для разработки являются: объект разработки в материальном виде и/или конструкторская, технологическая документация. К входным данным также может относиться каталог оригинального производителя, эскизы, технические характеристики оригинального изделия.

Результатом разработки является: конструкторская и технологическая документация на изделие или группу изделий, изделие или группа изделий, изготовленная по выходной документации.

Основные методики реверс-инжиниринга

Методика непосредственного воздействия подразумевает наличие материального образца для дальнейшего его осмотра, измерений и опытов. В этом случае искомый объект разработки может быть измерен любыми возможными или имеющимися в наличии способами, например:

- Измерение при помощи ручных измерительных приборов: штанген и микрометрический инструмент, линейки, калибры, а также эталоны шероховатости.

- Измерения при помощи средств автоматизации: координатно-измерительная машина (КИМ), возможно производить при помощи щупа для проведения измерений, а также при использовании оптических средств измерения, данные методы позволяют не только измерять готовую деталь и сопоставлять ее с эталонными характеристиками, а также строить контуры модели в процессе измерения для дальнейшего редактирования и работы с моделью в среде разработки. Построенные модели с использованием координатно-измерительных позволяет воспроизвести измеряемую деталь с высокой точностью измерения, зависящую от точности установки (в среднем 1-5 микрон). Отрицательным фактором при таком методе измерения является необходимость поддерживать температурный диапазон при проведении измерения в пространстве/комнате, в которой располагается координатно-измерительная машина. Необходимо поддержание температуры в заданном промежутке 18-22 градуса Цельсия, при максимальном изменении температуры 1 градус Цельсия за 12 часов. Также необходимо поддерживать влажность воздуха от 40 до 70%. Данные требования к атмосфере необходимы для нивелирования факторов теплового расширения материалов машины, в связи с этим также измерительная плоскость/плита изготавливаются из гранита (естественного или искусственного). Координатно-измерительные машины не подходят для измерения крупногабаритных деталей, ввиду фактора уменьшения жесткости подвижных частей при увеличении рабочей области машины, а, следовательно, уменьшению точности измерений и накоплению накопленной погрешности. При этом, для сохранения точности при увеличении зоны измерения, усложняется как конструкция, так и сложность её производства, что экономически нецелесообразно.

- Ещё одним методом измерения при помощи средств автоматизации, решающим

проблему измерения крупногабаритных изделий, является 3D-сканирование. Данный метод также предполагает наличие материально-осязаемой детали/изделия. В данном методе, применяется сканер излучающий на объект исследования направленные волны, принимая при помощи датчиков его отражение для проведения анализа. Чаще всего в таких сканерах применяются лазерные, светодиодные и реже – рентгеновские лучи. Сканироваться могут как неподготовленные поверхности изделий, так и предварительно подготовленные. К предварительно подготовленным поверхностям относятся участки изделия или всё изделие, с предварительно нанесённой сеткой маркеров, для ориентирования сканера в процессе обработки изделия и переноса его в объёмную модель. Данный метод сканирования позволяет сканировать изделия средних и больших размеров, в условиях не требующих поддержания жестких условий атмосферы. Точность сканеров общего назначения при этом варьируется от 30 до 100 микрометров. Высокоточные сканеры способны выдавать точность от 10 до 30 микрон.

- Профилометр также играет важную роль в процессе обратной разработки деталей. Он используется для измерения шероховатостей поверхностей, которые не в состоянии определить координатно-измерительная машина, тем самым образуя связку, которая может воспроизвести трехмерную модель готового материального изделия за более короткое время по сравнению с методом ручного измерения.

- К обоим способам также относятся физико-химические методы воздействия на образец для определения твердости и свойств материала, из которого он изготовлен.

Методика входных характеристик предполагает отсутствие материального образца изделия, а в качестве входных данных для обратного проектирования служат технические характеристики оригинального изделия, каталоги или открытая техническая информация изготовителя оригинального изделия. В конечном итоге данная методика предполагает более детальную обратную разработку с назначением материала, углубленными прочностными расчетами, а также возможным изменением конструкции в процессе проектирования.

Пример реверс-инжиниринга по второй методике

Изделие – поворотный гидравлический цилиндр (Гидроцилиндр поворотный).

Входные данные – технические характеристики изделия; место установки и условия работы изделия; циклограмма работы изделия; схема сборки стандарта (ANSI, DIN, ISO) с локализованным описанием.

Оригинальный производитель изделия, в данном случае – не известен, исходя из имеющейся документации Европейского производства.

Исходное изделие – поворотный гидроцилиндр.

Результат реверс-инжиниринга. Конструкторская и технологическая документация на изделие; готовое к запуску в производство изделие с сохранением габаритно-присоединительных размеров и технических характеристик оригинального изделия.

Технические характеристики исходного изделия. В качестве технических характеристик выступают указанные в схеме сборки такие данные, как габаритные и присоединительные размеры гидроцилиндра [мм]. Также к входным данным относятся, предоставленные заказчиком данные об изделии: необходимый угол поворота вала гидроцилиндра $\alpha = \pm 100 \pm 2,5$ [град], рабочее давление гидроцилиндра $P_{\text{раб}} = 11$ [МПа], выходящий крутящий момент на выходном конце $M = 20000$ [Н · м], температура эксплуатации на выходном конце гидроцилиндра $t = 400-600$ [Градусов Цельсия]. Чертежи сборки изменены на аналогичные изображения, ввиду запрета публикации исходных чертежей. Внешний вид показанный на рис. 1 и внутреннее исполнение, показанное на рис. 2 аналогичны оригинальному изделию [1].



Рис. 1. Общий вид изделия аналогичного оригинальному гидроцилиндру поворотному

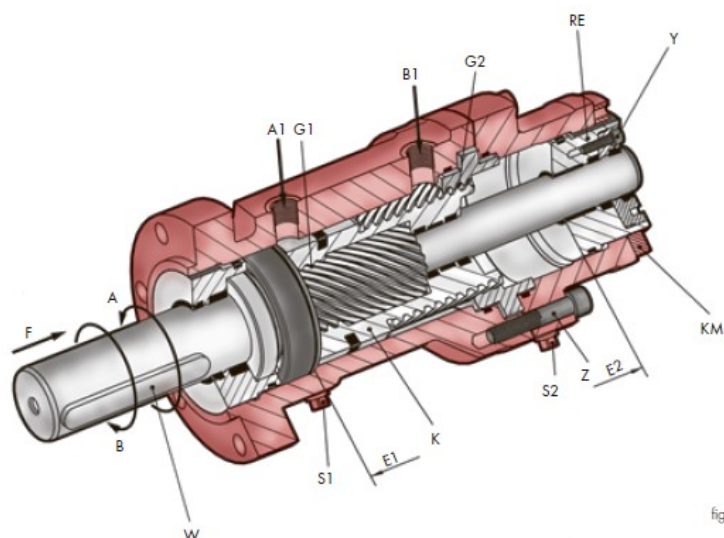


figure-2

Рис. 2. Внутреннее исполнение изделия аналогичного оригинальному гидроцилиндру поворотному

Унификация. Так как необходимо изготовить одно изделие, проведена адаптация под единичный тип производства, в процессе чего принято решение отказаться от изначального принципа поворота изделия, с заменой его на передачу зубчатое колесо-рейка, в угоду удешевления, простоты изготовления и обслуживания. Также данное решение принято в соответствии спецификацией компании по изготовлению проекта, а именно – гидродвигатели с возвратно-поступательным движением рабочего звена т.е. гидравлические цилиндры.

Главным элементом, вызвавшим наибольшие трудности при проектировании, оказалось зубчатое зацепление, а именно подбор модуля и количества зубьев пары вал-шестерня – зубчатая рейка, а также сохранение кинематических, размерных и прочностных характеристик оригинала [2]. При расчете зубчатого зацепления использовалась программа «Компас-3D», в частности библиотека «Валы и механические передачи 2D/3D» [3].

В конечном итоге было рассчитано оптимальное соотношение прочностных и геометрических характеристик элементов зацепления.

После окончания расчетов и проработки компоновки выполнена трехмерная сборка цилиндра в программе «SolidWorks» [4].

Дополнительно к расчёту по методикам библиотеки «Валы и механические передачи 2D/3D» проведён расчёт модели вала-шестерни и зубчатой рейки при помощи встроенных библиотек в программе «Компас-3D», а именно библиотеки для проведения прочностного анализа «APM FEM» [4]. Также проведён дополнительный расчёт программе «SolidWorks», а именно библиотеки для проведения прочностного анализа «SOLIDWORKS Simulation» [5]. При сравнении результатов расчёта прочностных характеристик моделей, разницы в полученных данных не выявлено.

После проектирования моделей и сборки был составлен габаритный чертёж изделия с последующими корректировками от заказчика, согласование, составление чертежей, технологии изготовления и переход в стадию производства [6].

Спроектированная модель изделия представлена на рис. 3.

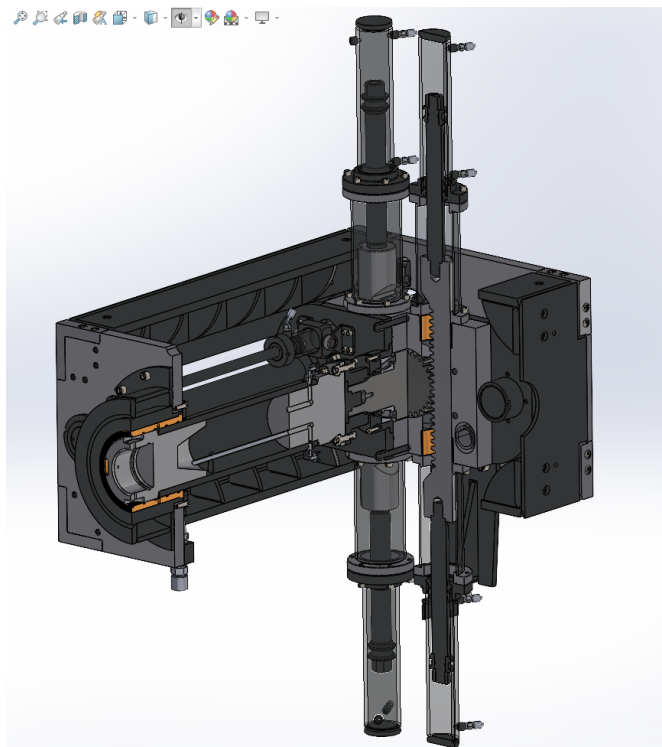


Рис. 3. Вид в сечении спроектированного поворотного гидроцилиндра

Заключение

Таким образом, реверс-инжиниринг по входным данным, в качестве которых были использованы исключительно общедоступные параметры оборудования, возможно. Но данный метод сопряжен с более высокими трудовыми и временными затратами, чем проектирование с наличием материального образца. В данном случае данный метод проектирования более творчески разнообразен для конструктора, особенно в условиях единичного производства.

Спроектированное изделие по силовым характеристикам не уступает исходному образцу. Оптимизация и унификация рассматриваемой конструкции в процессе проектирования позволила снизить затраты на изготовление без ущерба функциональности. Проектирование, разработка и постановка на стадию изготовления поворотного гидроцилиндра была произведена с использованием вычислительных и производственных мощностей компании ООО НПП «Гидрокуб» города Ижевска (Удмуртия).

Список литературы

1. Product overview. — Text : direct // Eckart GmbH : [сайт]. — URL: <https://www.eckart-hydraulics.com/en/products/all-products.html> (дата обращения: 01.02.2025).
2. Марутов, В. А. Гидроцилиндры. Конструкции и расчет / В. А. Марутов, С. А. Павловский. — Москва : Машиностроение, 1966. — 172 с. — Текст : непосредственный.
3. Герасимов, А. А. Самоучитель КАМПАС-3Dv19 / А. А. Герасимов. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2021. — 620 с. — Текст : непосредственный.
4. APM FEM. Система прочностного анализа для КОМПАС-3D : руководство пользователя / Научно-технический центр «Автоматизированное проектирование машин». — Королёв : Автоматизированное проектирование машин, 2020. — 65 с. — Текст : непосредственный.
5. Дубарева, Н. Ю. Самоучитель SolidWorks 2010 / Н. Ю. Дубарева. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. — 416 с. — Текст : непосредственный.
6. Свешников, В. К. Станочные гидроприводы / В. К. Свешников, А. А. Усов. — Издание 2-е. — Москва : Машиностроение, 1988. — 512 с. — Текст : непосредственный.

АЛГОРИТМ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ СБОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ СИСТЕМ

Б. А. Якимович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299015,
Россия, yakimovich52@gmail.com

Аннотация. Рассматривается алгоритм изготовления сложных сопрягаемых детали, основанный на принципах реинжиниринга. Показано, что данный подход позволяет сократить затраты на изготовление сопрягаемых сложных детали в несколько раз по сравнению с известными технологиями.

Ключевые слова: сопрягаемый сложный детали, обратный реинжиниринг, цифровая модель детали, виртуальное производство.

ALGORITHM OF MANUFACTURING TECHNOLOGY OF COMPLEX PREFABRICATED PRODUCTS USING DIGITAL MEASURING AND PROCESSING SYSTEMS

B.A. Yakimovich

¹FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299015, Russia, yakimovich52@gmail.com

Abstract. The algorithm of manufacturing of complex mating parts based on the principles of reengineering is considered. It is shown that this approach allows reducing the cost of manufacturing of mating complex parts several times in comparison with known technologies.

Keywords: mating complex part, reverse reengineering, digital part model, virtual manufacturing.

Введение

Современное машиностроительное производство находится в стадиях фундаментального переосмысления и радикального перепроектирования конструкторских, технологических этапов, с целью достижения коренных улучшений наиболее важных показателей его деятельности-стоимость, качеству и производительность [1].

В настоящей работе показана эффективность использования измерительных цифровых технологий реверс-инжиниринга для изготовления и сборки сложных сопрягаемых деталей машиностроительных изделий.

Цель исследования - анализ современных методов реверс-инжиниринга с учётом непрерывного развития цифровых технологий проектирования, изготовления и сборки машиностроительных изделий. Создание эффективного алгоритма технологии изготовления и сборки сложных сопрягаемых деталей.

Данный подход применим и в том случае, когда в изделия могут быть и более двух сопрягаемых деталей. При реализации разработанного алгоритма актуальной является задача определения первой и последующих сопрягаемых деталей. Критерием здесь безусловно являются затраты на их изготовление. Чем выше трудоёмкость изготовления деталей и стоимость норма/часа работы оборудования, тем рациональнее вероятность выбора в качестве первой сопрягаемой детали, имевшей наибольшие затраты.

1. Из современного уровня техники известны различные способы сборки деталей. Применительно к массовому и серийному производству широкое распространение получил способ сборки с обеспечением полной взаимозаменяемости [2]. При применении указанного способа качественное соединение образуют любые сопрягаемые детали, входящие в сборочную единицу. Способ может быть осуществлен, если допуск замыкающего звена рассчитывают по предельным значениям допуска на размеры составляющих звеньев [3]. Однако этот способ экономически невыгоден для многозвенных размерных цепей, так как приводит к необходимости назначения весьма жестких допусков на размеры составляющих

звеньев. Наиболее близкими по технической сущности к предлагаемому техническому решению и обеспечивающими качественное сопряжение деталей являются различные способы притирки деталей, при этом сборка производится на основе способа неполной взаимозаменяемости, при котором допуски на размеры деталей, составляющие размерную цепь, преднамеренно расширяют [4].

Недостатки указанных способов в полной мере проявляются в ситуациях, когда необходимо обеспечить требуемое качество сопряжения одновременно по нескольким поверхностям. К таким относятся, в частности, сопряжения со сложным многоступенчатым контуром с функционально взаимосвязанными поверхностями. В результате, притирка одной пары поверхностей по требуемому показателю точности сопряжения влечет изменение (снижение) показателей точности для других пар поверхностей этого же сопряжения. Одновременно с этим существенно возрастает и трудоемкость контрольных операций.

Предлагаемый алгоритм осуществляется следующим образом (рис.1):



Рис. 1. Блок-схема алгоритма основных вычислительных процедур предлагаемого способа изготовления сборного изделия

Реализацию алгоритма рассмотрим на примере сборки двух деталей, входящие в сборочную единицу (рис. 2, рис. 3).

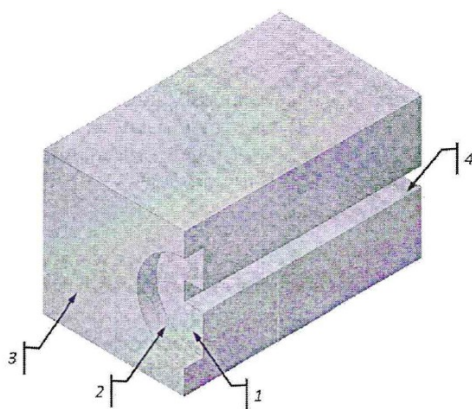


Рис. 2. Первая деталь

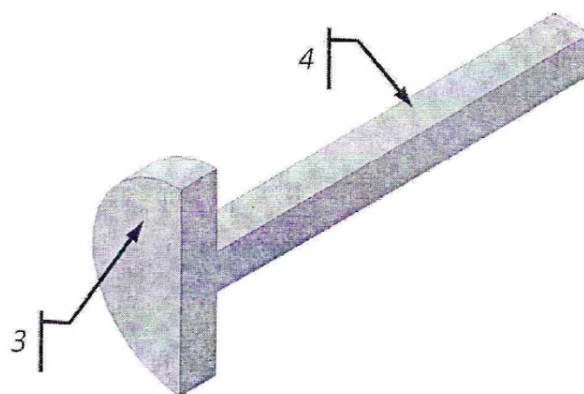


Рис. 3. Вторая деталь

При этом к последней предъявлены следующие технические требования: обеспечить плавность и точность взаимного перемещения деталей по пазу с обеспечением зазора на сторону 4 не более 0,05 мм, плотности прилегания второй детали к поверхности 1 не менее 75%, зазор в сопряжении 2 не должен превышать 0,15 мм, а перепад плоскостей 3 не более 0,05 мм. Традиционная технология при изготовлении указанных деталей предполагает применение операции пригонки, необходимость которой обусловлена, в частности, невысокой жесткостью деталей и возникновением деформаций после термической обработки.

Для проверки реального взаимного расположения деталей и характера сопряжения было произведено измерение сопрягаемых поверхностей в изделиях, изготовленных по традиционной технологии и признанных годными. По результатам измерения было выполнено построение поля зазоров в сопряжении. Анализ поля зазоров показал, что реальные зазоры превышают допустимую величину в 1,2... 1,8 раз.

Традиционный технологический процесс механической обработки детали 2 обеспечивает выполнение следующих требований: наименьшая шероховатость $Ra=6.3$ мкм, допуск перпендикулярности 0,05 мм, плоскостность 0,2 мм, симметричность 0,025 мм, допуск по контуру 0,2 мм. Технологический процесс в этом случае включает следующие этапы (рис. 4): изготовление детали 1 с суммарной трудоемкостью операций механической обработки 5 часов (D_1); контроль детали 1 трудоемкостью 0,2 часа (KD_1); изготовление детали 2 с суммарной трудоемкостью операций механической обработки 1,2 часа (D_2); контроль детали 2 трудоемкостью 0,1 часа (KD_2); выполнение операции слесарной пригонки детали 2 трудоемкостью 0,5 часа (CD_2).

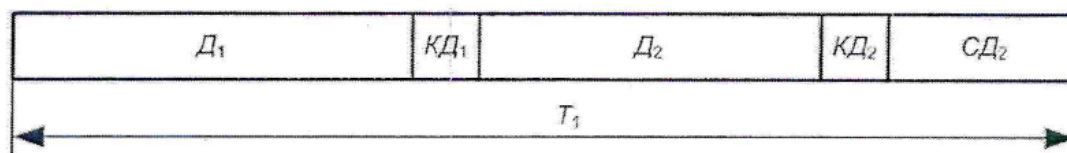


Рис. 4. Структурная схема традиционного технологического процесса изготовления деталей

Технологический процесс по предлагаемому алгоритму [5] позволяет значительно снизить объем пригоночных работ, заменить двадцать семь технологических операций, требуемых для изготовления второй детали, на одну контрольно-измерительную операцию, при выполнении которой осуществляется контроль элементов сопряжения детали 1 и создается компьютерная модель детали 2 с учетом проведенных измерений, и четыре операции механической обработки на станке с числовым программным управлением. Технологический процесс по предлагаемому способу включает следующие этапы (рис. 5): изготовление детали 1 с суммарной трудоемкостью операций механической обработки 5

часов (Д1); контрольно- измерительная операция (КЭС1), включающая контроль элементов сопряжения детали 1 и создание компьютерной модели детали 2, трудоемкостью 0,05 часа; изготовление детали 2 на станке с числовым программным управлением с суммарной трудоемкостью технологических операций 0,6 часа (Д2); контроль детали 2 трудоемкостью 0,1 часа (КД2); выполнение операции слесарной пригонки детали 2 трудоемкостью 0,1 часа (СД2). В результате, применение технологического процесса изготовления деталей 1 и 2 по предложенному способу позволяет снизить трудоемкость изготовления детали 2 более чем на 56% (т.е. $T_2=0,5T_1$), что снижает ее себестоимость на 30%.

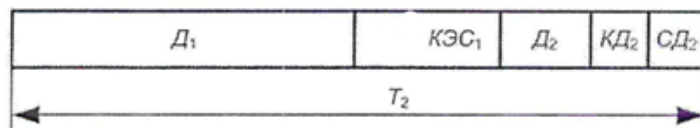


Рис. 5. Структурная схема технологического процесса изготовления деталей по предлагаемому алгоритму

Предварительные экономические расчеты показывают, что в случае, если программа выпуска рассмотренного выше изделия составит 63300 шт. в год, снижение трудоемкости от внедрения технологического процесса по предложенному алгоритму превысит 60 тысяч часов. При этом расчет не учитывает эффект от снижения трудоемкости детали 1 вследствие предъявления менее жестких требований к точности ее размеров.

Заключение

В целом, положительный технический результат от применения, описанного выше алгоритма состоит в повышении точности сопряжения деталей при изготовлении сборного изделия, значительном расширении разнообразия операций механической обработки, которые можно использовать для обработки первой из сопрягаемых поверхностей при одновременно значительном снижении их трудоемкости.

Список литературы

1. Ойхман, Е. Г. Реинжиниринг бизнеса: реинжиниринг организаций и информационные технологии / Е. Г. Ойхман, Э. В. Попов. — Москва : Финансы и статистика, 1997. — 332, [1] с. — ISBN 5-279-01791-4.
2. Суслов, А. Г. Технология машиностроения : учебник / А. Г. Суслов. — Москва : КноРус, 2020. — 336 с. — ISBN 978-5-406-07252-3.
3. А.с. 846235 СССР, МПК В24В 15/08. Способ взаимной притирки сопряжений : опубл. 25.07.1981 / Ю. П. Холмогорцев, А. П. Крамаренко. — Бюл. №26. — 2 с.
4. А. с. 701768 СССР, МПК В24В 1/00, В 24 В 15/08. Способ обеспечения взаимозаменяемости при притирке сопрягаемых деталей : опубл. 07.12.1979 / Б. В. Бирин, М. И. Перец, С. Солью. Розенберг. — Бюл. №45. — 4 с.
5. Патент № 2554243 С1 Российская Федерация, МПК В23Р 11/00. Способ изготовления сборного изделия, состоящего из двух сопрягаемых деталей : № 2013159122/02 : заявл. 30.12.2013 : опубл. 27.06.2015 / Б. А. Якимович, Ю. В. Пузанов, В. В. Тарасов, А. Г. Бажин.

Секция 2

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 678

ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОМ РАСПЫЛЕНИИ

А.Т. Габдрахманов¹, Л.Н. Шафигуллин¹, А.Т. Галиакбаров¹

¹ФГАОУ ВО «Набережночелнинский институт (филиал) Казанского Федерального Университета», г. Набережные Челны, 423800, Россия, veyron000@mail.ru

***Аннотация.** В работе приведены исследования порошков, полученных плазменным распылением, из сварочной проволоки ER316LSiS, KX28M6, AG ER NiCrMo-3 диаметром 0,8-1 мм. Исследованы размер порошков, их форма, химический состав, микроструктура и микротвердость.*

***Ключевые слова:** плазменное распыление, аддитивные технологии, металлические порошки.*

RESEARCH AND APPLICATION OF METAL POWDERS OBTAINED BY PLASMA ARC SPUTTERING

A.T. Gabdrakhmanov¹, L.N. Shafigullin¹, A.T. Galiakbarov¹,

¹FSAEI HE "Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University",
Naberezhnye Chelny, 423800, Russia, misharin_82@mail.com

***Abstract.** The paper presents studies of plasma-sprayed powders from welding wire ER316LSiS, KH28M6, AG ER NiCrMo-3 with a diameter of 0.8 mm. The size of the powders, their shape, chemical composition, microstructure, and microhardness are investigated.*

***Keywords:** plasma spraying, additive technologies, metal powders.*

Введение

Аддитивные технологии продолжают оставаться актуальными и быстро развивающимися, предлагая значительные преимущества для различных отраслей промышленности [1]. Аддитивные технологии позволяют создавать сложные формы и структуры с минимальными ограничениями по дизайну. Это особенно важно для разработки новых продуктов и прототипирования. Возможность быстрого перенастройки производства без необходимости замены дорогостоящих инструментов или штампов [2].

Традиционное производство часто неэффективно при выпуске небольших партий продукции из-за высоких начальных затрат на подготовку оборудования. Аддитивные технологии устраняют эту проблему, так как они требуют минимальных настроек и позволяют печатать изделия поштучно.

В условиях глобальной логистики и цепочек поставок аддитивные технологии могут помочь снизить зависимость от зарубежных поставщиков. Компании могут производить необходимые детали непосредственно на месте, что уменьшает риски задержек и увеличивает скорость реакции на изменения спроса.

Несмотря на явные преимущества, аддитивные технологии сталкиваются с рядом вызовов, одной из которых являются качество и доступность металопорошковых материалов. В работе приводятся результаты исследований металлических порошков полученных плазменным распылением.

1. Плазменное распыление

Получение металлического порошка методом плазменного распыления — это технологический процесс, который позволяет производить мелкодисперсные порошки с высокой чистотой и контролируемыми свойствами. Этот метод широко используется в

различных отраслях, включая аэрокосмическую промышленность, медицину, электронику и аддитивные технологии. Рассмотрим данный способ более подробно.

Основные этапы процесса:

1. Подготовка сырья:

- Исходный материал (металл или сплав) подается в виде проволоки, прутка или гранул.

- Материал должен быть чистым и соответствовать требуемым характеристикам.

2. Генерация плазмы:

- В плазмотроне создается высокотемпературная плазма (температура может достигать 10 000–20 000 К).

- Плазма формируется путем ионизации газа (аргон, азот) под действием электрической дуги.

3. Распыление материала:

- Исходный материал подается в плазменную струю, где он мгновенно плавится.

- Расплавленный металл разбивается на мелкие капли под действием высокоскоростного потока плазмы.

4. Формирование порошка:

- Капли металла охлаждаются и затвердевают в потоке инертного газа или в вакууме, образуя мелкодисперсный порошок.

- Размер частиц порошка зависит от параметров процесса (скорости подачи материала, температуры плазмы, расхода газа и т.д.).

5. Сбор и классификация порошка:

- Полученный порошок собирается в специальных емкостях.

- Для получения порошка с заданным размером частиц проводится классификация (например, с использованием сит или воздушных сепараторов).

Преимущества плазменного распыления:

- Высокая чистота порошка благодаря использованию инертной среды.

- Возможность получения порошков из тугоплавких металлов (например, вольфрам, молибден, титан).

- Контролируемый размер частиц и форма порошка.

- Возможность работы с широким спектром материалов, включая сплавы и композиты.

Недостатки:

- Ограниченная производительность по сравнению с другими методами (например, газовым или водным распылением).

Параметры, влияющие на качество порошка:

- Температура плазмы.

- Скорость подачи исходного материала.

- Расход и состав плазмообразующего газа.

- Давление в рабочей камере.

- Способ охлаждения частиц.

2. Металлические порошки, полученные плазменным распылением

Для проведения металлографических исследований образцов порошков на разработанной установке были изготовлены порошки из различных металлов:

1. Порошок из проволоки KX28M6 1 мм (усл. №1), рабочий газ аргон $p=6$ атм, газ в камере аргон, $I=120A$, $U=110B$, $v=20m/min$;

2. Порошок из проволоки AG ER NiCrMo-3 0.8 мм (усл. №2), рабочий газ аргон $p=6$ атм, газ в камере аргон, $I=120A$, $U=110B$, $v=20m/min$;

3. Порошок из проволоки ER 316LSi 0.8 мм (усл. №3), рабочий газ аргон $p=6$ атм, газ в камере аргон, $I=120A$, $U=110B$, $v=20m/min$;

Внешний вид порошков представлены на рис. 1.



а) б) в)
Рис. 1. Образцы порошков, а) образец 1; б) образец 2; в) образец 3

3. Испытания изготовленных образцов металлических порошков

Исследование порошков проводилось на сканирующем электронном микроскопе «VEGA 3 LMH» производства компании TESCAN, Чехия, при помощи системы рентгеновского энергодисперсионного микроанализа AZtecEnergy Advanced с безазотным детектором X-max 20 Standart, производства компании Oxford Instruments.

Исследование порошков с усл. № 1 – 3 проводилось с поверхности и в сечении частиц.

При электронно-микроскопическом исследовании порошков выявлено:

- частицы порошка преимущественно сферической формы;

- размеры частиц порошков составляют:

- 1) порошок с усл. № 1 – ~ от 21 до 38 мкм;

- 2) порошок с усл. № 2 – ~ от 22 до 43 мкм;

- 3) порошок с усл. № 7 – ~ от 22 до 68 мкм;

- поверхность частиц различной фактуры.

Внешний вид и размеры частиц порошков с усл. № 1 - 3 представлены на рис. 2 – 4.

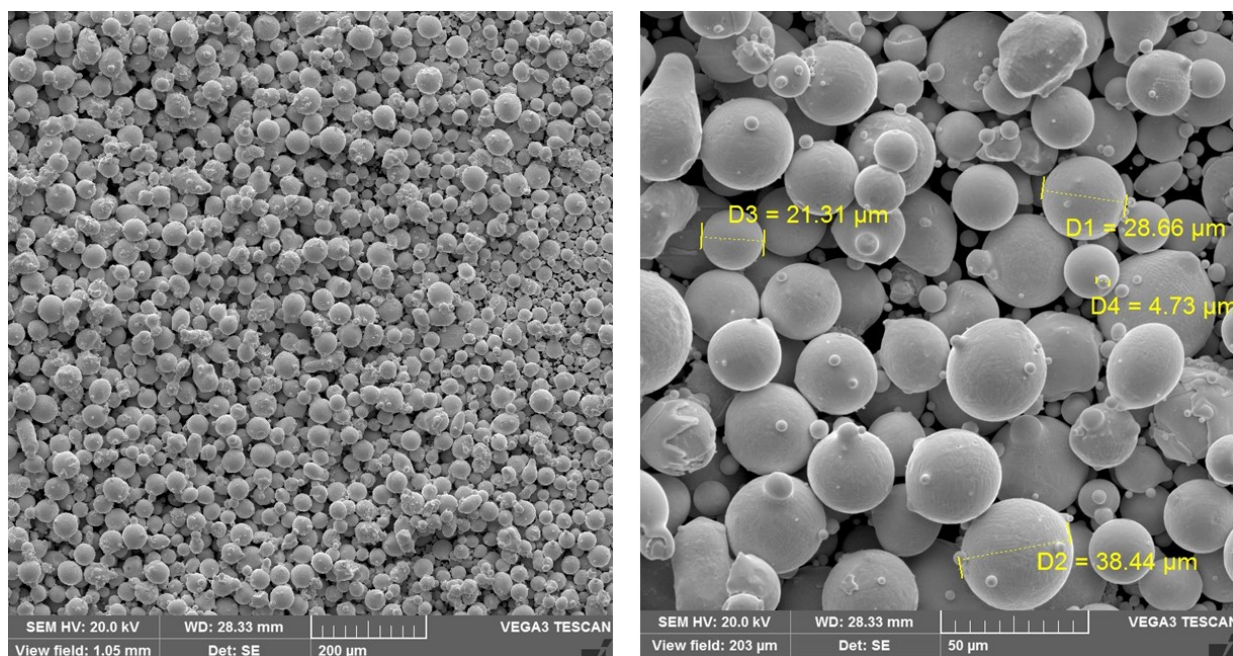


Рис. 2. Внешний вид порошка с усл. № 1

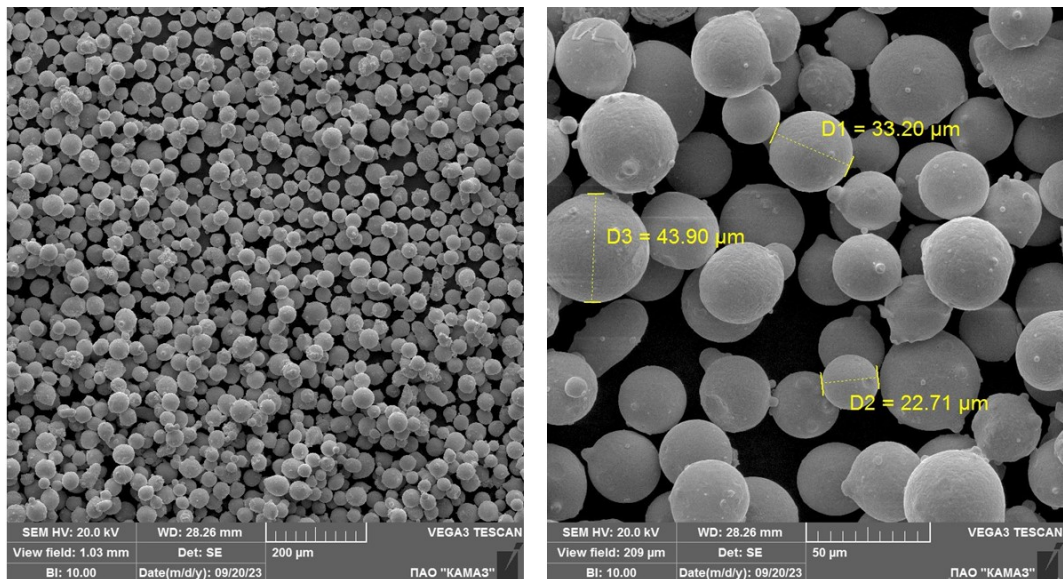


Рис. 3. Внешний вид порошка с усл. № 2

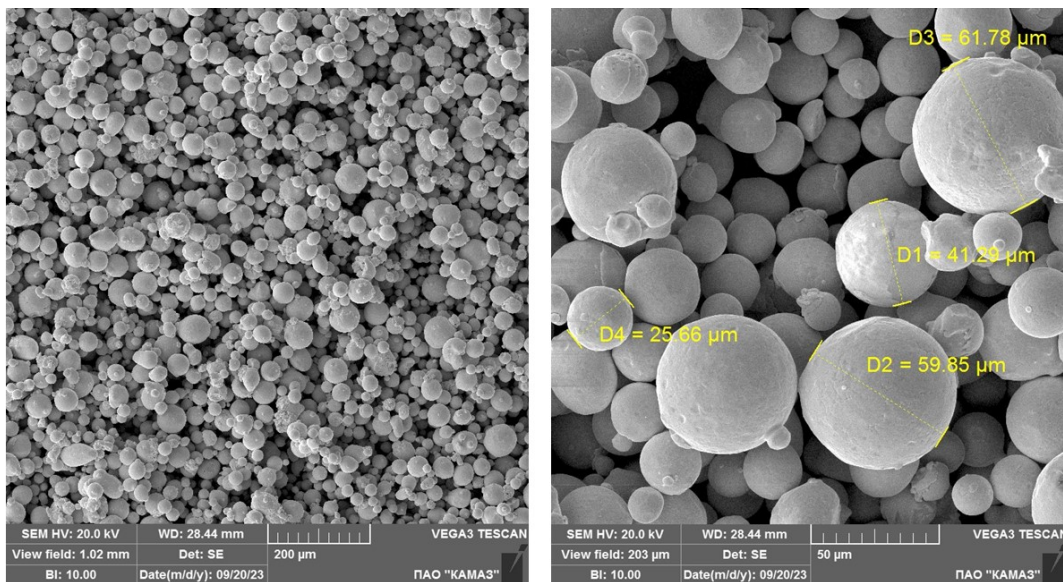


Рис. 4. Внешний вид порошка с усл. № 3

Исследование микроструктуры порошков с усл. № 1 - 3 проводилось в сечении частиц. Микроструктура частиц порошков с усл. № 1 – 3 представлена на рис. 5 – 7.

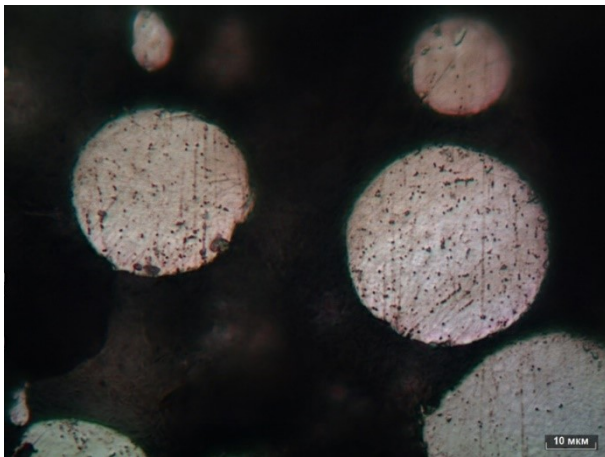


Рис. 5. Микроструктура частиц порошка с усл. № 1, x 1000 (шлиф травлен)

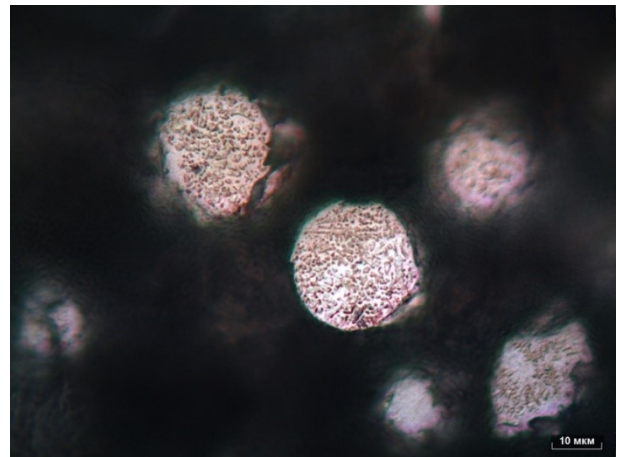


Рис. 6. Микроструктура частиц порошка с усл. № 2, x 1000 (шлиф травлен)

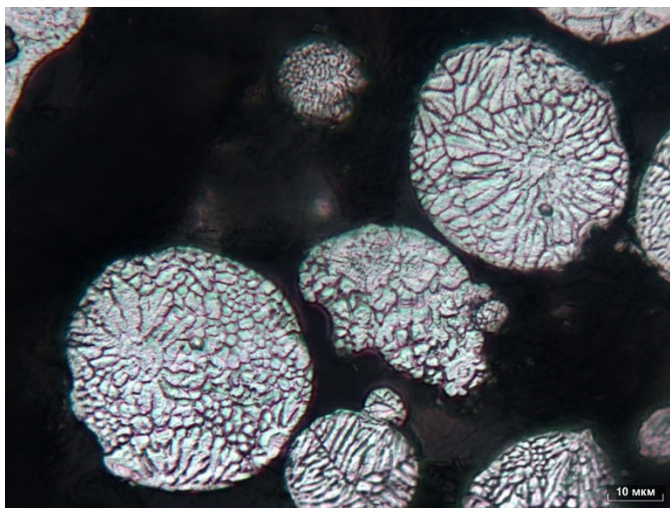


Рис. 7. Микроструктура частиц порошка с усл. № 3, х 1000 (шлиф травлен)

Заключение

Метод плазменного распыления является одним из наиболее эффективных для получения высококачественных металлических порошков с уникальными свойствами, что делает его востребованным в высокотехнологичных отраслях, в том числе в аддитивных технологиях.

Благодарность

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан (соглашение № 06/2024-ПД от 16.12.2024 г.).

Список литературы

1. Максимов, Н. М. Стратегия развития аддитивных технологий / Н. М. Максимов // Аддитивные технологии. – 2021. – № 4. – С. 10.
2. Сацкая, З. М. О развитии аддитивных технологий в России / З. М. Сацкая // Аддитивные технологии. – 2021. – № 3. – С. 16–20.

УДК 54-116

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДВУХКОМПОНЕНТНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ «METAL BINDER JETTING» ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

П. А. Киселев¹, Т.Ю. Поздеева², С. А. Оглезнева³, М. Н. Каченюк⁴

¹ООО «КЕРАМЕТ ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ-НАСОСНОЕ ПРОИЗВОДСТВО»,
ул. Восточный обход, 80, г. Пермь, 614053, Россия, pavelkiselev@yandex.ru

²ООО «КЕРАМЕТ ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ-НАСОСНОЕ ПРОИЗВОДСТВО»,
ул. Восточный обход, 80, г. Пермь, 614053, Россия, pozdeevakeramet@yandex.ru

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский пр-т, 29, г. Пермь, 614990, Россия, ogleznevasa@pstu.ru

⁴Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский пр-т, 29, г. Пермь, 614990, Россия, maxxkach@yandex.ru

Аннотация. Проведено исследование химического состава связующего для MBJ-технологии и анализ литературных данных по проблеме состава полимерных струйных связующих. Важную роль играют характеристики металлического порошка, характер его взаимодействия со связующим не только на поверхности, но и способность связующего быстро проникать в глубину слоя, совместимость связующего с требованиями для распыляющих головок струйного принтера, способность к быстрой полимеризации при температуре 120-160 °С, достаточная прочность «зеленых деталей» в ходе технологического процесса, способность к деструкции полимерной композиции при спекании, а также ряд других факторов.

Ключевые слова: двухкомпонентное жидкое связующее, струйная 3d – печать, metal binder jetting, металлический порошок, зеленая деталь, ядерно-магнитный резонанс (ЯМР), инфракрасная спектроскопия, хроматомасс-спектрометрия, термическое отверждение.

STUDY OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF A TWO-COMPONENT BINDER FOR 3D PRINTING TECHNOLOGY "METAL BINDER JETTING" BY PHYSICOCHEMICAL METHODS

P. A. Kiselev¹, T.Yu. Pozdeeva², S. A. Oglezneva², M. N. Kachenyuk³

¹LLC "KPM-NP", st. Eastern Bypass, 80, Perm, 614053, Russia, pavelkiselev@yandex.ru

²LLC "KPM-NP", st. Vostochny Bypass, 80, Perm, 614053, Russia,
pozdeevakeramet@yandex.ru

³Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Ave., 29, Perm, 614990,
Russia, ogleznevasa@pstu.ru

⁴Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Prospekt, 29, Perm, 614990,
Russia, maxxkach@yandex.ru

Abstract. The chemical composition of the binder for MBJ technology was studied and literature data on the composition of polymer inkjet binders were analyzed. An important role is played by the characteristics of the metal powder, the nature of its interaction with the binder not only on the surface, but also the ability of the binder to quickly penetrate into the depth of the layer, the compatibility of the binder with the requirements for the spray heads of the inkjet printer, the ability to quickly polymerize at a temperature of 120-160 °C, sufficient strength of "green parts" during the technological process, the ability to destroy the polymer composition during sintering, as well as a number of other factors.

Keywords: two-component liquid binder, inkjet 3D printing, metal binder jetting, metal powder, green part, nuclear magnetic resonance, infrared spectroscopy, chromatograph mass spectrometry, thermal curing.

Введение

Струйное нанесение связующего (Metal Binder Jetting) является универсальной технологией 3D-печати, которая открывает возможности для современного производства изделий из порошкообразных материалов и отличается высокими скоростями нанесения связующего, масштабируемостью и геометрической гибкостью.

В процессе печати распределительное устройство формирует тонкий слой порошка, затем с помощью связующего, наносимого из массива сопел, происходит склеивание порошка в соответствии с профилем слоя. Жидкое связующее подвергается дополнительному кратковременному отверждению. Далее распределительное устройство формирует следующий слой порошка, таким образом происходит построение всего изделия (рис. 1).

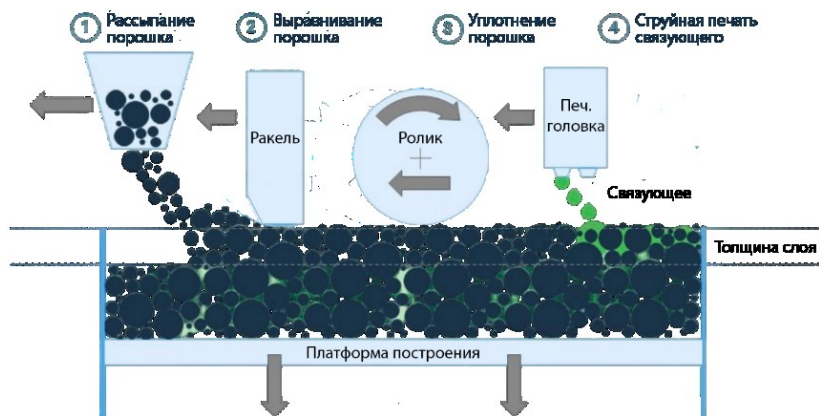


Рис. 1. Схема нанесения порошка и связующего в технологии metal binder jetting

Промышленное применение технологии сдерживается недостаточным пониманием физико-химических принципов выбора связующих в зависимости от объекта применения, поскольку связующее является определяющим фактором для первоначального формирования заготовки, технологичности процесса и конечных характеристик напечатанных деталей в процессе производства. Разработка связующих сложна и предъявляет множество требований, таких как необходимость обеспечения определенных реологических свойств связующего, его стабильности и эффективного взаимодействия с порошковой системой. Кроме того, в процессе важно контролировать прочностные характеристики «зеленых деталей», остаточный углерод, поскольку он влияет на химический состав, геометрию и физико-механические характеристики конечной детали. Несмотря на фундаментальную важность связующего для успешного осуществления технологического процесса, разработке связующих пока не уделяется должного внимания, и выбор связующего в основном осуществляется методом проб и ошибок. Именно поэтому на рынке сегодня практически нет коммерческих связующих композиций для струйно-аддитивной 3D-технологии.

В научной литературе вопросы разработки подходящих комбинаций систем порошок-связующее, а также детали процесса печати и последующей обработки отражены в ряде публикаций. Среди существующих в настоящее время различных методов связывания порошковых материалов использование органических жидких полимерных связующих является одним из наиболее универсальных методов, позволяющим работать с любым порошковым материалом и обладающим способностью к термической деструкции, оставляя при этом мало остатков в конечном продукте. Возможные органические связующие включают, например, бутиральные смолы, поливинилы, поли-силоксаны, полиакриловые кислоты и другие полимерные вещества [1,2].

Большой интерес представляет струйно-аддитивное производство изделий из нержавеющей стали с использованием технологии MBJ, поскольку позволяет изготавливать сложные детали для различных применений, в том числе в биомедицинских и энергетических секторах промышленности, с меньшими затратами и более короткими сроками выполнения работ. Струйная обработка связующим является единственным процессом аддитивного 3D-производства с металлическим порошковым слоем, который не основан на плавлении, поэтому изготовленные детали не имеют остаточных напряжений в отличие от процессов аддитивного производства, использующих лазерные технологии.

Требуется выбор полимерной композиции для струйного нанесения с учетом конкретной печатной системы. Именно поэтому на рынке практически нет коммерческих универсальных связующих для MBJ – технологии, подходящих для всех металлических порошков. В нескольких работах упоминается использование связующего BA 005, фирмы ExOne, USA, которое рекламируется как стандартное связующее для 3D-печати на металлических порошках. Состав различных связующих для 3д-печати является коммерческой тайной, поэтому определение химического состава струйного связующего для производства изделий из нержавеющей стали является актуальной задачей.

Цель исследования – определение химического состава струйного связующего для производства изделий из нержавеющей стали технологией «Metal binder jetting» в условиях массового производства и замене дорогостоящего импортного аналога на отечественный.

Краткий литературный анализ

По результатам литературного анализа установлено, что компоненты связующего содержат полимеры с различными функциональными группами, способные нековалентно связываться между собой, отверждаться и удерживать порошок. Среди перечисленных полимерных композиций указаны, водные дисперсии стирол-акрилатных сополимеров, полимеры акрилатного ряда с различными функциональными группами [3].

В статье [4] описан синтез акриловых сополимеров при соотношении акриловой кислоты и акрилового эфира 1:7 или 1:8 для получения богатой кислотой смолы, получение водных коллоидных растворов полимеров и получение прозрачного покрытия с использованием меламина-формальдегидной смолы в качестве сшивающего агента при термическом отверждении.

Пленкообразующие материалы на основе аминосмол и факторы, влияющие на их свойства, описаны в пособиях [5-6].

Наиболее близкими, для исследованного в работе двухкомпонентного связующего, являются низкомолекулярные смолы, этерифицированные метанолом. Они, как правило, являются водоразбавляемыми, их поставляют в состоянии от жидкого до воскоподобного. Для их отверждения необходима или высокая температура (180-200 °С) или кислотные катализаторы, в качестве которых чаще используют сульфоновую кислоту.

Вторым пленкообразующим компонентом водорастворимых материалов на основе аминосмол могут быть гидроксилсодержащие алкидные смолы, насыщенные полиэфиры или полиакрилаты, которые наряду с ОН-группами содержат карбоксильные группы. После нейтрализации аминами они становятся водорастворимыми или по крайней мере образуют коллоидные растворы. Предпочтительны относительно низкомолекулярные типы смол, которые даже в состоянии коллоидного раствора хорошо совмещаются с меламиноформальдегидными смолами. Это предопределяет возможность их эффективного взаимодействия при пленкообразовании.

Для нейтрализации карбоксильных групп в водорастворимых пленкообразователях рекомендуется прежде всего N,N-диметилэтаноламин и 2-амино-2-метилпропанол. Аминоспирты имеют преимущество перед аминами в том, что они являются не только средствами нейтрализации, но и играют роль сорастворителей. Устанавливаемые значения pH составляют 7,5–8,5. В процессе горячей сушки нейтрализующие агенты испаряются. Температура и время испарения зависят не только от давления паров применяемого амина, но также от его основности и степени ионизации.

В качестве сорастворителей, как правило, используют спирты, простые и сложные эфиры гликолей, а также N-винилпирролидон. В то время как метиловый и этиловый эфиры этиленгликоля, а также их ацетаты из-за высокой токсичности практически не применяются, бутилгликоль является со-растворителем в рецептурах всех водных лакокрасочных материалов горячей сушки. С одной стороны, бутилгликоль стабилизирует коллоидные растворы, с другой – улучшает растекание составов и блеск образующихся покрытий. При отверждении покрытий он способствует пленкообразованию, образуя органический раствор, почти не содержащий воды, что практически исключает появление пузырей от

испаряющейся воды, способствует хорошему растеканию материала и высокому блеску получаемых покрытий.

Результаты исследования

Было проведено исследование двухкомпонентного связующего торговой марки «*AquaFuse™*» (*Kumai*) для струйной 3D печати по металлическому порошку. Согласно инструкции производителя, перед применением компоненты смешиваются в пропорции 1000:31,6. Хранить компоненты рекомендовано при температуре от 1 до 10 °С.

С целью условной идентификации компоненты были промаркированы как А и В компоненты. А – прозрачная бесцветная жидкость, пенящаяся при встряхивании с рН 8,52 (измерено потенциометрически).

Компонент В – прозрачный очень густой и липкий гель.

Исследование компонента А

Для образца записали спектры ЯМР ¹H и ¹³C, в протонном спектре которого наблюдался интенсивный сигнал воды, а также ряд сигналов меньшей интенсивности. Часть сигналов в спектрах была уширена, что дает основание предположить их принадлежность полимерному соединению.

Далее образец был высушен в тонком слое на воздухе до постоянного веса. «Сухой» остаток № 1 – густая липкая бесцветная масса, составляющая 17.8% от навески образца. Для него записали спектры ЯМР и сравнили их со спектрами образца как такового. Поиск по SpecFinder Index коллекции Садтлера позволил идентифицировать летучую компоненту как метиловый эфир пропиленгликоля формулы I.

Дальнейшее изучение спектров ЯМР остатка позволило идентифицировать другие компоненты смеси – пропиленгликоль (II), N, N-диметилэтаноламин (III), бутиловый эфир диэтиленгликоля (IV).

Для сухого остатка № 1 записали ИК-спектр. Анализ спектра имел интенсивные полосы поглощения при 1729 см⁻¹ (эфир карбоновой кислоты), 1573 см⁻¹ (соли карбоновой кислоты), полосы 701 и 761 см⁻¹ (стирольный фрагмент полимера).

Для отделения полимерной компоненты навеску образца закислили добавлением 2н раствора HCl при перемешивании. Полимер выделяется в виде пластичной массы, которую отделили и высушили на воздухе (остаток № 2).

Кислый водный раствор проэкстрагировали хлороформом, объединенные хлороформные экстракты испарили (остаток № 3), кислый водный раствор испарили досуха (остаток № 4).

Для остатка 3 записали спектры ЯМР ¹H и ¹³C, которые показали наличие бутилового эфира диэтиленгликоля и метилового эфира пропиленгликоля. Остаток 3 проанализировали методом хроматомасс-спектрометрии (ХМС) на газовом хроматографе “HP” 6890 с масс-селективным детектором “HP” 5972. Идентификацию соединений проводили сравнением времен удерживания ряда заведомых образцов и сопоставлением полных экспериментальных масс-спектров с масс-спектрами из базы данных NIST 02 MS (175000 соединений), находящейся в составе системы обработки данных Agilent G1701AA Chemstation. Была идентифицирована смесь бутиловых эфиров этиленгликоля и диэтиленгликоля. Кроме бутиловых эфиров моно- и диэтиленгликолей в смеси идентифицирован 2,2'-азобис(2-метилпропионитрил) (AIBN, формула V).

Для остатка 4 записали спектры ЯМР ¹H и ¹³C. Анализ спектров показал, что основными компонентами остатка № 4 являются гидрохлорид диметилэтанолamina и пропиленгликоль. Остаток 4 обработали эфирным раствором диазометана и остаток проанализировали методом ХМС. Идентифицированы N, N-диметилэтаноламин и пропиленгликоль, в незначительных количествах - дипропиленгликоль и 4,4-метил оксазолидин.

Исследование компонента В

Для образца записали ИК-спектр в пленке. Анализ спектров показал наличие полимеров этерифицированной меламина-формальдегидной смолы.

Для раствора образца в дейтериевой воде записали спектры ЯМР ^1H и ^{13}C . В протонном спектре наблюдаются сигналы метокси-групп (CH_3O) и метиленовых групп, связанных с кислородом.

В углеродном спектре наблюдаются сигналы метанола, метокси-групп ($\text{O}-\text{CH}_2-\text{OCH}_3$) - $\text{O}-\text{NH}-\text{CH}_2-\text{OH}$ групп, метиленовых групп между вторичным азотом и кислородом, $\text{HO}-\text{CH}_2-\text{OH}$ группы, а также интенсивный сигнал при 165.8 м.д. углерода $-\text{C}=\text{N}-$ меламинаминового кольца.

Образец выдержали в тонком слое до постоянного веса и для остатка (~87% от навески образца) записали ЯМР спектры, которые полностью идентичны спектрам образца как такового. Следовательно, потеря веса (~13%) обусловлена потерей воды.

Для остатка после высушивания выполнили элементный анализ. Найдено, в %: С 40.10, Н 7.71, N 28.11, О (по разности) 24.08.

Навеску образца растворили в воде и проэкстрагировали хлороформом. Растворитель испарили, в остатке – липкая масса, ~70% от навески образца. Протонные спектры остатков после испарения хлороформа и воды полностью идентичны спектрам исходного образца и высушенного остатка.

Заключение

В результате проведенного исследования двухкомпонентного связующего для струйной 3D печати по металлическому порошку было установлено, что компонент А представляет собой водный раствор стирол-акрилатного сополимера и смеси диметилэтанолamina, бутиловых эфиров моно- и диэтиленгликоля, метилового эфира пропиленгликоля и пропиленгликоля.

Стирол-акрилатный полимер представляет собой сополимер стирола, акриловой кислоты и ее бутилового (в основном) и метилового эфиров.

В незначительных количествах был обнаружен инициатор полимеризации AIBN - 2,2'-азобис(2-метилпропионитрил) и 4,4-диметил оксазолидин.

Компонент В представляет собой меламина-формальдегидную смолу, частично этерифицированную метанолом с содержанием воды в смоле ~13%.

Для создания аналога китайского связующего, исходя из результатов настоящего исследования, необходимы стирол-акриловая водная дисперсия, содержащая растворители, со-растворители, коалесценты, инициатор и другие добавки, а также водная дисперсия меламинаформальдегидной смолы, этерифицированная метанолом, используемая в качестве сшивателя.

Список литературы

1. A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP) / Utela B., Storti D., Anderson R., Ganter M. // Journal of Manufacturing Processes. — 2008. — 10(2). — P. 96–104.
2. Ziaee, M. Binder Jetting: A Review of Process, Materials, and Methods / M. Ziaee, N. B Crane // Additive Manufacturing. — 2019. — V. 28. — P. 781–80.
3. Патент US 20120152459. BASF SE (Rheinland-Pfalz). Styrene-Acrylic-Based Binders and Methods of Preparing and Using Same : Patent Grant number: 9309351 : Publication Date: Jun 21, 2012. / Kostas S. Avramidis (Charlotte, NC).
4. Mistry, J. K. Synthesis and Application of Acrylic Colloidal Unimolecular Polymers as a Melamine Thermoset System / Mistry J. K., A. M. Natsu, Van De Mark M. R. // Applied Polymer Science. — 2014. — V. 131. — Iss. 20.
5. Прокопчук, Н. Р. Химическая модификация пленкообразующих веществ : уч. пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности "Химическая технология органических веществ, материалов и изделий" / Н. Р. Прокопчук, Э. Т. Крутько, А. И. Глоба. — Минск : БГТУ, 2012. — 380 с.
6. Шутова, А. Л. Основы рецептуростроения лакокрасочных материалов : учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-48 01 02 «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий» специализации 1-48 01 02 03 «Технология лакокрасочных материалов» / А. Л. Шутова, Е. Н. Сабадаха. — Минск : БГТУ, 2017. — 126 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В РЕМОНТЕ АВТОМОБИЛЕЙ

Д.С. Кричевец¹

¹Севастопольский колледж информационных технологий и промышленности,
г. Севастополь, 299001, Россия, krichevets.den@mail.ru

Аннотация. Применение методов быстрого прототипирования в процессе ремонта автомобилей открывает новые горизонты для повышения эффективности и качества обслуживания. Использование 3D-печати и других технологий позволяет не только быстро производить запасные части, но и индивидуализировать подход к ремонту, что особенно важно для современных потребителей, стремящихся к оперативному решению проблем. Выбор правильного материала и разработка точных цифровых моделей обеспечивают возможность создания деталей, соответствующих оригинальным спецификациям, и способствуют повышению надежности восстановленных узлов. Быстрое прототипирование сокращает время ожидания запчастей, минимизируя простой автомобилей и удовлетворяя потребности клиентов. Таким образом, интеграция RP в автомобильный сервис становится неотъемлемой частью стратегии современных мастерских, позволяя им оставаться конкурентоспособными. В будущем можно ожидать дальнейшего развития технологий, что приведет к еще большему упрощению процессов ремонта и обслуживания автомобилей, делая их более доступными и эффективными для широкой аудитории.

Ключевые слова: Быстрое прототипирование, ремонт автомобилей, аддитивное производство, 3D-печать, изготовление запасных частей, индивидуализация ремонтных работ, 3D-принтер, Fused Deposition Modeling, 3D-сканер.

APPLICATION OF RAPID PROTOTYPING METHODS IN CAR REPAIR

D.S. Krichevets¹

¹The Sevastopol College of Information Technology and Industry,
Sevastopol, 299001, Russia, krichevets.den@mail.ru

Annotation. The use of rapid prototyping techniques in the car repair process opens up new horizons for improving efficiency and quality of service. The use of 3D printing and other technologies allows not only to quickly produce spare parts, but also to customize the repair approach, which is especially important for modern consumers seeking prompt solutions to problems. Choosing the right material and developing accurate digital models make it possible to create parts that meet the original specifications and enhance the reliability of refurbished components. Rapid prototyping reduces the waiting time for spare parts, minimizing vehicle downtime and meeting customer needs. Thus, the integration of RP into automotive service becomes an integral part of the strategy of modern workshops, allowing them to remain competitive. In the future, we can expect further technology development, which will lead to an even greater simplification of car repair and maintenance processes, making them more accessible and efficient to a wide audience.

Keywords: Rapid Prototyping, Car repair, Additive manufacturing, 3D printing, spare parts manufacturing, customization of repair work, 3D Printer, Fused Deposition Modeling, 3D Scanner.

Введение. Современная автомобильная индустрия стремительно развивается благодаря внедрению передовых технологий, таких как быстрое прототипирование (RP). Этот метод позволяет значительно сократить время между идеей и её воплощением, что особенно важно в условиях высокой конкуренции и необходимости постоянного совершенствования продукции [1 - 3]. В данной статье мы рассмотрим, каким образом RP может быть применено в процессе ремонта автомобилей.

Цель исследования – является изучение возможностей применения методов быстрого прототипирования в процессе ремонта автомобилей. Исследование направлено на выявление преимуществ использования этих технологий для ускорения диагностики повреждений, изготовления запасных частей, модификации существующих деталей и индивидуализации ремонтных работ.

Изложение основного материала. Быстрое прототипирование – это набор методов и технологий, которые позволяют создавать физические модели или детали на основе

цифровой информации за короткий промежуток времени. Эти технологии включают аддитивное производство (например, 3D-печать), субтрактивное производство (например, фрезерование) и другие современные методы обработки материалов [4 - 6].

Основные преимущества использования RP:

- Снижение затрат на разработку;
- Ускорение процесса проектирования и тестирования;
- Возможность создания сложных геометрических форм;
- Быстрое внесение изменений в дизайн.

Рассмотрим применение RP в ремонте автомобилей, а точнее изготовление запасных частей. Часто возникает ситуация, когда оригинальные запчасти недоступны или их доставка занимает слишком много времени. В этом случае RP может стать решением проблемы. Современные 3D-принтеры способны воспроизводить сложные формы и структуры, что делает возможным создание точных копий оригинальных запчастей прямо в мастерской.

Пример из реальной практики. На автомобиле Nissan Primera вышла из строя пластмассовая каретка стеклоподъемника. Определим основные причины выхода из строя:

1. Износ материала: Пластмассовые детали со временем подвергаются износу под воздействием механических нагрузок, трения и температурных колебаний. Каретка постоянно перемещается вдоль направляющих, что приводит к постепенному истиранию пластика.

2. Воздействие внешних факторов: Воздействие влаги, грязи и пыли может способствовать ускорению износа пластиковых элементов. Вода, попадая внутрь механизма, вызывает коррозию металлических частей, что негативно сказывается на состоянии пластиковой каретки.

3. Недостаток смазки: Недостаточное количество смазки или её отсутствие может увеличить трение между деталями, что ускоряет износ каретки. Смазка помогает уменьшить нагрузку на пластиковые элементы и продлить срок их службы.

4. Перегрузка механизма: Чрезмерные нагрузки на механизм стеклоподъемника, например, при попытке поднять сильно обледенелое стекло или при резком закрытии окна, могут привести к повреждению каретки.

5. Производство и качество материалов: Иногда причиной поломки может быть низкое качество самого пластика, использованного при производстве каретки. Недостаточно прочные материалы быстрее выходят из строя даже при нормальных условиях эксплуатации.

6. Неисправность других компонентов: Поломка каретки может быть вызвана неисправностью других компонентов стеклоподъемника, таких как моторчик, редуктор или тросовый привод. Например, если ремень привода начинает проскальзывать, это увеличивает нагрузку на каретку.

После всестороннего осмотра каретки и анализа литературных источников [7, 8] было принято решение распечатать новую каретку на 3D принтере.

Для того чтобы напечатать каретку стеклодержателя методом FDM (Fused Deposition Modeling), имея только сломанную деталь, потребуется пройти через несколько этапов подготовки и производства. Вот основные шаги:

1. Создание эскиза детали

Детали сложной формы и конфигурации можно отсканировать 3D-сканером [9, 10], но у нас деталь достаточно простой формы, поэтому вручную с помощью штангенциркуля измеряем размеры деталей и создаем эскиз для последующего моделирования в Компас 3D (рис. 1).

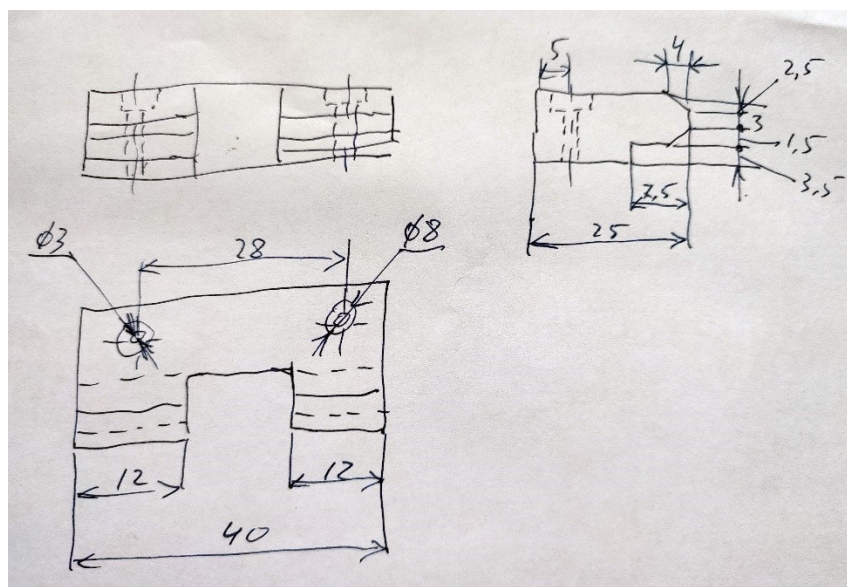


Рис. 1. Эскиз детали «Каретка стеклоподъёмника»

2. Создание цифровой модели

Для создания цифровой модели будем использовать Компас 3D. Компас 3D является одним из самых популярных программных продуктов для трехмерного моделирования и проектирования в России. Его выбор обоснован рядом преимуществ, которые делают его идеальным инструментом для создания цифровых моделей [11 - 13]:

1. Русскоязычный интерфейс и документация.
2. Широкий функционал для машиностроения.
3. Поддержка стандартов ЕСКД.
4. Возможность реверс-инжиниринга.

При проектировании важно учесть все особенности геометрии, включая отверстия, пазы и другие конструктивные элементы.

Последовательность построения будет следующая:

1. Создаем новый документ – Деталь.
 2. На виде «Слева» строим эскиз с соблюдением размеров (рис. 2).
 3. Используя операцию «Элемент выдавливания» выдавливаем деталь симметрично, толщиной 40 мм.
 4. На виде «Сверху» строим эскиз и прорезаем паз.
 5. На виде сверху, используя операцию «Точка на поверхности» позиционируем точки для будущих отверстий.
 6. Используя операцию «Отверстие простое» строим два отверстия под крепеж.
- 3D модель каретки стеклоподъёмника представлена на рис. 3.

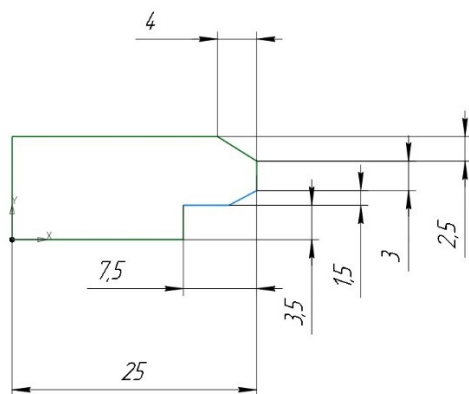


Рис. 2. Эскиз детали
«Каретка стеклоподъёмника»

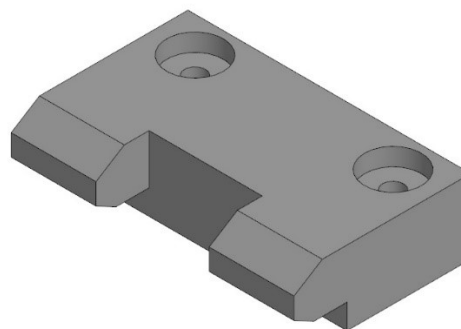


Рис. 3. 3D модель детали
«Каретка стеклоподъёмника»

3. Подготовка к печати

Первым делом необходимо выбрать материал для печати. Для каретки стеклодержателя обычно используют прочные пластики, такие как PLA, ABS или PETG [14 - 19].

Таблица 1 - Сравнение основных характеристик PLA, ABS и PETG

Характеристика	PLA	ABS	PETG
Прочность	Средняя	Высокая	Высокая
Жесткость	Высокая	Средняя	Средняя
Гибкость	Низкая	Средняя	Высокая
Температурная стойкость	Низкая (до 60°C)	Средняя (до 100°C)	Высокая (до 80°C)
Химическая стойкость	Низкая	Высокая	Высокая
Водостойкость	Низкая	Средняя	Высокая
Простота печати	Очень высокая	Средняя	Высокая
Усадка при печати	Низкая	Высокая	Низкая
Стоимость	Ниже средней	Выше средней	Средней стоимости

PLA – это материал с высокой жесткостью и простотой печати, но он не обладает хорошей термостойкостью и химической стойкостью. Подходит для простых деталей, которые не будут подвергаться высоким температурам или химическим воздействиям.

ABS – более прочный и гибкий пластик по сравнению с PLA, имеет среднюю температуру эксплуатации до 100°C и хорошую химическую стойкость. Однако у него есть проблемы с усадкой при печати, что может усложнить процесс изготовления крупных деталей.

PETG – сочетает в себе прочность, гибкость и высокую температурную стойкость (до 80°C). Он также устойчив к воде и многим химическим веществам. Этот материал считается универсальным выбором благодаря своим характеристикам и легкости печати.

Так как деталь, которая будет работать в условиях высоких температур (летом машина нагревается) и требует прочности, то лучше всего использовать PETG. Это наиболее универсальный вариант среди перечисленных пластиков.

4. Настройка печати.

При настройке параметров печати для PETG на FDM принтере рекомендуется учитывать следующие аспекты:

Основные параметры слайсера PrusaSlicer 2.7.0.

Температура экструдера:

Для большинства PETG филаментов оптимальная температура составляет от 230°C до 250°C. Начните с температуры около 240°C, а затем корректируйте её в зависимости от качества отпечатков.

Температура стола:

Обычно требуется нагревательный стол для улучшения адгезии первого слоя. Оптимальная температура находится в диапазоне от 70°C до 90°C. Начать можно с 80°C.

Скорость печати:

PETG склонен к деформации при слишком быстром охлаждении, поэтому скорость печати должна быть умеренной. Рекомендуемая начальная скорость — 40–50 мм/сек.

Ретракция:

Из-за низкой текучести PETG важно правильно настроить ретракцию. Начальные значения могут составлять:

Длина ретракции: 0,5–1,5 мм

Скорость ретракции: 20–30 мм/сек

Обдув:

Поскольку PETG менее подвержен деформации, чем ABS, обдув можно оставить на минимальном уровне или вовсе отключить его для первых слоев. При необходимости можно добавить слабый обдув после того, как первые слои застынут.

Слоевая высота:

Рекомендуется начинать с высоты слоя 0,2–0,3 мм для достижения хорошего баланса между качеством поверхности и скоростью печати.

Заполнение (инфилл):

Плотность заполнения поставим 100%.

Подача материала (Flow Rate):

Значение подачи материала должно быть установлено на 100%.

Первичный слой:

Чтобы обеспечить хорошую адгезию, увеличьте высоту первичного слоя до 120–150% от обычной высоты слоя.

Коэффициент охлаждения:

PETG чувствителен к быстрому охлаждению, поэтому рекомендуется установить низкий коэффициент охлаждения или даже полностью отключить активное охлаждение для первых нескольких слоев.

Требования к соплу и режимам

Материал сопла:

Стандартное стальное сопло.

Диаметр сопла: — 0,4 мм.

5. Процесс печати

Перед печатью желательно использовать специальный спрей/клей для лучшей адгезии первого слоя. По окончании печати желательно дождаться остывания детали для аккуратного снятия её с платформы.

6. Постобработка

Так как деталь будет располагаться внутри двери автомобиля и к ней не предъявляются особые требования по дополнительной обработке, то шлифовку, полировку и покраску производить не будем. Единственное, что необходимо - так это проверьте деталь на соответствие размерам.

Распечатанная деталь представлена на рис. 4.

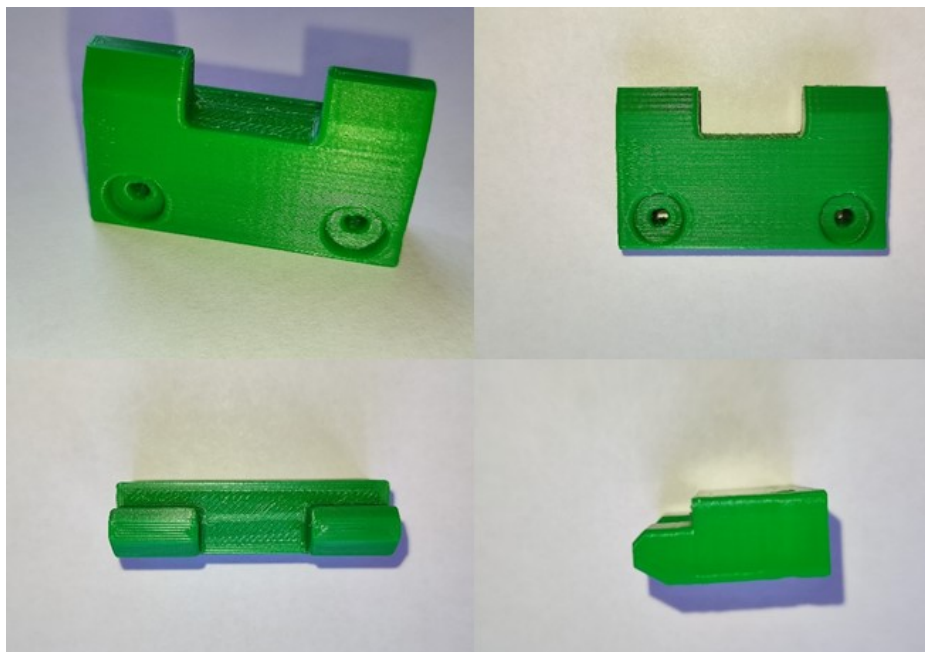


Рис. 4. Детали «Каретка стеклоподъёмника», распечатанная FDM способом

Заключение

1. Внедрение методов быстрого прототипирования в автомобильную индустрию, особенно в процесс ремонта, открывает новые горизонты для повышения качества и скорости обслуживания. Использование технологий, таких как 3D-печать, позволяет не

только оперативно воспроизводить недоступные детали, но и адаптировать их под специфические требования клиента, что значительно улучшает опыт эксплуатации автомобиля.

2. Приведенный пример с кареткой стеклоподъемника иллюстрирует, как современные подходы могут решить проблемные ситуации, возникающие при ремонте. Ускорение процесса диагностики и изготовления запасных частей не только экономит время, но и снижает затраты, что важно для автовладельцев и сервисных центров.

3. В условиях быстро меняющегося рынка автомобильной индустрии, применение методов RP становится стратегическим преимуществом, способствующим инновациям и удовлетворению потребностей клиентов в более качественном и эффективном ремонте.

Список литературы.

1. Тараховский, А. Ю. Реверс-инжиниринг коленчатого вала компрессора / А. Ю. Тараховский, И. А. Смирнов. — DOI 10.26160/2658-3305-2023-18-91-97. — Текст : непосредственный // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2023. — № 18. — С. 91-97.
2. Бокатов, А. П. Анализ области применения 3D-сканирования и 3D-печати для изготовления пластиковых деталей автомобиля / А. П. Бокатов, Р. А. Шубин, К. А. Киселев. — Текст : непосредственный // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных, Севастополь, 15–18 апреля 2024 года. — Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2024. — С. 140-144.
3. Анализ перспективы применения 3D-печати при ремонте автомобильного транспорта / Д. М. Ласточкин, А. А. Медяков, Д. В. Костромин [и др.]. — DOI 10.25686/2542-114X.2023.1.51. — Текст : непосредственный // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия : Материалы. Конструкции. Технологии. — 2023. — № 1. — С. 51-65.
4. Нахратова, Г. В. Использование технологии быстрого прототипирования на этапе проектирования автомобильных компонентов / Г. В. Нахратова, А. А. Махалин. — Текст : непосредственный // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства : труды IV международной научно-технической конференции (Резниковские чтения), Тольятти, 27–29 мая 2015 года / редакционная коллегия: А.В. Гордеев, В.И. Малышев, Л.А. Резников, А.С. Селиванов. — Тольятти : Тольяттинский государственный университет, 2015. — Том 1. — С. 357-361.
5. Пышкин, А. А. Аддитивные технологии в современном мире / А. А. Пышкин, Е. Г. Ковтун, А. Ю. Тараховский. — Текст : непосредственный // Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования : сборник статей всероссийской научно-практической конференции, Севастополь, 13–15 мая 2024 года. — Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2024. — С. 83-85.
6. Tarakhovskiy, A. Mechanical Device for Sealing Ring Mounting into Internal Groove and its Opening Technical and Economic Justification / A. Tarakhovskiy, B. Bukach, D. Tabakaev. — DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.658. — Текст : непосредственный // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, Saint-Petersburg, 16–19 мая 2017 года. — Saint-Petersburg, 2017. — P. 1438-1442.
7. Кирсанов, И. Ремонт кареток / Иван Кирсанов. — Текст : электронный // DRIVE2.RU : [сайт]. — URL: <https://www.drive2.ru/l/641811051607773105>. — Дата публикации: 14.03.2023.
8. Марценюк, П. Л. 3D-печать детали стеклоподъемника автомобиля / Марценюк Петр Леонидович. — Текст : электронный // 3Dpulse.ru : [сайт]. — URL: <https://www.3dpulse.ru/authors/martsenyuk-petr-leonidovich/3d-pechat-detali-steklopodyomnika-avtomobilya/>. — Дата публикации: 07.09.2018.
9. Тараховский, А. Ю. Трёхмерное моделирование объекта на основе данных лазерного 3D сканирования / А. Ю. Тараховский. — DOI 10.26160/2309-8864-2023-14-16-19. — Текст : непосредственный // Автоматизированное проектирование в машиностроении. — 2023. — № 14. — С. 16-19.
10. Кондратьева, В. А. Применение метода лазерного сканирования в имитационном моделировании 3D-объектов / В. А. Кондратьева. — Текст : непосредственный // Электронные системы и технологии : материалы 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 17–21 апреля 2023 года. — Минск : БГУИР, 2023. — С. 1049-1052.
11. Тараховский, А. Ю. Современные подходы к инженерно-графической подготовке в образовании / А. Ю. Тараховский, Ю. О. Стреляная. — DOI 10.26160/2541-8637-2024-14-46-50. — Текст : непосредственный // Мехатроника, автоматика и робототехника. — 2024. — № 14. — С. 46-50.
12. Рудева, В. А. Использование графического редактора «Компас 3D» в обучении компьютерной инженерной графике / В. А. Рудева, А. С. Бессонова. — Текст : непосредственный // Академическая публицистика. — 2024. — № 3-1. — С. 283-288.
13. Графические дисциплины в системе дистанционного обучения Moodle / О. В. Мухина, А. Ю. Тараховский, Ю. О. Стреляная, С. Е. Сазонов. — Текст : непосредственный // Современное педагогическое образование. — 2022. — № 2. — С. 75-79.

14. Тараховский, А. Ю. Аддитивные технологии для стандового моделизма / А. Ю. Тараховский, А. А. Иваник. — DOI 10.26160/2541-8637-2024-14-42-45. — Текст : непосредственный // Мехатроника, автоматика и робототехника. — 2024. — № 14. — С. 42-45.

15. Долголенко, И. С. Исследование вязкоупругих свойств деталей, изготовленных с использованием методов 3D-печати с различными способами упрочнения структуры / И. С. Долголенко, И. С. Нефелов, А. Ю. Коноплин. — DOI 10.31044/1684-2561-2024-0-1-16-19. — Текст : непосредственный // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2024. — № 1. — С. 16-19.

16. Изготовление изделий в условиях аддитивного производства по технологии FDM : учебно-методическое пособие / Е. В. Преображенская, А. А. Лим, И. В. Кудрявцев, Т. Н. Боровик. — Москва : РТУ МИРЭА, 2024. — 61 с. — ISBN 978-5-7339-2112-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/405176> (дата обращения: 10.01.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

17. Абрамцов, А. А. Зависимость точности размеров изделий FDM 3D печати от габаритов глубины и длины / А. А. Абрамцов. — Текст : непосредственный // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д. И. Менделеева, посвящённой 15-летию Института промышленных технологий и инжиниринга : сборник статей конференции, Тюмень, 16–18 ноября 2023 года. — Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2024. — В 3 т. — С. 66-69.

18. Сиразетдинова, Э. И. Влияние температуры сопла FDM-принтера на физико-механическую характеристику печатного изделия / Э. И. Сиразетдинова, М. А. Петрова, Д. В. Носкова. — Текст : непосредственный // Научная деятельность в условиях цифровизации: теоретический и практический аспекты : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Волгоград, 27 января 2024 года. — Стерлитамак : Агентство международных исследований, 2024. — С. 144-147.

19. Горбунов, А. М. Адгезия при печати на 3D принтерах / А. М. Горбунов, А. С. Губенко. — Текст : непосредственный // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д.И. Менделеева, посвящённой 15-летию Института промышленных технологий и инжиниринга : сборник статей конференции, Тюмень, 16–18 ноября 2023 года. — Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2024. — В 3 т. — С. 82-84.

УДК 620.172

МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FFF-ПЕЧАТИ

Р.Д. Шпенглер¹, Е.А. Маринин¹, Е.С. Широкова¹

²ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, 610000, Россия, marinin@vyatsu.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос прочности изделий, получаемых трехмерной печатью. Предложен аналитический метод определения прочности подобных изделий. Предложенный метод учитывает следующие факторы: материал, настройки печати, геометрия детали, постобработка, условия эксплуатации модели, характеристики принтера. Метод может применяться к различным видам пластика и любым устройствам печати, реализующим технологию FFF.

Ключевые слова: технология FFF-печати, прочность, усилие разрыва, пластик.

THE ESTIMATION METHOD OF STRENGTH CHARACTERISTIC OF PRODUCT USING FFF PRINTING

R.D. Shpengler¹, E.A. Marinin¹, E.S. Shirokova¹,

²Vyatka State University, Kirov, Kirov Region, 610000, Russian Federation, marinin@vyatsu.ru

Abstract. The issue of products durability made by three-dimensional printing is considered in the paper. Also we describe an analytical method of the strength test for such products. The following factors are used in this method: material, printing settings, geometry of the details, post-processing, operating conditions of the model, printer characteristics. The method can be used with various types of plastics and any printing devices that use FFF technology.

Keywords: Fused Filament Fabrication, strength, tearing force, plastic

Введение

С развитием производства все чаще используются аддитивные технологии в частности 3D печать. Ее применяют для достижения разных целей от литья и прототипирования до строительства и стоматологии. Одной из разновидности технологий 3D печати является FFF (Fused Filament Fabrication). Данную технологию применяют для изготовления деталей разной направленности, за счет наличия большого количества материалов для печати. Можно применять для изготовления декоративных элементов, но чаще всего ее применяют для изготовления деталей и прототипов в промышленности. Однако из-за особенности получаемых изделий существует необходимость в оценке прочностных характеристик получаемых деталей, изготовленных данным методом.

Цель исследования – разработка метода оценки прочностных характеристик изделий, получаемых с использованием FFF-печати.

Изложение основного материала. По причине актуальности рассматриваемого вопроса, в настоящее время появляется все больше научных работ, цель которых рассмотреть факторы, влияющие на характеристики напечатанных изделий, в том числе прочностные.

Так в работе [1] в результате полученных данных авторы статьи пришли к выводам, что влияние плотности заполнения на размерную точность невелико, после печати внутренние размеры уменьшаются, а наружные увеличиваются, что стоит учитывать при проектировании изделий, также для получения большей точности необходимо, чтобы высота слоев была кратной высоте изделия, наилучшее качество было получено с 3 внешними стенками.

Авторы исследования [2] по результатам испытания на растяжение пришли к выводу, что количество линий стенки оказывает существенное влияние на прочностные характеристики деталей.

В статье [3] проводилось исследование параметров настроек 3D, таких как air gap, ориентация модели, а также химического состава материала, на прочностные характеристики деталей. Показана связь параметров и прочностных характеристик. Однако рассматривается прочность только ABS-пластика и только со стороны повышенной его пористости.

В связи с этим возникает проблема разработки аналитического метода оценки прочности напечатанных изделий. Метод должен максимально должен учитывать факторы, оказывающие существенное влияние на прочностные характеристики и давать результаты максимально приближенные к реальной прочности изделий.

В рамках анализа литературных источников и проведения первичных экспериментов были получены выводы, что на прочностные характеристики влияют шесть групп характеристик: материал, настройки печати, геометрия детали, постобработка, условия эксплуатации модели, характеристики принтера.

Материал определяет механические свойства получаемой детали. Использование материала с различными добавками может существенно повлиять на итоговые свойства детали, что необходимо учитывать при проектировании.

Большинство настроек печати напрямую влияет на геометрию сечения детали, чем больше площадь сечения, тем больше итоговая прочность. Также настройки печати влияют и на качество получаемой детали.

Собственная геометрия детали влияет на распределение напряжений в детали, и соответственно ребра жесткости отверстия, вырезы и выступы также на влияет на распределение напряжений. Еще крайне важно расположение детали на столе и как будут направлены слои, это влияет на характер деформации.

Во время постобработки (в частности химической) может незначительно измениться геометрия сечения, что скажется на итоговой прочности.

Различные условия эксплуатации, такие как механические нагрузки, температурные воздействия напрямую влияют на механические свойства материала. Влага и химический состав среды часто негативно влияют на прочность и вызывают деградацию материала.

Характеристики принтера влияют на точность и итоговое качество получаемой модели. Точность влияет на качество укладки слоев. Наличие термокамеры и двойного экструдера позволяет существенно расширить номенклатуру используемых материалов.

Существует формула (1), благодаря которой можно рассчитать для максимальное напряжение вызывающего разрыв детали. На ее основании можно связать значения и факторы, которые на нее влияют:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

σ - Максимальное напряжение материала, сюда же можно отнести и обработку, так как она может повлиять на свойства материала.

F - это максимальная сила. К ней можно отнести условия эксплуатации детали, а именно механическое воздействие.

A - площадь сечения. К ней можно отнести большинство факторов: настройки печати, геометрия детали, характеристики принтера, постобработка.

Из всего этого следует, что для готовой детали решающий фактор — это площадь сечения, поскольку параметр максимального напряжения целиком зависит от материала и он является постоянным в случае готовой детали. А максимальная сила является внешним фактором, олицетворяющим механическое воздействие на деталь.

То есть для определения усилия разрыва образца (прочностная характеристика) нужно посчитать площадь сечения вдоль которого осуществлялся разрыв. В общем случае площадь поперечного сечения может быть определена на основании анализа g-кода. На рис. 1 представлен пример поперечного сечения, на примере которого проиллюстрирован предложенный подход.

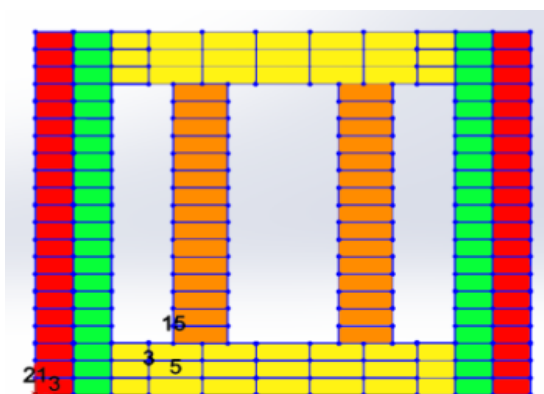


Рис. 1. Внешний вид сечения для определения усилия разрыва

На приведенном рисунке разными цветами отмечены разные типы стенок/заполнения детали: красный цвет - внешняя стенка, зеленый цвет - внутренняя стенка, желтый цвет - линии дна/крышки, оранжевый цвет - заполнение. Часть заполнения шире, из-за того, что линии располагаются под углом 45 градусов (Стандартное значение в слайсере).

Для расчета площади необходимо обозначить следующие параметры: высота слоя ($h_{\text{слоя}}$), диаметр сопла/Ширина линии ($D_{\text{лин}}$), ширина линии заполнения ($D_{\text{зап}}$), ширина линии дна/крышки ($D_{\text{дк}}$), ширина линии дна крышки не под углом ($D_{\text{дкп}}$), количество линий стенки ($Q_{\text{ст}}$), количество линий заполнения ($Q_{\text{зап}}$), количество линий дна/крышки ($Q_{\text{дк}}$), количество линий дна/крышки не под углом ($Q_{\text{дкп}}$), количество слоев ($h_{\text{общ}}$), угол наклона заполнения ($\alpha_{\text{зап}}$), угол наклона линий дна крышки ($\alpha_{\text{дк}}$).

Далее для расчета необходимо определить площадь каждого типа линии:

-Площадь линии стенки:

$$S_{\text{ст}} = h_{\text{слоя}} \cdot D_{\text{лин}}, \quad (2)$$

-Площадь линии заполнения

$$S_{\text{зап}} = h_{\text{слоя}} \cdot \left(\frac{D_{\text{зап}}}{\cos \alpha_{\text{зап}}} \right), \quad (3)$$

-Площадь линии дна/крышки:

$$S_{\text{дк}} = h_{\text{слоя}} \cdot \left(\frac{D_{\text{дк}}}{\cos \alpha_{\text{дк}}} \right), \quad (4)$$

-Площадь линии дна крышки не под углом:

$$S_{\text{дкп}} = h_{\text{слоя}} \cdot D_{\text{дкп}}, \quad (5)$$

Теперь необходимо умножить площади на количество соответствующих линий и результат суммировать.

$$S_{\text{сеч}} = (S_{\text{ст}} \cdot Q_{\text{ст}}) + (S_{\text{зап}} \cdot Q_{\text{зап}}) + (S_{\text{дк}} \cdot Q_{\text{дк}}) + (S_{\text{дкп}} \cdot Q_{\text{дкп}}), \quad (6)$$

На последнем шаге нужно взять значение максимального напряжения, которое выдерживает материал при разрыве и умножить его получившуюся площадь сечения, и это получится значение максимальной силы, которое способна выдержать деталь.

$$F_{\text{max}} = \sigma_{\text{max}} \cdot S_{\text{сеч}}, \quad (7)$$

Итоговое выражение (7) с учетом зависимостей (2) – (6) представляет собой аналитическую модель прочности изделий, полученных технологией печати FFF.

Выводы. В результате проведенной работы была предложена аналитическая модель для определения прочности изделий, полученных методом FFF-печати. Предложенная модель учитывает материал, настройки печати, геометрия детали, постобработка, условия эксплуатации модели, характеристики принтера.

Полученная аналитическая модель будет в рамках последующих экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Савицкий, В. В. Исследование влияния параметров 3D-печати на размерную точность изделий / Савицкий В. В., Голубев А. Н., Быковский Д. И. // Вестник ВГТУ. — 2018. — №2 (35). — С. 52–61. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-parametrov-3d-pechat-na-razmernuyu-tochnost-izdeliy> (дата обращения: 26.01.2025).
2. Балашов, А. В. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью / Балашов А. В., Маркова М. И. // Инженерный вестник Дона : электронный научный журнал. — 2019. — № 1 (52). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-struktury-i-svoystv-izdeliy-poluchennyh-3d-pechatyu> (дата обращения: 31.03.2025).
3. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) / Кондрашов С. В., Пыхтин А. А., Ларионов С. А., Сорокин А. Е. // Труды ВИАМ. — 2019. — №10 (82). — С. 34–49. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-tehnologicheskikh-rezhimov-fdm-pechat-i-sostava-ispolzuemykh-materialov-na-fiziko-mehanicheskie-harakteristiki-fdm-modeley> (дата обращения: 31.03.2025).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

И.Ф. Махмутов¹, А.Р. Галиев², И.Ф. Тимербаев³, Н.Ф. Кашапов⁴, Р.Р. Гиниятуллин⁵

¹ ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, 420111, Россия, mahmutoffir@yandex.ru

² ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет", г. Казань, 420008, Россия, afgalzal@gmail.com

³ ИПИ АН РТ, г. Казань, 420012, Россия, iftimerbaev@gmail.com

⁴ ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, 420111, Россия, kashlenar@mail.ru

⁵ ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, 420111, Россия, true_way@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния параметров 3D-печати на прочностные характеристики образцов из модифицированной PLA+. Авторы рассматривают ключевые факторы, такие как высота образца, количество слоёв, ориентация и время печати. Экспериментальная часть основана на испытаниях методом нагнетания воздушного давления и фиксации краёв гидравлическим прессом. Полученные результаты позволяют выявить зависимости прочности от параметров печати и разработать рекомендации по их оптимизации.

Ключевые слов. 3D-печать, PLA+, прочность материалов, параметры печати, аддитивное производство, испытания на сжатие, механические характеристики, гидравлический пресс.

STRENGTH STUDY OF PARTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING.

I.F. Makhmutov¹, A.R. Galiev², I.F. Timerbaev³, N.F. Kashapov⁴, R.R. Ginyatullin⁵

¹ FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 420111, Kazan, mahmutoffir@yandex.ru

² Kazan (Volga region) Federal University, Kazan University, KFU, 420008, Kazan, afgalzal@gmail.com

³ Institute of Applied Research, Tatarstan Academy of Sciences, 420012, Kazan, iftimerbaev@gmail.com

⁴ FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 420111, Kazan, kashlenar@mail.ru

⁵ FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 420111, Kazan, true_way@mail.ru

Abstract. The paper investigates the effect of 3D printing parameters on the strength characteristics of modified PLA+ samples. The authors consider key factors such as specimen height, number of layers, orientation and printing time. The experimental part is based on tests by air pressure injection and edge fixation with a hydraulic press. The results obtained will allow to identify the dependencies of strength on printing parameters and to develop recommendations for their optimization.

Keywords: 3D printing, PLA+, material strength, printing parameters, additive manufacturing, compression tests, mechanical characteristics, hydraulic press.

Введение

Современные технологии аддитивного производства, такие как 3D-печать, имеют огромное значение для создания сложных и высокоэффективных конструкций, используемых в самых разных отраслях. Одним из наиболее популярных материалов для аддитивного производства является PLA+ — модификация полимолочной кислоты, которая обладает хорошими механическими свойствами и доступна для большинства современных 3D-принтеров. PLA+ — это усовершенствованная версия формулы PLA, в которой используются добавки, улучшающие механические свойства. По сравнению с обычным PLA, пластик PLA+ обладает большей гибкостью при растяжении и хорошей прочностью. За счёт улучшенной вязкости материал имеет хорошую адгезию, что делает готовые изделия более долговечными и менее хрупкими.^[1] Однако, несмотря на широкое распространение этой пластмассы, еще остаются вопросы относительно оптимизации процессов печати для достижения максимальной прочности деталей.

Одним из важных аспектов при 3D-печати является выбор правильных параметров печати для получения оптимальных прочностных характеристик. Исследования, посвященные этому вопросу, часто связаны с различными методами испытаний материалов на сжатие, растяжение и другие виды механических нагрузок. В данном исследовании основное внимание уделяется проверке прочности образцов, напечатанных с использованием PLA+, с помощью метода испытания на сжатие, при котором давление оказывается на нижнюю часть образца, а его края фиксируются.

Цель работы

Целью работы является исследование влияния параметров печати на прочностные характеристики образцов, изготовленных из PLA+, с использованием метода сжатия, при котором давление нагнетается снизу на поверхность образца с помощью воздуха, а края фиксируются гидравлическим прессом. В ходе эксперимента будут проверяться различные параметры, такие как диаметр, высота, количество слоев и время печати, с целью выявления факторов, оказывающих наибольшее влияние на прочность образцов.

Задачи работы

Для достижения поставленной цели в исследовании решаются следующие задачи:

1. Проанализировать влияние диаметра и высоты образца на его прочностные характеристики при испытаниях с применением воздушного давления.
2. Исследовать, как количество слоев в печатных образцах влияет на их прочность.
3. Оценить, как время печати и расход материала связаны с прочностью образцов, а также как эти параметры влияют на прочностные характеристики при нагнетании давления.
4. Осуществить серию испытаний для различных образцов и проанализировать результаты с целью выявления оптимальных параметров печати для достижения максимальной прочности.
5. Построить зависимости прочности от параметров печати и предложить рекомендации по оптимизации технологии печати для улучшения прочностных характеристик.

Теоретическая часть

1. Механика деформируемых тел и прочность материалов

Для оценки прочности материалов, в том числе тех, что получены методом аддитивного производства, важно учитывать физические принципы, лежащие в основе деформации и разрушения тел. Прочность материала определяется его сопротивлением внешним силам до момента разрушения. Механические испытания позволяют оценить, как материал реагирует на различные виды нагрузок, такие как растяжение, сжатие и давление.

В данном случае речь идет о применении давления снизу, что приводит к деформации материала в направлении его высоты. Когда давление на образец превышает его предел прочности, материал разрушается. Особенность метода сжатия с нагнетанием воздуха заключается в том, что давление распределяется по всей нижней части образца, создавая равномерную нагрузку. Края образца, зажимаемые гидравлическим прессом, предотвращают боковое смещение, что помогает сосредоточить нагрузку на самой поверхности образца, а не на его боковых стенках.

2. Влияние параметров печати на механические свойства

Одним из ключевых факторов, влияющих на прочностные характеристики изделий, полученных методом аддитивного производства, является структура слоя. Каждый слой материала в 3D-печати может влиять на характеристики сцепления между слоями, а также на способность материала выдерживать внешние нагрузки. Важнейшими параметрами, влияющими на прочность при печати, являются:

• Ориентация слоев

Направление слоев играет критическую роль в прочности. Если слои укладываются параллельно поверхности, на которой действует давление, прочность может быть ниже, чем в случае, когда слои расположены перпендикулярно направлению нагрузки.

• Количество слоев

Увеличение числа слоев может повысить прочность, так как большее количество материала может лучше распределить нагрузку, однако слишком плотная структура может вызвать другие проблемы, такие как внутренние напряжения или неоднородность материала.

• Высота и диаметр образца

С увеличением высоты или диаметра образца нагрузка на материал становится более равномерной. Однако избыточная высота или диаметр могут привести к тому, что материал будет более склонен к внутренним деформациям.

• Температура и скорость печати

Эти параметры влияют на свойства адгезии между слоями. Высокая температура может привести к лучшему сцеплению, но в то же время увеличить вероятность деформации материала, если печать производится слишком быстро.

• Расход материала

Большее количество материала, как правило, повышает прочность изделия, но также влияет на время печати и расход ресурсов. Увеличение плотности слоев и их толщины может уменьшить вероятность дефектов в процессе печати, но при этом усложнит процесс.

3. Метод испытания на сжатие с использованием воздушного давления

Испытания на сжатие с нагнетанием воздуха на образец используют принцип равномерного распределения давления по всей нижней поверхности объекта. Под действием давления материал деформируется, и в какой-то момент он достигает предела прочности и разрушается. Преимущества такого метода заключаются в равномерности нагрузки и возможности точно контролировать силу воздействия через регулировку давления. Важно, чтобы края образца были зажаты прессом, чтобы избежать боковых деформаций и сосредоточить нагрузку на самой поверхности.

При таких испытаниях важно учитывать несколько факторов:

- На какое давление способен выдержать материал без разрушения.
- Как быстро давление накапливается и как это влияет на структуру материала.
- Как температура материала изменяется под воздействием давления.

4. Моделирование и экспериментальные данные

Основываясь на теоретической части, можно построить модели, которые помогут понять, как различные параметры печати влияют на прочность материала. Экспериментальные данные, полученные при испытаниях с нагнетанием воздуха, позволяют построить зависимости между параметрами печати и предельными значениями прочности, которые можно использовать для оптимизации процесса печати.

Заключение теоретической части

Исследование прочности образцов, полученных методом 3D-печати с использованием PLA+, с помощью гидравлического пресса и воздушного давления позволит получить ценную информацию о том, как различные параметры печати влияют на прочность материала. Эти данные будут полезны для оптимизации параметров печати и разработки рекомендаций по улучшению механических характеристик деталей, изготовленных методом аддитивного производства.

Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 году Академией наук Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Список литературы.

1. PLA vs PLA+: в чём разница? : обзор. — Текст : электронный // Tiger3D : [сайт]. — URL: <https://tiger3d.com/blog/reviews/pla-vs-pla-v-chem-raznitsa/> (дата обращения: 28.01.2025).
2. Балашов, А. В. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью / Балашов А. В., Маркова М. И. — Текст : электронный // Инженерный вестник Дона : электронный научный журнал. — 2019. — № 1 (52). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-struktury-i-svoystv-izdeliy-poluchennyh-3d-pechatyu> (дата обращения: 31.03.2025).
3. Чемодуров А. Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения / А. Н. Чемодуров. — Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2016. — №. 8-2. — С. 210-217.
4. Перспективы применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей и прямоточных воздушно-реактивных двигателей / Л. А. Маггеррамова, Ю. А. Ножницкий, С. А. Волков [и др.]. — Текст: непосредственный // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2019. — Т. 18. — №. 3. — С. 81-98.

УДК 621.9.048

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ (FDM): ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

А.Ю. Тараховский¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299001, Россия, aytarakhovskiy@sevsu.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу влияния коэффициента теплового расширения и механических свойств различных материалов на качество 3D-печати. Рассматриваются такие материалы, как PLA, ABS, PETG, Nylon, TPU, PC, PP, ASA, HIPS и PVA. Исследованы особенности каждого материала, включая склонность к деформациям, усадке, трещинообразованию и расслоению, а также их поведение при различных режимах печати. Особое внимание уделено требованиям к условиям печати и параметрам, таким как скорость печати и толщина слоя. Результаты исследования помогут читателям сделать осознанный выбор материала и настроить параметры печати для достижения оптимального качества конечного продукта.

Ключевые слова: 3D-печать, материалы, коэффициент теплового расширения, усадка, деформации, механические свойства, скорость печати, толщина слоя, трещины, расслоение.

OPTIMIZATION OF THE CHOICE OF MATERIALS FOR 3D PRINTING (FDM): EFFECTS OF THERMAL EXPANSION AND MECHANICAL PROPERTIES

A.Y. Tarakhovsky¹

¹FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299001, Russia, aytarakhovskiy@sevsu.ru

Abstract. The article is devoted to the analysis of the influence of the coefficient of thermal expansion and mechanical properties of various materials on the quality of 3D printing. Materials such as PLA, ABS, PETG, Nylon, TPU, PC, PP, ASA, IPS and PVA are considered. The features of each material are investigated, including the tendency to deformation, shrinkage, cracking and delamination, as well as their behavior under various printing modes. Special attention is paid to the requirements for printing conditions and parameters such as printing speed and layer thickness. The research results will help readers make an informed choice of material and adjust printing settings to achieve optimal quality of the final product.

Keywords: 3D printing, materials, coefficient of thermal expansion, shrinkage, deformation, mechanical properties, printing speed, layer thickness, cracks, delamination.

Введение. При проектировании трёхмерных моделей для аддитивного производства с использованием технологии FDM (Fused Deposition Modeling) необходимо учитывать множество факторов, влияющих на конечный результат. Одним из ключевых аспектов является учёт усадки материала и возможных деформаций модели во время процесса печати.

Цель исследования – заключается в разработке методических рекомендаций по учёту усадок и деформаций при проектировании трёхмерных моделей в системе КОМПАС-3D для последующей печати методом FDM, с целью минимизации дефектов и обеспечения точности геометрических характеристик изделий.

Изложение основного материала.

Технология FDM основана на послойном наплавлении расплавленного термопласта через экструдер. Этот процесс имеет свои особенности, которые могут привести к появлению дефектов, таких как усадка, деформации и трещины. Проектирование моделей в системах автоматизированного проектирования (САПР), например, в КОМПАС-3D, требует тщательного учёта этих особенностей для получения качественного результата.

Основные причины усадочных явлений и деформаций:

- Температурные изменения.
- Механические напряжения.
- Физико-химические свойства материалов.
- Скорость печати и толщина слоя.
- Параметры печати.

Рассмотрим эти причины более подробно.

Для анализа влияния температурных изменений на усадку и деформации при 3D-печати методом FDM (Fused Deposition Modeling) рассмотрим несколько наиболее

популярных термопластов: PLA (полилактид), ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол), PETG (полиэтиленгликольтерефталат), Nylon (нейлон), TPU (термопластичный полиуретан), PC (поликарбонат), PP (полипропилен), ASA (акрилонитрильный стирол-акриловый эфир), HIPS (ударопрочный полистирол) и PVA (поливинилацетат) (табл. 1).

Основные параметры для сравнения:

1. Температура экструзии: Температура, при которой пластик плавится и выдавливается через сопло.
2. Температура платформы: Рекомендуемая температура нагрева стола/площадки для адгезии первого слоя.
3. Коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР): Показатель, характеризующий изменение размеров материала при изменении его температуры.
4. Усадка: Процент уменьшения объема пластика после охлаждения.
5. Деформации: Вероятность возникновения деформаций, таких как коробление, расслоение слоев и т.д.

Таблица 1 - Анализ основных видов пластиков

Пластик	Температура экструзии, (°C)	Температура платформы, (°C)	КЛТР ($\times 10^{-6}/K$)	Усадка (%)	Деформации
PLA	190–220	50–60	70–80	0.15–0.30	Низкая
ABS	210–250	90–110	100–120	0.40–0.75	Высокая
PETG	230–260	65–85	55–70	0.20–0.35	Средняя
Nylon	240–270	70–95	150–200	0.25–0.45	Высокая
TPU	225–245	40–60	180–220	0.05–0.12	Низкая
PC	280–310	105–125	68–72	0.52–0.62	Очень высокая
PP	215–235	100–130	170–200	0.18–0.22	Высокая
ASA	220–250	90–110	66–78	0.38–0.48	Высокая
HIPS	220–240	90–110	58–64	0.42–0.56	Высокая
PVA	185–195	45–60	63–67	0.08–0.14	Низкая

Анализ данных:

PLA - низкий коэффициент теплового расширения, что делает его менее подверженным деформациям при охлаждении. Малая усадка позволяет печатать детали без значительного искажения формы. Подходит для начинающих пользователей благодаря низкой склонности к деформациям.

ABS - высокий коэффициент теплового расширения приводит к значительной усадке при охлаждении. Часто возникают проблемы с короблением краев и отслаиванием от платформы. Требуется использования закрытых камер для поддержания стабильной температуры во время печати.

PETG - средний коэффициент теплового расширения и умеренная усадка делают этот материал хорошим компромиссом между прочностью и устойчивостью к деформациям. Хорошо подходит для печати функциональных деталей благодаря своей прочности и устойчивости к химическим веществам.

Nylon - очень высокий коэффициент теплового расширения может привести к значительным деформациям и усадке. При этом обладает отличной механической прочностью и износостойкостью. Для успешной печати требуется хорошая вентиляция и контроль температуры окружающей среды.

TPU - эластичность этого материала помогает минимизировать деформации даже при значительных изменениях температуры. Отлично подходит для гибких изделий, но требует точной настройки параметров печати.

PC - один из самых высоких коэффициентов теплового расширения среди рассматриваемых материалов. Из-за этого часто возникают серьезные проблемы с

деформациями и короблением. Однако поликарбонат обладает исключительной ударной вязкостью и термостойкостью.

PP - полипропилен имеет высокую склонность к деформациям из-за большого коэффициента теплового расширения. Трудно поддается качественной печати из-за плохой адгезии к платформе.

ASA - обладает свойствами, схожими с ABS, но более устойчив к ультрафиолетовому излучению. Имеет высокий риск деформаций и требует аналогичных условий печати, как и ABS.

HIPS - используется как поддерживающий материал для печати моделей из ABS. Несмотря на относительно высокое значение КЛТР, хорошо справляется с деформацией за счет своих свойств растворимости в лимонене.

PVA - Водорастворимый материал, который используется в качестве поддержки. Благодаря низкому коэффициенту теплового расширения и малой усадке практически не вызывает деформаций.

Механическое напряжение в материале возникает, когда он подвергается внешним силам или внутренним изменениям, которые вызывают смещение атомов или молекул относительно их равновесного положения. В контексте 3D-печати FDM механические напряжения могут возникать по нескольким причинам, включая:

1. Неравномерное охлаждение.
2. Различие в температуре между слоями.
3. Адгезия между слоями.

Рассмотрим влияние этих факторов на различные пластики с учетом их механических характеристик (табл. 2).

Основные параметры для сравнения:

Модуль упругости (E): Мера жесткости материала; чем выше модуль упругости, тем труднее деформировать материал.

Прочность на разрыв ($\sigma_{\min}$): Максимальная нагрузка, которую материал может выдержать перед разрушением.

Относительное удлинение при разрыве ($\varepsilon_{\min}$): Степень растяжения материала перед разрушением.

Твердость по Шору D: Мера твердости материала, определяющая его способность сопротивляться проникновению.

Вероятность возникновения трещин: Оценка вероятности образования трещин вследствие внутренних напряжений.

Склонность к расслоению: Оценка вероятности разделения слоев материала из-за внутренних напряжений.

Таблица 2 - Анализ механических напряжений основных видов пластиков

Пластик	Модуль упругости (ГПа)	Прочность на разрыв (МПа)	Относительное удлинение при разрыве (%)	Твердость по Шору D	Вероятность возникновения трещин	Склонность к расслоению
PLA	3.5	57	3.8	79	Низкая	Низкая
ABS	2.3	46	24	103	Высокая	Высокая
PETG	2.0	33	31	77	Средняя	Средняя
Nylon	1.5	83	300	69	Высокая	Высокая
TPU	0.07	50	500	98	Низкая	Низкая
PC	2.4	59	115	117	Высокая	Высокая
PP	1.1	28	400	76	Высокая	Высокая
ASA	2.1	47	27	102	Высокая	Высокая
HIPS	2.1	37	23	101	Высокая	Высокая
PVA	2.0	44	19	82	Низкая	Низкая

Анализ данных:

PLA - высокая жесткость и низкая прочность на разрыв означают, что PLA будет плохо справляться с большими нагрузками, но вероятность образования трещин и расслоения у него ниже. Подходит для создания прочных структур, где не ожидается значительная механическая нагрузка.

ABS - умеренный модуль упругости и высокая относительная деформация позволяют этому материалу выдерживать значительные нагрузки без разрушения. Однако, высокая вероятность возникновения трещин и расслоения делает его менее подходящим для приложений, требующих стабильности структуры.

PETG - средняя жесткость и высокие показатели относительного удлинения делают PETG отличным выбором для изготовления прочных и долговечных деталей. Средняя вероятность возникновения трещин и расслоения означает, что этот материал хорошо сбалансирован для большинства применений.

Nylon - низкий модуль упругости и очень высокая относительная деформация указывают на то, что нейлон является чрезвычайно эластичным материалом. Несмотря на высокую вероятность возникновения трещин и расслоения, его уникальная эластичность делает его идеальным для некоторых специфических задач.

TPU - чрезвычайно низкий модуль упругости и высочайшая относительная деформация делают TPU одним из самых гибких и эластичных материалов. Низкие риски трещинообразования и расслоения делают его идеальным для производства гибких компонентов.

PC - сочетает в себе умеренную жесткость с высокой относительной деформацией, что делает его прочным и устойчивым к ударам. Высокий риск трещинообразования и расслоения требует тщательного контроля процесса печати.

PP - характеризуется низкой жесткостью и высокой относительной деформацией, что делает его гибким, но склонным к трещинам и расслоению. Требуется особая осторожность при использовании этого материала для ответственных конструкций.

ASA - свойства ASA аналогичны свойствам ABS, но с улучшенной стойкостью к УФ-излучению. Высокая вероятность трещинообразования и расслоения требуют особого внимания при проектировании и печати.

HIPS - имеет свойства, аналогичные ABS, но предназначен для использования в качестве поддерживающего материала. Хотя он склонен к трещинам и расслоению, его применение ограничено вспомогательными функциями.

PVA - водорастворимость PVA делает его полезным только в качестве поддерживающего материала. Низкая вероятность трещинообразования и расслоения обусловлены его специализированными характеристиками.

Скорость печати и толщина слоя являются важными параметрами, влияющими на качество и точность 3D-печатных изделий. Эти факторы могут оказывать значительное воздействие на процесс усадки и деформаций различных типов пластиков. Рассмотрим влияние скорости печати и толщины слоя на усадочные явления и деформации для нескольких распространенных термопластов.

Основные параметры для сравнения:

1. Скорость печати: Скорость перемещения экструдера во время печати, измеряемая в мм/сек.
2. Толщина слоя: Толщина каждого наносимого слоя пластика, обычно измеряется в микрометрах (мкм).
3. Усадка: Процент уменьшения объема пластика после охлаждения.
4. Коробление: Деформация, возникающая при неравномерном охлаждении и усадке, приводящая к искривлению краев изделия.
5. Расслоение: Отделение соседних слоев друг от друга из-за недостаточной адгезии или чрезмерного натяжения.
6. Дефекты поверхности: Появление неровностей, волн или других визуальных недостатков на поверхности изделия.

Таблица 3 - Анализ влияния скорости печати и толщины слоя

Пластик	Оптимальная скорость печати (мм/сек)	Оптимальная толщина слоя (мкм)	Усадка	Коробление	Расслоение	Дефекты поверхности
PLA	50–80	100–200	Низкая	Низкое	Низкое	Минимальные
ABS	40–60	200–300	Высокая	Высокое	Высокое	Возможны волны
PETG	30–50	150–250	Средняя	Среднее	Среднее	Умеренные
Nylon	20–40	200–300	Высокая	Высокое	Высокое	Возможны складки
TPU	15–30	100–200	Низкая	Низкое	Низкое	Гладкая поверхность
PC	20–40	200–300	Высокая	Очень высокое	Очень высокое	Возможны трещины
PP	30–50	200–300	Высокая	Высокое	Высокое	Неровности
ASA	40–60	200–300	Высокая	Высокое	Высокое	Возможны волны
HIPS	40–60	200–300	Высокая	Высокое	Высокое	Возможны пузыри
PVA	30–50	100–200	Низкая	Низкое	Низкое	Гладкая поверхность

Анализ данных:

PLA - хорошо переносит быстрые скорости печати и тонкие слои, что делает его удобным для получения высококачественных отпечатков с минимальными дефектами.

ABS - требует медленной скорости печати и толстых слоев для предотвращения коробления и расслоения. Высокий уровень усадки может привести к появлению волн на поверхности.

PETG - представляет собой баланс между PLA и ABS, обеспечивая среднюю скорость печати и толщину слоя. Усадка и деформации находятся на среднем уровне, что делает его универсальным материалом.

Nylon - требует медленных скоростей печати и толстых слоев для минимизации усадки и деформаций. Высокая склонность к короблению и расслоению требует внимательного подхода к настройкам печати.

TPU - будучи эластичным материалом, хорошо переносит низкие скорости печати и средние толщины слоев. Низкая усадка и минимальное коробление обеспечивают гладкую поверхность.

PC - требует медленных скоростей печати и толстых слоев для борьбы с высокими уровнями усадки и деформаций. Риск трещинообразования остается высоким.

PP - склонен к высоким уровням усадки и деформаций, поэтому рекомендуется использовать медленные скорости печати и толстые слои. Поверхность может быть неровной.

ASA - подобно ABS, требует медленных скоростей печати и толстых слоев для предотвращения деформаций. Волны на поверхности могут появляться из-за высокой усадки.

HIPS - используемый в основном как поддерживающий материал, демонстрирует высокую усадку и склонность к деформациям. Медленная печать и толстые слои помогают уменьшить эти эффекты.

PVA - водорастворимый материал, отлично работает при средних скоростях печати и тонких слоях. Низкая усадка и минимальная деформация обеспечивают гладкую поверхность.

Заключение

В заключение можно отметить, что выбор материала для 3D-печати зависит от множества факторов, включая коэффициент теплового расширения, механические свойства, а также требования к скорости печати и толщине слоя. PLA, например, отличается низким коэффициентом теплового расширения и малой усадкой, что делает его предпочтительным для начинающих пользователей и печати точных деталей. В свою очередь, ABS характеризуется высоким коэффициентом теплового расширения, что ведет к значительной усадке и проблемам с короблением, однако этот материал обладает хорошей относительной деформацией и умеренным модулем упругости, что позволяет ему выдерживать значительные нагрузки. PETG занимает промежуточное положение между PLA и ABS, предлагая хороший баланс между прочностью и устойчивостью к деформациям, что делает его универсальным выбором для многих приложений. Nylon, хотя и обладает отличными механическими свойствами, требует особых условий печати из-за высокого коэффициента теплового расширения. TPU выделяется своими эластичными свойствами, что идеально подходит для гибких изделий, но требует точной настройки параметров печати. Поликарбонат (PC), несмотря на свои выдающиеся ударную вязкость и термостойкость, сложен в печати из-за высокого риска деформаций. Полипропилен (PP) и ASA имеют схожие проблемы с деформациями и усадкой, а PVA, как водорастворимый материал, находит свое основное применение в качестве поддержки. Таким образом, правильный подбор материала и оптимизация настроек печати являются ключевыми факторами для достижения качественного результата в 3D-печати.

Список литературы.

1. Булах, С. С. Анализ материалов для печати на FDM-технологии / С. С. Булах, К. А. Драчев // ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых : материалы региональной научно-практической конференции, Хабаровск, 12–16 апреля 2021 года. – Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2021. – С. 102-108.
2. Зыков, А. П. Анализ и сравнение материалов для FDM(FFF) трехмерной печати / А. П. Зыков, Н. А. Солодилова // Машиностроение: новые концепции и технологии : Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 28 октября 2022 года. – Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2022. – С. 56-61.
3. Кислова, А. В. Анализ металлонаполненных полимерных композиционных материалов для 3D-печати по технологии FDM / А. В. Кислова, Е. В. Преображенская, А. А. Ханков // Оптические технологии, материалы и системы («Оптотех 2022») : сборник докладов конференции, Москва, 05–10 декабря 2022 года. – Москва : МИРЭА - Российский технологический университет, 2022. – С. 351-356.
4. Пышкин, А. А. Аддитивные технологии в современном мире / А. А. Пышкин, Е. Г. Ковтун, А. Ю. Тараховский // Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования : сборник статей всероссийской научно-практической конференции, Севастополь, 13–15 мая 2024 года. – Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2024. – С. 83-85.
5. Сазыкин, Д. Н. Анализ и разработка оптимального алгоритма для повышения скорости и эффективности FDM печати / Д. Н. Сазыкин // Системный администратор. – 2023. – № 3(244). – С. 78-82.
6. Тараховский, А. Ю. Аддитивные технологии для стендового моделизма. – DOI 10.26160/2541-8637-2024-14-42-45 / А. Ю. Тараховский, А. А. Иваник // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2024. – № 14. – С. 42-45.
7. Управление жизненным циклом продукции / В. Б. Богущкий, С. Н. Писарюк, Н. А. Русина [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – 133 с. – ISBN 978-5-8088-1657-2.
8. Федоров, М. В. Анализ дефектов процесса FDM печати / М. В. Федоров. – Текст: непосредственный // Современные производственные технологии изготовления художественно-промышленных изделий из конструкционных материалов : сборник трудов научно-технического семинара, Москва, 27 апреля 2021 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2021. – С. 31-35.
9. Юсупов, И. И. Анализ параметров FDM-печати, определяющих физико-механические свойства стандартных образцов / И. И. Юсупов, Л. Р. Юсупова. – Текст: непосредственный // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых) : Материалы Международной молодежной научной конференции. Сборник докладов, Казань, 09–10 ноября 2023 года. – Казань: ИП Сагеев А.Р., 2023. – С. 472-478.
10. Tarakhovskiy, A. Mechanical Device for Sealing Ring Mounting into Internal Groove and its Opening Technical and Economic Justification / A. Tarakhovskiy, B. Bukach, D. Tabakaev. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.658. — Text : direct // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, Saint-Petersburg, 16–19 мая 2017 года. – Saint-Petersburg, 2017. – P. 1438-1442.

УДК 621.798.1; 004.925.83; 629.113.064

РЕВЕРСИНЖИНИРИНГ КЛИПСЫ КРЕПЛЕНИЯ СВЕТИЛЬНИКА

А.Ю. Тараховский¹, М.А. Тараховский²

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299001, Россия, aytarakhovskiy@sevsu.ru

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299001, Россия, taroworkua@gmail.com

Аннотация. Исследование посвящено применению методов реверс-инжиниринга для создания цифрового двойника сломанной клипсы светильника, отсутствующей в продаже. Был проведен анализ исходной детали, и с помощью программного обеспечения Компас-3D была разработана 3D-модель изделия. Результаты показали, что Компас-3D является эффективным инструментом для моделирования и проектирования, обеспечивающим высокое качество конечной продукции. Дальнейшие шаги включают доработку 3D-модели под FDM-печать и изготовление детали на 3D-принтере.

Ключевые слова: Реверс-инжиниринг, цифровой двойник, Компас-3D, анализ исходной детали, 3D-модель, FDM-печать, параметрическое моделирование.

REVERSE ENGINEERING LAMP MOUNTING CLIPS

A.Y. Tarakhovsky¹, M.A. Tarakhovsky²

¹FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299001, Russia, aytarakhovskiy@sevsu.ru

²FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299001, Russia, taroworkua@gmail.com

Abstract. The study is devoted to the application of reverse engineering methods to create a digital twin of a broken lamp clip that is not commercially available. The initial part was analyzed, and a 3D model of the product was developed using the Compass-3D software. The results showed that Compass-3D is an effective tool for modeling and designing, ensuring high quality of the final product. Further steps include finalizing the 3D model for FDM printing and manufacturing the part on a 3D printer.

Keywords: Reverse engineering, digital twin, Compass 3D, original part analysis, 3D model, FDM printing, parametric modeling.

Введение. Реверс-инжиниринг (обратная разработка) – это процесс исследования и анализа устройства, системы или программного обеспечения с целью понять его структуру, функции и принципы работы для создания аналогичного продукта или улучшения существующего [1 - 3]. В контексте ремонта техники реверс-инжиниринг может быть полезен, если оригинальная запчасть недоступна.

Цель исследования – создание цифрового двойника клипсы крепления светильника посредством реверс-инжиниринга и разработке соответствующей конструкторской документации. Исходная деталь будет тщательно изучена и проанализирована для последующего воссоздания точной 3D-модели, которая затем адаптируется под технологию FDM-печати. В рамках проекта кроме создания 3D модели будет создан ассоциативный чертеж. Далее планируется изготовление клипсы крепления светильника на 3D-принтере. Конструкторская документация обеспечит точное соблюдение требований к размерам, материалам и другим характеристикам, гарантируя высокое качество конечной продукции. Основные задачи включают:

Исследование и анализ исходной детали: Провести подробный анализ геометрической формы, материала и конструктивных особенностей детали, чтобы создать точную цифровую копию.

1. **Разработка 3D-модели:** Создать цифровую 3D-модель детали, используя методы сканирования или ручного моделирования. Модель должна максимально точно воспроизводить форму и размеры оригинала.

2. **Документирование процесса:** Подготовить отчет о проведенном исследовании, включающий описание всех этапов работы, результаты испытаний и рекомендации по улучшению процесса.

Постановка проблемы. Из-за поломки клипсы светильника (рис. 1.), необходимой для установки в крышку аквариума, возникла необходимость в замене данной детали.

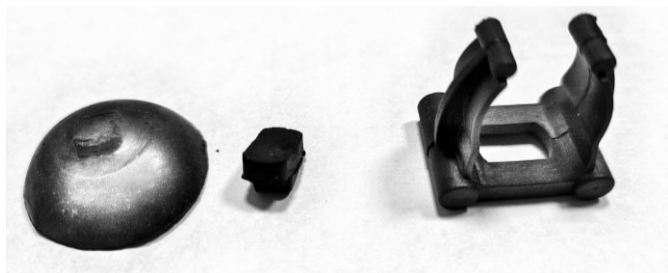


Рис. 1. Клипса светильника в сломанном варианте

Однако приобретение аналогичной клипсы затруднено ввиду её отсутствия в продаже. В связи с этим было принято решение использовать методы реверс-инжиниринга для создания цифрового двойника клипсы, адаптации полученной 3D-модели под технологию FDM-печати и последующего изготовления детали на 3D-принтере.

Изложение основного материала. Реверс-инжиниринг — это процедура восстановления деталей или изделий путём изучения и обратной разработки уже имеющихся продуктов. В машиностроении этот подход активно используется для воссоздания повреждённых компонентов, которые либо сняты с производства, либо отсутствуют в продаже. Рассмотрим последовательность при проектировании детали с использованием методов реверс инжиниринга.

Анализ и диагностика: Первым шагом является детальное изучение поврежденной детали. Это включает в себя осмотр ее конструкции, материалов, размеров и других характеристик. Для этого могут использоваться различные инструменты, такие как микроскопы, измерительные приборы и сканеры и специализированные программы для 3D-сканирования [4 - 6]. В нашем случае клипса состоит из двух деталей, непосредственно пластиковой клипсы и резиновой присоски, которая и сломалась. Клипса достаточно простой конфигурации, для обмеривания будем использовать штангенциркуль. Клипса выполнена из пластика и служит для удержания аквариумного светильника под крышкой аквариума, особых нагрузок не испытывает, светильник светодиодный с малой температурой нагрева, но присутствует агрессивная среда – испарения воды. Резиновую присоску мы изготавливать не будем, лучше доработаем пластиковую клипсу, которую будем крепить в крышку аквариума через байнетное крепление (рис. 2). Эскиз клипсы представлен на рис. 3.



Рис. 2. Байнетное крепление под светильник в крышке аквариума

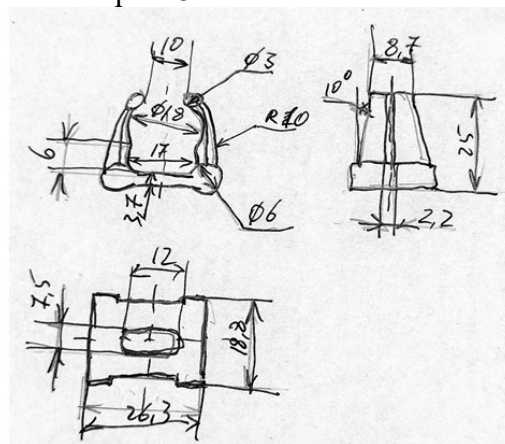


Рис. 3. Эскиз клипсы светильника

Создание чертежей и моделей: Опираясь на эскиз будем проектировать клипсу для светильника. Для проектирования будем использовать Компас 3D.

Компас-3D — это мощное программное обеспечение для трёхмерного моделирования и проектирования, разработанное российской компанией «Аскон». Оно пользуется популярностью среди инженеров, проектировщиков и конструкторов благодаря своим многочисленным преимуществам [7 - 14]. Рассмотрим подробнее, почему Компас-3D удобен для моделирования:

1. Интуитивно понятный интерфейс.

Интерфейс программы прост и логичен, что облегчает работу даже новичкам. Все основные инструменты и команды расположены удобно и доступны прямо на панели

инструментов. Это значительно сокращает время на освоение программы и ускоряет рабочий процесс.

2. Широкий функционал.

Компас-3D предлагает обширный набор инструментов для создания и редактирования трёхмерных моделей. Программа поддерживает множество типов объектов (детали, сборки, поверхности, сварные конструкции и др.) и предоставляет разнообразные способы их создания и модификации. Это позволяет решать самые разные задачи, начиная от простого проектирования деталей и заканчивая сложными сборками.

3. Поддержка стандартов и норм.

Программа интегрирована с российскими стандартами и нормами (ГОСТ, ЕСКД и др.). Это существенно упрощает процесс создания технической документации и чертежей, соответствующих установленным стандартам. Поддержка различных форматов файлов (STEP, IGES, DXF и др.) обеспечивает совместимость с другими программами и системами автоматизированного проектирования.

4. Мощные средства параметрического моделирования.

Параметрическое моделирование позволяет связывать между собой различные элементы модели и изменять их параметры в реальном времени. Это очень удобно при внесении изменений в проект, так как изменения автоматически распространяются на всю модель. Такой подход значительно повышает эффективность работы и уменьшает количество ошибок.

5. Автоматизированное создание чертежей.

Компас-3D позволяет автоматически генерировать чертежи на основе трёхмерной модели. Это экономит значительное количество времени и усилий, так как не требуется вручную создавать каждый элемент чертежа. Чертежи соответствуют всем необходимым стандартам и могут быть легко изменены вместе с моделью.

Компас-3D — это мощный инструмент для трёхмерного моделирования и проектирования, обладающий широким функционалом, удобным интерфейсом и поддержкой российских стандартов. Его использование позволяет значительно ускорить процесс проектирования, улучшить качество создаваемых моделей и сократить количество ошибок.

Строим контур клипсы по размерам эскиза. Так как диаметр лампы светильника 18 мм, то мы будем рассчитывать что лампу необходимо удерживать и поэтому принимаем внутренний диаметр 17 мм (рис. 4).

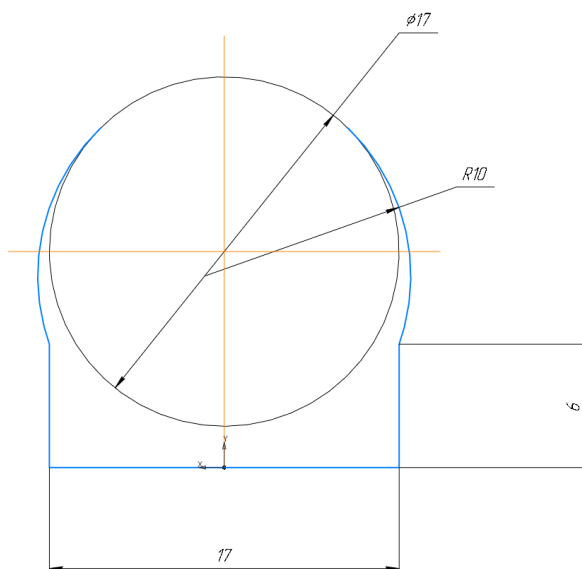
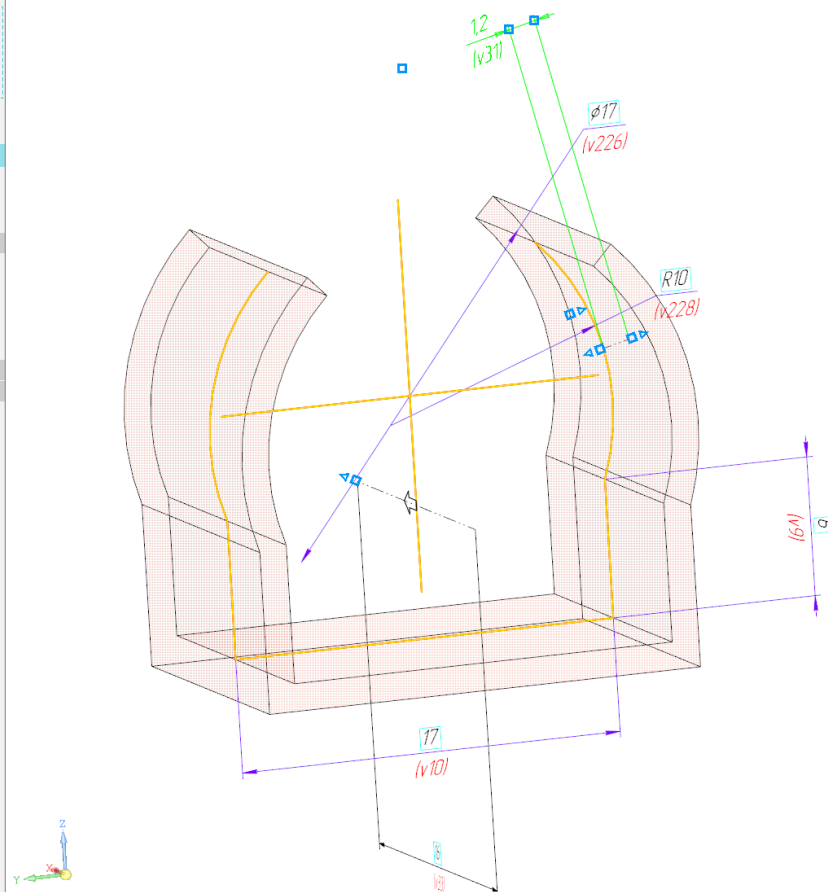


Рис. 4. Внутренний контур клипсы светильника

Используя операцию **Элемент выдавливания** придаем телу толщину наружу (рис. 5). Так как планируем печатать соплом диаметром 0,6 мм, то толщина стенки должна быть кратной этому числу, задаем толщину стенки 1,2 мм. Выдавливаем деталь симметрично на расстояние 16 мм.



Проектируем верхние прижимные валики (рис. 6) и используя операцию *Элемент выдавливания* придаем объем.

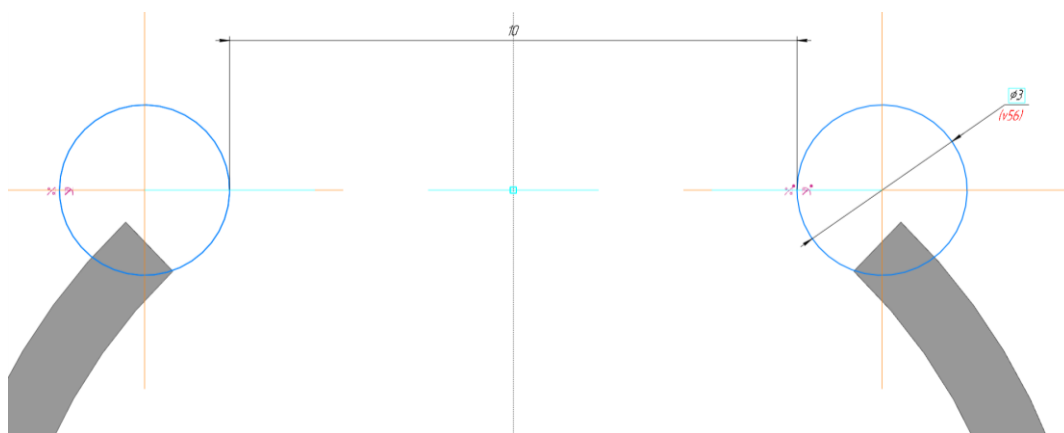


Рис. 6. Верхние прижимные валики

Далее достраиваем нижнюю платформу и создаем ребро жесткости (рис. 7). Толщина ребра оригинала 2,2 мм, учитывая диаметр сопла задаем толщину 1,8 мм. Далее операцией **Зеркальный массив** создаем второе ребро жесткости.

После создания ребер жесткости переходим к проектированию байнетного крепления. Глубина паза в крышке 8 мм, толщина стенки крышки 3 мм. Создаем смещенную плоскость на расстоянии 6 мм, на этой плоскости чертим эскиз байнета (рис. 8), далее придаем байнету толщину 2,4 мм, после достраиваем соединительную ось.

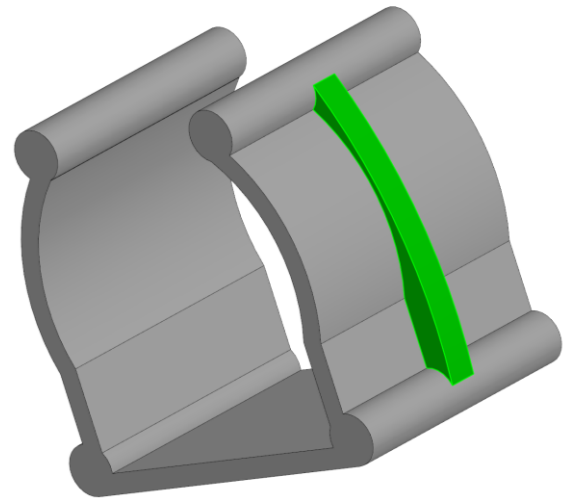


Рис. 7. Ребро жесткости

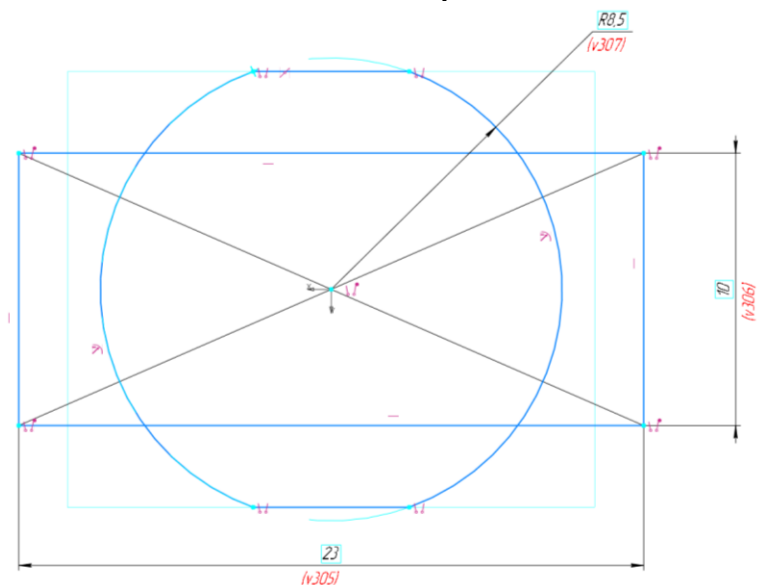


Рис. 8. Эскиз байнета

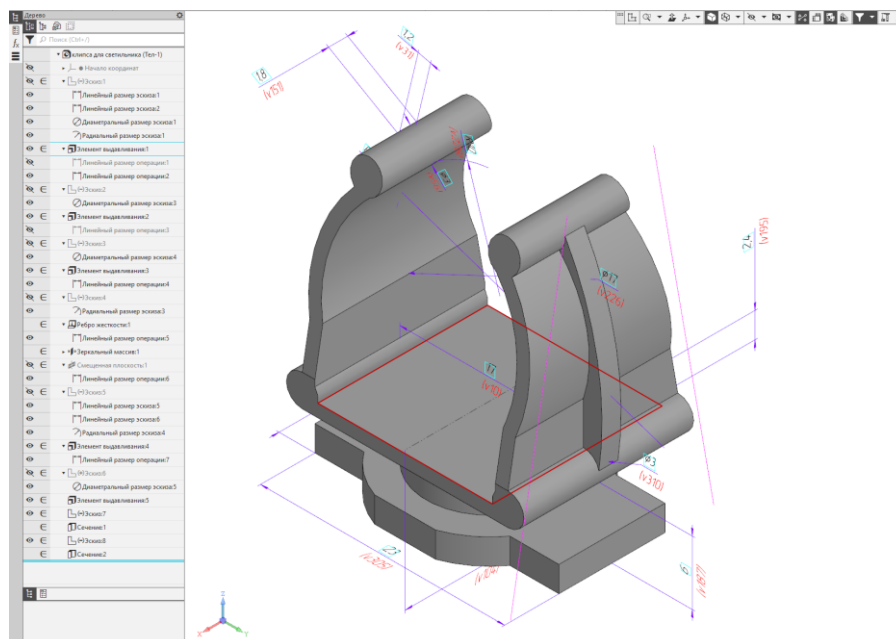


Рис. 9. Электронная модель изделия

Заключение

1. Реверс-инжиниринг как метод решения проблемы: Использование методов реверс-инжиниринга позволило восстановить сломанную клипсу светильника, несмотря на отсутствие возможности приобрести новую деталь. Данный подход продемонстрировал свою эффективность в контексте ремонта техники и создания цифровых копий утраченных или недоступных комплектующих.

2. Моделирование в Компас-3D: Программное обеспечение Компас-3D оказалось удобным инструментом для выполнения поставленных задач благодаря интуитивному интерфейсу, широкому функционалу, поддержке стандартов и возможностей параметрического моделирования. Применение Компаса-3D ускорило процесс проектирования и повысило качество конечных результатов.

3. Результаты проектирования: В ходе исследования была создана точная цифровая копия клипсы светильника, адаптированная под технологию FDM-печати. Проектирование включало в себя этапы анализа исходной детали, создания 3D-модели и подготовки конструкторской документации. Полученная электронная модель изделия соответствует требованиям к размерам и материалам, обеспечивая высокую точность и качество конечной продукции.

4. Перспективы дальнейшего развития: Несмотря на успешное завершение основных этапов работы, дальнейшие шаги предполагают дорабатывание 3D-модели под FDM-печать и последующее изготовление детали на 3D-принтере. Эти действия позволят окончательно завершить процесс реверс-инжиниринга и подтвердить работоспособность восстановленной клипсы светильника.

Список литературы.

1. Голубев, И. Г. Реверс-инжиниринг как инструмент производства запасных частей импортной сельскохозяйственной техники / И. Г. Голубев, В. Я. Гольяпин, М. Н. Болотина // Техничко-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе : материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Мелитополь, 21–22 февраля 2024 года. – Мелитополь : Мелитопольский государственный университет, 2024. – С. 532-534.
2. Тараховский, А. Ю. Реверс-инжиниринг коленчатого вала компрессора / А. Ю. Тараховский, И. А. Смирнов. – DOI 10.26160/2658-3305-2023-18-91-97 // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 18. – С. 91-97.
3. Реверс-инжиниринг в производстве крупногабаритных изделий / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, Н. Л. Грецкий, Д. Н. Хилько // Инновационное станкостроение, технологии и инструмент : материалы I Международной научно-практической конференции, Гомель, 30 ноября 2023 года. – Гомель : Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, 2024. – С. 24-26.
4. Кутин, А. А. Реверс инжиниринг для восстановления поврежденных деталей в машиностроении / А. А. Кутин, А. В. Кислова // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2024) : сборник докладов Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА, Москва, 12–16 апреля 2024 года. – Москва : МИРЭА - Российский технологический университет, 2024. – С. 186-189.
5. Саса, Д. А. Создание методики повышения производительности процесса создания твердотельной 3D модели из реального объекта с помощью оптического сканера / Д. А. Саса, А. Ю. Тараховский // Современные технологии: проблемы и перспективы : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых ученых, Севастополь, 19–22 апреля 2021 года. – Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2021. – С. 49-55.
6. Смеян, В. Е. 3D-сканирование и реинжиниринг лопастей БПЛА / В. Е. Смеян, Г. Н. Дьякова // Беспилотные аппараты "БПЛА - 2024" : сборник статей Международного молодежного форума, Минск, 22–26 апреля 2024 года. – Минск : Белорусский государственный технологический университет, 2024. – С. 219-223.
7. Калачева, А. А. Проектирование беспилотного летательного аппарата в системе КОМПАС-3D / А. А. Калачева // Современная педагогика и научные исследования в образовательной организации высшего образования : материалы всероссийской научно-методической конференции, Кострома, 17 февраля 2024 года. – Кострома : Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С. К. Тимошенко Министерства обороны Российской Федерации, 2024. – С. 162-167.
8. Тараховский, А. Ю. Аддитивные технологии для стендового моделизма. – DOI 10.26160/2541-8637-2024-14-42-45 / А. Ю. Тараховский, А. А. Иваник // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2024. – № 14. – С. 42-45.
9. Зайцев, А. КОМПАС-3D v22: новые САПР-приложения, реверс-инжиниринг и еще 100+ улучшений / А. Зайцев, Н. Михалевич // САПР и графика. – 2023. – № 10(326). – С. 30-37.
10. Абрамов, Ю. С. Анализ программных средств для разработки САПР на основе реверс - инжиниринга / Ю. С. Абрамов // Взаимодействие науки и общества - путь к модернизации и инновационному развитию : сборник

статей Всероссийской научно-практической конференции, Новосибирск, 13 июня 2022 года. – Уфа : Аэтерна, 2022. – С. 12-14.

11. Таран, Д. С. Применение программных продуктов компании АСКОН при проектировании малых ветрогенераторов / Д. С. Таран, А. Ю. Тараховский // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении : материалы международной научно-технической конференции, Севастополь, 14–15 сентября 2015 года. – Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2015. – С. 119-122.

12. Орлов, Д. А. Применение метода реверс-инжиниринга для деталей сложной геометрической формы / Д. А. Орлов, Е. А. Волкова // Творчество молодых - родному региону : сборник материалов IX Региональной межвузовской научно-практической конференции, Выкса, 20 апреля 2022 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Выксунский филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». – Казань : Бук, 2022. – С. 215-222.

13. Павлов, М. В. Решение задач реверс-инжиниринга методами цифровой метрологии и САПР в условиях импортозамещения / М. В. Павлов, А. М. Балланд, А. В. Уколов // 3D технологии в решении научно-практических задач : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 29 сентября 2022 года. – Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. – С. 21-25.

14. Солодилова, Н. А. Новые технологии проектирования в рамках дисциплины "САПР в машиностроении" / Н. А. Солодилова // Системный анализ в проектировании и управлении : сборник научных трудов XXIII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 июня 2019 года / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург : Политех-Пресс, 2019. — Часть 3. – С. 391-397.

УДК 678

АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ГРАНУЛЬНОЙ 3D ПЕЧАТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ

Л.Н. Шафигуллин¹, Н.В. Романова², А.Т. Габдрахманов³

¹ФГАОУ ВО «Набережночелнинский институт (филиал) Казанского Федерального Университета», г. Набережные Челны, 423800, Россия, misharin_82@mail.com

²ФГАОУ ВО «Набережночелнинский институт (филиал) Казанского Федерального Университета», г. Набережные Челны, 423800, Россия, romnatav@yandex.ru

³ФГАОУ ВО «Набережночелнинский институт (филиал) Казанского Федерального Университета», г. Набережные Челны, 423800, Россия, veyron000@mail.ru

Аннотация. Представлен аналитический обзор по полимерным и композитным материалам и технологиям высокопроизводительной гранульной 3D печати. Проведен выбор и обоснование материалов для изготовления гранул для 3D печати деталей автомобилестроения.

Ключевые слова: полимерные и композиционные материалы, аддитивные технологии, гранульная печать.

ANALYSIS OF MATERIALS AND TECHNOLOGIES OF GRANULAR 3D PRINTING FOR THE MANUFACTURE OF CAR PARTS

L.N. Shafigullin¹, N.V. Romanova², A.T. Gabdrakhmanov³

¹FSAEI HE "Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University", Naberezhnye Chelny, 423800, Russia, misharin_82@mail.com

²FSAEI HE "Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University", Naberezhnye Chelny, 423800, Russia, romnatav@yandex.ru

³FSAEI HE "Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University", Naberezhnye Chelny, 423800, Russia, veyron000@mail.ru

Abstract. An analytical review of polymer and composite materials and technologies for high-performance granular 3D printing is presented. The selection and justification of materials for the production of granules for 3D printing of automotive parts was carried out.

Keywords: polymer and composite materials, additive technologies, granule printing.

Введение

Развитие аддитивных технологий, в частности экструзионной 3D-печати, демонстрирует стремительный рост в последние годы. Этот прогресс обусловлен несколькими ключевыми факторами: удешевление и повсеместная распространенность оборудования; значительное улучшение качества материалов, включая разработку новых полимеров и композитов, расширило возможности применения экструзионной печати в различных отраслях, от прототипирования до массового производства; развитие программного обеспечения для 3D-моделирования и подготовки к печати, а также совершенствование алгоритмов управления процессом позволили достичь большей точности и предсказуемости результатов. Немаловажна поддержка и развитие открытого сообщества: обмен опытом и идеями способствует быстрому внедрению инноваций и совершенствованию технологий. В совокупности эти факторы привели к тому, что экструзионная печать стала одной из наиболее востребованных и динамично развивающихся технологий в сфере 3D-печати, способствуя переходу от концептуальных моделей к полноценным функциональным изделиям.

Одним из основных преимуществ 3D-печати из полимерных материалов является возможность создания объектов с высокой точностью и детализацией. Кроме того, такие технологии позволяют сократить время производства и снизить затраты на изготовление единичных или малых серий изделий. Тем не менее, использование аддитивных технологий также сталкивается с рядом проблем, таких как ограниченный выбор доступных материалов, необходимость в специальных условиях печати и высокая стоимость оборудования. В связи с этим, являются актуальными задачами для развития данной отрасли [1-3].

Цель исследования – анализ материалов и технологий гранульной 3D-печати.

Анализ материалов для гранульной 3D печати

Известно, что филаменты, которые используются в классическом процессе FDM-печати получают из гранул полимеров. Поэтому печатать напрямую гранулами, исключив этап производства нитей, является более простой и дешевой технологией. Метод аддитивной печати гранулами все активнее применяется в промышленности и называется экструзия гранул полимера (Fused Granular Fabrication – FGF) или гранульная (пеллетная) 3D печать. Гранулят – самая удобна форма поставки полимеров. В процессе гранулирования материалы, которые могут быть пластмассами, композитами или минералами, перерабатываются и формуются в виде гранул. Эти ресурсы в основном используются для литья под давлением, но становятся все более востребованным расходным материалом при решении специфических задач 3D-печати. Материалы для пеллетных 3D принтеров используются те же, что и для литья термопластов под давлением. Благодаря тому, что это большой и давно освоенный рынок, существует огромный выбор производителей и материалов (таблица 1) [4, 5].

Таблица 1 - Материалы для пеллетных 3D принтеров

Материал	Характеристики	Применение
PLA	Средняя износостойкость, низкая устойчивость к маслу, средняя химическая стойкость, высокая биосовместимость, низкая жаропрочность, легкая обработка, биоразлагаемость	Прототипирование, образовательные модели
rPLA	Те же характеристики, что и у PLA, изготавливается из переработанного PLA	Прототипирование, образовательные модели
ABS	Высокая износостойкость, средняя устойчивость к маслу, высокая химическая стойкость, низкая биосовместимость, средняя жаропрочность, высокая прочность и жесткость	Функциональные прототипы, корпусные детали
PETG-GF	Высокая износостойкость, высокая устойчивость к маслу, высокая химическая стойкость, низкая биосовместимость, средняя жаропрочность, высокая ударопрочность, хорошая химическая стойкость	Прототипирование, функциональные детали
PC-CF	Очень высокая износостойкость и устойчивость к маслу, высокая химическая стойкость, низкая биосовместимость, высокая жаропрочность, очень высокая жесткость и прочность	Промышленные компоненты
PA-CF	Высокая износостойкость, высокая устойчивость к маслу, высокая химическая стойкость, низкая биосовместимость, высокая жаропрочность, отличная стойкость к истиранию и химическим веществам, высокая механическая прочность	Функциональные детали, механические компоненты
PA-GF	Высокая износостойкость, высокая устойчивость к маслу, высокая химическая стойкость, низкая биосовместимость, высокая жаропрочность, высокая жесткость и прочность, стойкость к истиранию и химическим воздействиям	Инженерные детали, автомобильные компоненты
PP-GF	Высокая износостойкость, высокая устойчивость к маслу, высокая химическая стойкость, низкая биосовместимость, средняя жаропрочность, низкая плотность, высокая стойкость к химическим воздействиям	Химическая и автомобильная промышленность
TPU	Низкая износостойкость, высокая устойчивость к маслу, средняя химическая стойкость, высокая биосовместимость, низкая жаропрочность, высокая эластичность и стойкость к износу	Гибкие детали, прототипирование

Анализ технологий гранульной 3D печати

Самой распространенной и популярной, относительно простой, а потому и недорогой аддитивной технологией 3D печати является экструзионная печать (FDM, FFF, FGF).

В основе технологии FGF лежит принцип послойного наращивания объекта. Гранулы пластика загружаются в специальный бункер 3D-принтера, откуда они подаются в печатающую головку. Внутри головки гранулы плавятся и затем экструдированы через сопло на рабочую платформу, формируя объект по заданной 3D-модели. Печатающая головка может двигаться по трём осям (X, Y и Z), что позволяет создавать сложные трехмерные структуры.

Для печати гранулами и филаментами требуются разные экструдеры, то есть обрабатывать гранулы в стандартном FDM/FFF-принтера не получится. В FGF-решениях

экструдеры крупнее, поэтому материал подается гораздо быстрее. Пеллетные экструдеры для принтера - это специализированные печатающие головки, разработанные специально для 3D-печати гранулами или измельченным повторно используемым пластиком.

Большинство экструдеров для гранул имеют несколько зон нагрева. Первая из них обычно имеет более высокую температуру, для обеспечения равномерного плавления материала. Другие зоны имеют более низкую температуру, так как их целью является поддержание постоянной температуры и потока вдоль длинного шнека. Эти нагреватели, как правило, более горячие, чем нагреватели FDM, и операторы должны обеспечивать безостановочную печать, чтобы избежать возгорания пластика.

3D-печать гранулами обеспечивает гораздо более высокую скорость печати и производительность, что является значительным преимуществом перед традиционной FDM при создании крупногабаритных деталей.

Достоинствами FGF-технологии по сравнению с FDM-технологией являются:

1. Экономия затрат. Гранулы могут стоить на 65 - 90 % меньше, чем филамент из того же пластика, в зависимости от объемов используемого материала.

2. Высокая скорость печати. Благодаря большим зонам нагрева в экструдерах FGF-принтеров пропускная способность материала почти в 100 раз больше по сравнению с FDM-принтерами, поэтому скорость печати может быть в 200 раз выше (зависит от оборудования и материала).

3. Печать крупных объектов. Зачастую она экономически оправдана только при использовании более дешевых материалов при меньшем времени печати. FGF в этом смысле – рентабельная технология для изготовления больших изделий или крупных серий деталей.

4. Большой выбор материалов. Не все пластики можно переработать в нить, поэтому гранулированных материалов на рынке доступно гораздо больше.

5. Более низкая стоимость материалов. Гранулы дешевле филаментов не только потому, что процесс их переработки проще. Они используются в литье под давлением и других видах производства, поэтому рынок материалов этого типа огромен, что позволяет поддерживать низкие цены.

6. Уникальные композиты. Возможность создавать собственные композитные термопласты, комбинируя различные гранулы и добавляя различные красители, компоненты и армирующие волокна.

7. Экологичность. Возможность сокращать пластиковые отходы – это не только забота об окружающей среде, но и гарантия устойчивого развития в будущем.

Недостатками FGF-технологии по сравнению с FDM-технологией являются:

1. Ограничения по детализации и геометрии. Из-за скорости, с которой происходит экструзия расплавленного пластика, этот метод обычно не используется для создания сложных объектов и изделий с мелкими деталями. У FDM-принтеров толщина напечатанного слоя составляет от 0,15 мм до 0,4 мм, тогда как у FGF-машин – от 1 мм до 5 мм. Создание поддержек и выступающих элементов также может представлять трудности, что влечет за собой дополнительные ограничения при проектировании.

2. Дефекты печати. В зависимости от качества экструдера и расходных материалов возможно появление изъянов, вызванных неравномерным поступлением и выходом материала. Дефекты могут варьироваться от пустот и воздушных пузырьков до коробления и чрезмерной либо недостаточной экструзии.

3. Отсутствие ретракции. В FDM-принтере ретракция предотвращает вытекание материала из сопла путем изменения направления вращения шестерен подачи филамента. В FGF-установках такой возможности нет, так как в конструкции используются винты для проталкивания материала к соплу. Единственный вариант прекратить подачу материала – остановить или замедлить движение винта либо заблокировать сопло.

4. Проблемы с доступностью гранул в небольших объемах. Для промышленной 3D-печати приобрести пластик в гранулах, скорее всего, проще, чем филаменты. Однако

пользователям, которым требуется 5-10 кг гранул за раз, найти дистрибьюторов будет сложнее.

Материалы для 3D печати деталей автомобилестроения методом FGF

В автомобилестроении широко используются различные полимерные изделия, изготовленные из АБС, ПК, ПВХ, полиакрилатов, ПА, ПП, ПУ, ПДЦПД, ПЭ, фторопластов. В таблице 2 приведены свойства основных филаментов для FDM печати, широко применяемых в автомобилестроении [4-6].

Таблица 2 - Основные характеристики полимерных материалов

Филамент	PLA	ABS	PETG (PET, PETT)	HIPS	SBS PRO	PP	TOTAL GF-30
Прочность на изгиб, МПа	55,3	41	76,1	33	36		210
Предел на разрыв, МПа	57,8	22	36	62	24		150
Модуль упругости, МПа	3,3-3,8	1,5	200	2,3	1,5	1,2	6,5
Относительное удлинение, %	3,8	6	40	65	250	150	25
Усадка, %	0,4-0,7	0,8	0	0,8	0,2-1,1	2,4	0,2- 0,8
Плотность, см ³	1,24	1,05	1,27	1,05	1,01	0,9	1,45
Температура плавления, °С	173- 178	220	220- 245	210- 260	160- 170	160- 165	230-250
Твердость (по Роквеллу), HRC	70-90	81-116	106	79	118	30	103
Влагопоглощение, %	2-50	0,2-0,3	0	0	0,06	0	0

Применение филаментов не гарантирует, что они имеют точно таких же физические и химические свойства, как и исходный материал, так как при изготовлении филамента гранулы подвергаются термическому воздействию, что может приводить к изменению свойств – чем больше нагрев, тем значительнее ухудшение. Для снижения эффекта деструкции полимерного материала используются специальные добавки. Полученный результат, следовательно, значительно отличается от исходного материала. Применение гранул для 3D-печати позволяет избежать данных изменений, что в результате приводит к получению максимально приближенных химических и физических свойств полимерного материала, используемого при литье под давлением.

На рис. 1 представлен пример применения FGF печати для изготовления прототипа детали грузового автомобиля.



Рис. 1. Прототип детали для грузовика Scania © iemai3d.com Оборудование: FGF-принтер IEMAI FAST JET 1500 Материал: модифицированный PETG. Размер модели: 1315 x 540 x 670 мм.
Время печати: 30 часов

Гранульную печать возможно использовать для изготовления бамперов, панелей кузова, внутренних облицовок, панелей приборов, решеток радиатора, соединительных элементов, колесных дисков, топливных баков, трубопроводов и рукавов, защитных обтекателей и панелей из крупнотоннажных полимеров (полипропилен, акрилонитрил-бутадиен-стироль, полиамид, полиэтилен и т.д.). В настоящее время ПАО КАМАЗ рассматривается возможность применения FGF печати в опытном производстве автомобилей, в том числе для изготовления технологической оснастки.

Заключение

Технология 3D-печати с использованием пластиковых гранул предлагает значительные преимущества по сравнению с традиционной печатью нитями - снижение стоимости материалов и повышение скорости печати. Несмотря на некоторые трудности в реализации и низкую распространённость на рынке, потенциал этой технологии велик. Материалы для пеллетных 3D принтеров используются те же, что и для литья термопластов под давлением. Благодаря тому, что это большой и давно освоенный рынок, существует огромный выбор производителей и материалов.

Благодарность

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан (соглашение № 49/2024-ПД от 16.12.2024 г.).

Список литературы

1. Максимов, Н. М. Стратегия развития аддитивных технологий / Н. М. Максимов. — Текст : непосредственный // Аддитивные технологии. – 2021. – № 4. – С. 10.
2. Сацкая, З. М. О развитии аддитивных технологий в России / З. М. Сацкая. — Текст : непосредственный // Аддитивные технологии. – 2021. – № 3. – С. 16–20
3. Проектирование звукопоглощающих сотовых материалов с геометрией трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ) / Сысоев Е. И., Сычев М. М., Шафигуллин Л. Н., Дьяченко С. В. – Текст : непосредственный // Акустический журнал. – Москва. - 2024. - Т. 70, № 5. - с. 765-777.
4. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) / С. В. Кондрашов, А. А. Пыхтин, С. А. Ларионов, А. Е. Сорокин. — DOI.org/ 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49. — Текст : электронный // Труды ВИАМ. – 2019. – № 10 (82). – С. 34–49. – URL: http://www.viam-works.ru/ru/articles?art_id=1473 (дата обращения: 29.12 2024).
5. Балашов, А. В. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью / А. В. Балашов, М. И. Маркова. — Текст : электронный // Инженерный вестник Дона : электронный научный журнал. – 2019. – № 1. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5618> (дата обращения: 29.12 2024).
6. Разработка методики испытаний материалов для FDM-печати, применяемых для изготовления автокомпонентов / Шафигуллин Л. Н., Габдрахманов А. Т., Романова Н. В. [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – Казань. – 2024. - №2. – с. 119 – 124.

Секция 3

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.4

РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ ДЕТАЛЕЙ ВЕРТОЛЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-СКАНИРОВАНИЯ

И. А. Емельянов¹, Р. А. Байчоров², С. В. Албул³

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
г. Москва, 119049, Россия, emelianov.ia@misis.ru

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
г. Москва, 119049, Россия, r.baichorov@misis.ru

³ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
г. Москва, 119049, Россия, albul@misis.ru

Аннотация. В условиях санкционного давления на российскую промышленность актуальной становится задача модернизации и развития технологий для обеспечения технологического суверенитета. Одним из способов достижения этой цели является реверс-инжиниринг и создание отечественных аналогов импортных изделий. Данный проект фокусируется на описании технологии разработки 3D-моделей методом реверс-инжиниринга с применением 3D-сканирования на реальном примере деталей двигателя вертолета Rotex. В работе рассматриваются процесс выбора и настройки сканирующего оборудования, а также особенности сканирования и обработки данных.

Было использовано сканирующее оборудование "Rangevision 2016.3 Premium" с высоким разрешением и точностью. При сканировании были выявлены трудности с воспроизведением внутренних поверхностей деталей, которые были решены путем разделения деталей на части и последующим объединением облаков точек в полигональную сетку. С использованием программного обеспечения Geomagic Design X были созданы 3D-модели поршня и цилиндра. Были получены модели, пригодные для производственного использования.

Работа подчеркивает важность развития отечественных технологий и реверс-инжиниринга как инструментов для обеспечения технологической независимости и решения проблем, связанных с санкциями и импортозамещением.

Ключевые слова: 3D-сканирование, импортозамещение, обратный инжиниринг, поверхностное моделирование, полигональная сетка, облако точек, реверс-инжиниринг

REVERSE ENGINEERING OF HELICOPTER ENGINE PARTS USING 3D-SCANNING

I. A. Emelyanov¹, R. A. Baichorov², S. V. Albul³

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, 119049, Russia,
emelianov.ia@misis.ru

² National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, 119049, Russia,
r.baichorov@misis.ru

³ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, 119049, Russia,
albul@misis.ru

Abstract. In the context of sanctions pressure on the Russian industry, the task of modernizing and developing technologies to ensure technological sovereignty becomes urgent. One of the ways to achieve this goal is reverse engineering and creating domestic analogues of imported products. This project focuses on describing the technology for developing 3D models by reverse engineering using 3D scanning on a real example of Rotex helicopter engine parts. The paper discusses the process of selecting and configuring scanning equipment, as well as features of scanning and data processing.

Rangevision 2016.3 Premium scanning equipment with high resolution and accuracy was used. Scanning revealed difficulties with reproducing the internal surfaces of parts, which were solved by dividing the parts into parts and then combining the point clouds into a polygonal grid. 3D models of the piston and cylinder were created using Geomagic Design X software. Models suitable for production use were obtained.

The paper highlights the importance of developing domestic technologies and reverse engineering as tools for ensuring technological independence and solving problems related to sanctions and import substitution.

Keywords: reverse engineering, 3D-scanning, surface modeling, polygon mesh, point cloud, import substitution

Постановка проблемы. Проблемы российской промышленности, вызванные санкционным давлением, доказывают необходимость модернизации и развития технологий, обеспечивающих технологический суверенитет [1]. Для решения этих задач требуется налаживание собственного производства аналогов импортных деталей машин с использованием принципов реверс-инжиниринга. Так, первым этапом при создании отечественных аналогов является создание 3D-моделей реальных образцов для быстрого прототипирования. Для ускорения процесса моделирования целесообразно воспользоваться технологией 3D-сканирования [2], которая позволяет получать облака точек, повторяющие внешнюю поверхность реального объекта, и благодаря которым является возможным быстрое и точное моделирование по размерам тела. В данной работе описывается моделирование твёрдых тел с опорой на сетки облаков точек, а именно моделирование поршня и цилиндра от двигателя вертолѐта Rotex.

Изложение основного материала. При выборе сканирующего оборудования для проекта учитывались несколько факторов. В первую очередь, было обращено внимание на размеры объекта, который необходимо сканировать. Также важным параметром было разрешение сканера и требуемая точность сканирования.

Габариты сканируемой детали составляли примерно 20 см, а наименьшие сканируемые размеры составляли 2 мм. В связи с этим был выбран сканер "Rangevision 2016.3 Premium" (рис. 1). Этот сканер обеспечивает высокую точность сканирования и позволяет получить детализированную модель объекта с разрешением от 0,25 мм.



Рис. 1. 3D-сканер Rangevision 2016.3 Premium

При сканировании выяснилось, что внутренние поверхности не могут быть отсканированы без деформации. Решено было разрезать деталь, сканировать части отдельно и затем объединить полученные облака точек [3, 4] в полигональную сетку (рис. 2) для моделирования в системе Geomagic Design X. Для создания 3D-моделей были разработаны эскизы на основе полученной сетки, которые помогли определить форму и размеры поверхности деталей. Затем была проведена операция выдавливания по полученным эскизам (рис. 3).

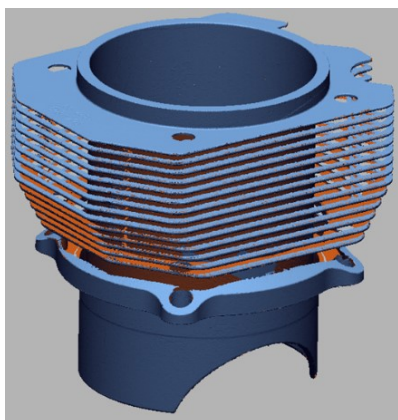


Рис. 2. Полигональная сетка цилиндра

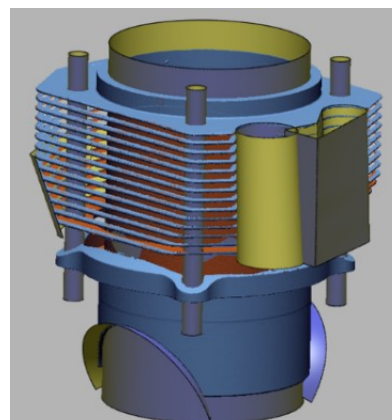


Рис. 3. Процесс создания твердотельной детали поршня

При моделировании цилиндра возникли трудности с экструдированием бобышек сложных форм, обусловленные сложной формой поверхности тела. Поэтому было принято решение создать ряд эскизов по сетке и на их основе создать замкнутую поверхность сечения

примитивов модели (рис. 3). Благодаря данному решению стало возможным воспроизведение посадочных и крепежных отверстий.

При создании поршня не было замечено участков модели, для которых является необходимым использование подхода поверхностного моделирования. Однако при создании таких элементов, как технологические отверстия и фаски, была обнаружена проблема в виде невозможности копирования паттерна их расположения в программном обеспечении для работы с полигональной сеткой, из-за чего было принято решение создать данные элементы при помощи булевой операции вычитания твердых тел (рис. 4).

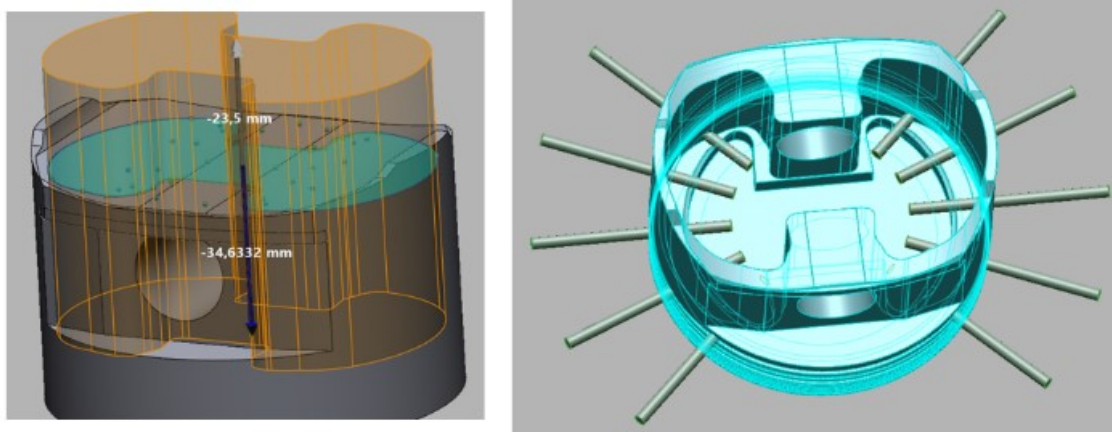


Рис. 4. Процесс создания твердотельной модель цилиндра

Выводы. В результате работы были созданы 3D-модели поршня и цилиндра (рис. 5) вертолетного двигателя, которые можно использовать для производственных нужд.

Были выявлены основные сложности в процессе реверс-инжиниринга. К ним относятся воссоздание участков, недоступных для сканера, и воссоздание сложной геометрии неровных поверхностей. Эти сложности обусловлены ограничениями технологии 3D-сканирования. Они могут приводить к отклонениям полученной геометрии от оригинальной.

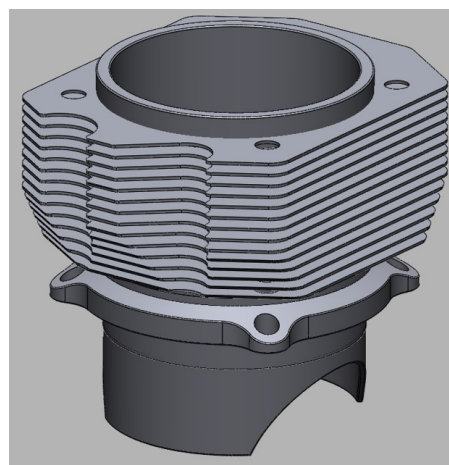


Рис. 5. Твердотельная модель цилиндра

Список литературы

1. Герасимова, А. А. Инжиниринг оборудования и технологий обработки металлов давлением : учебник / Герасимова А. А. – Старый Оскол : ТНТ, 2022. – 260 с. - ISBN 978-5-94178-747-0.
2. Salvi, J. Pattern codification strategies in structured light systems / Salvi J., Pages J., Battie J. // Pattern Recognition. — 2004. — Vol. 37(4). — P. 827–849.
3. Скворцов, А. В. Триангуляция Делоне и её применение / Скворцов А. В. — Томск : Изд-во Том. ун-та, 2002. — 128 с. — ISBN 5-7511-1501-5.
4. Caspi, D. Range imaging with adaptive color structured light / Caspi D., Kiryati N., Shamir J. // Pattern Anal. Mach. Intell. — 1998. — Vol. 20(5) — P. 470–480.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ

А.Н. Вишняков¹, В.Р. Ткаченко², Л.Н. Пичугова³

¹ФГБОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299053, Россия, 2012vian04@gmail.com

²ФГБОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299053, Россия zxcveronika@mail.ru

³ФГБОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299053, Россия, kebpf2015@mail.ru

Аннотация. Атомные электростанции (АЭС) играют важную роль в обеспечении энергетической безопасности и независимости стран. Важнейший аспект работы АЭС – это надежность и безопасность их конструкций, особенно трубопроводов, которые переносят различные жидкости и газы при высоких температурах и давлениях. В данной статье мы рассмотрим основные конструкционные материалы, с учетом коэффициента теплового расширения и теплопроводности, используемые для трубопроводов на АЭС.

Ключевые слова: Конструкционные материалы, трубопроводы АЭС, коррозионная стойкость, прочность, нержавеющие стали, легированные сплавы.

RATIONALE FOR THE USE OF STRUCTURAL MATERIALS TAKING INTO ACCOUNT THE COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION AND THERMAL CONDUCTIVITY FOR PIPELINES

A.N. Vishnyakov¹, V.R. Tkachenko², L.N. Pichugova³

¹FSBEI HE Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, 2012vian04@gmail.com

²FSBEI HE Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, zxcveronika@mail.ru

³FSBEI HE Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, kebpf2015@mail.ru

Annotation. Nuclear power plants (NPPs) play an important role in ensuring energy security and independence of countries. The most important aspect of NPP operation is the reliability and safety of their structures, especially pipelines that carry various liquids and gases at high temperatures and pressures. In this article we will consider the main structural materials, taking into account the coefficient of thermal expansion and thermal conductivity, used for pipelines at nuclear power plants.

Keywords: Structural materials, NPP pipelines, corrosion resistance, strength, stainless steels, alloyed alloys.

Введение

Для обеспечения взаимодействия отдельных компонентов атомной электростанции (АЭС) необходима обширная сеть трубопроводов, включающая как основные магистрали, так и многочисленные вспомогательные линии различной ширины и функционального назначения. Общая длина этой системы на мощных АЭС достигает несколько километров.

Трубопроводы классифицируются по их назначению, ключевым характеристикам и условиям эксплуатации:

- основные контуры: главного циркуляционного, реакторного;
- вспомогательные линии для пульпы, питания, конденсата;
- системы пара (свежего и отборного);
- дренажные каналы.

Критерии разделения также включают:

- рабочие параметры: давление, температура среды;
- типы транспортируемых сред: вода, пар, смеси воды с паром, газовые потоки;
- уровень радиоактивности и периодичность работы (постоянная/периодическая).

Практические задачи

Особое внимание уделяется трубопроводам главного циркуляционного контура из-за высокой степени радиационной нагрузки и параметров среды.

На АЭС преимущественно используются бесшовные трубы, как холоднотянутые, так и горячекатаные. Для вспомогательных систем применяют сварные конструкции. Марки стали

для труб, по которым транспортируют коррозионно-неагрессивные среды, зависят от температуры среды [1]:

- при температуре до 450°C для коррозионностойких сред – углеродистые стали марки 10 или 20;

- в диапазоне от 450°C до 570°C используются перлитные легированные стали с добавками хрома (до 2%), молибдена (до 1%) и ванадия (до 0,4%). Наиболее распространены марки сталей 12Х1МФ и 15ХМ1Ф;

- для снижения толщины стенки при значительных диаметрах трубопроводов даже ниже 450°C применяются те же легированные стали.

Примечательно, что подобный подход особенно актуален в отношении трубопровода насыщенного пара, ведущего к турбинам АЭС. Значительное распространение в атомной энергетике получили стали типа 08Х18Н10Т [1], обладающие наиболее высокой общей коррозионной стойкостью, что важно для поддержания высокой чистоты воды реакторного контура, а также при транспортировке коррозионно-агрессивных сред, например, в системах дезактивации. В современных условиях эту сталь с успехом заменяют сталью мартенситно-ферритного класса [2] 10Х9МФБ. По сравнению со сталью 12Х1МФ она имеет более высокие прочностные свойства и высокопластична. В сравнении со сталью 1Х18Н9Т она имеет следующие преимущества – не содержит никеля, экономно легирована хромом, не склонна к коррозии под напряжением, более теплопроводна, менее дорога. Единственный ее прежний недостаток – плохая свариваемость – в настоящее время преодолен. Остальные трубопроводы АЭС выполняют из сталей перлитного класса, а наименее ответственные – из простых углеродистых. Как было указано выше, для реакторного контура ранее широко использовали сталь 09Х18Н9Т. Так, для ВВЭР-440 трубопроводы главного циркуляционного контура диаметром 550 мм выполняли из стали 09Х18Н10Т, что существенно удорожало оборудование АЭС. Поэтому трубопроводы диаметром 850 мм для ВВЭР-1000 и 750-900 мм для РБМК-1000 применены штампованными из перлитной стали с плакировкой изнутри нержавеющей аустенитной сталью толщиной 5 мм. Главное назначение плакировки – защита стали от эрозии, так как при реальной скорости воды в реакторном контуре перлитная сталь в большой мере подвержена эрозии. При плакировке уменьшается поступление продуктов эрозии и коррозии в реакторную воду и возможность их осаждения на твэлах. Трубопроводы КМПЦ реактора РБМК диаметром до 300 мм были выполнены из сталей типа 08Х18Н10Т.

Стали перлитного класса имеют существенно меньший коэффициент линейного расширения, чем стали аустенитного класса (табл. 1.). Поэтому для реакторного контура предпочтительнее стали перлитного класса, тем более что с увеличением диаметра трубопровода возрастают трудности его трассировки с обеспечением самокомпенсации.

Таблица 1. Коэффициент теплового расширения и теплопроводность для сталей различных классов

Класс стали	Допустимая температура, °С	Коэффициент теплового расширения, мм/(м·К)	Теплопроводность, кДж/(м·ч·К)
Углеродистая (сталь 20)	100 – 450	0,0123 – 0,0145	184 – 146
Легированная перлитная	450 – 580	0,0133 – 0,0147	142 – 115
Мартенситно-ферритная	500 – 700	0,0121 – 0,0126	100 – 99
Аустенитная	100 – 400	0,0171 – 0,0186	50 – 78,5
	500 – 700	0,0186 – 0,0195	80,5 – 95

Все трубопроводы и особенно те, температура среды в которых выше 45°C, должны иметь тепловую изоляцию. Наиболее ответственные трубопроводы имеют металлическую обшивку: листовым алюминием или оцинкованной сталью.

Внутренний диаметр труб (м) определяется в зависимости от расхода и скорости среды [2]:

$$d_{y \text{ вн}} = 2 \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{G \cdot V}{c}} \quad (1)$$

где G – расход среды, кг/с ; V – удельный объем среды, м³/кг; c - скорость среды, для выбора которой, по опыту проектных организаций, можно ориентироваться на следующие примерные значения; для свежего пара – 45-50 м/с, для пара низкого давления – 50-70 м/с, для конденсата и питательной воды – 2-3 м/с (трубы из углеродистых сталей) и 8-12 м/с (трубы из аустенитных нержавеющей сталей), для газа и воздуха – 10-20 м/с.

Толщина стенки трубопроводов выбирается исходя из требований прочности и соответствия сортаменту выпускаемых труб, при этом предпочтение отдаётся наиболее подходящим по размеру вариантам, подвергаемым дополнительным испытаниям на прочностные характеристики.

Расходы насыщенного пара для турбин АЭС настолько значительны, что даже оптимальный промышленный диаметр труб требует использования двух параллельных линий (ниток) в системах ВВЭР-440 и до четырех ниток – для станций мощностью 1000 МВт и выше.

Крепление всех трубопроводов к несущим конструкциям осуществляется с учётом их массы, защиты от вибрации и обеспечения амортизации температурных расширений.

Правильно спроектированные и установленные опоры и подвески не только удерживают вес трубопровода, предотвращая провисание и повреждения, но и компенсируют температурные расширения, которые возникают в процессе работы. Выбор типа опоры зависит от диаметра трубы, материала, давления рабочей среды и других параметров. Для больших диаметров труб часто используются скользящие опоры, позволяющие трубе скользить по специальной поверхности. В более сложных системах применяются шариковые или роликовые опоры, обеспечивающие меньшее трение и плавное перемещение. Материалы опор также подбираются с учётом рабочих условий: коррозионной стойкости, температурных ограничений и прочности. Регулярный мониторинг состояния опор и трубопроводов является обязательным условием безопасной эксплуатации таких систем. Кроме того, при проектировании учитываются динамические нагрузки, вызванные вибрациями оборудования и пульсациями давления в трубопроводах, что требует применения специальных демпфирующих устройств. Комплексный подход к проектированию и эксплуатации гарантирует безопасность и долговечность работы всей системы.

Выводы

Конструкционные материалы трубопроводов атомных электростанций играют ключевую роль в обеспечении их надежности и безопасности. Эти материалы должны обладать высокой прочностью, коррозионной стойкостью и способностью выдерживать экстремальные температуры и давления, которые характерны для работы в ядерной энергетике. Чаще всего используются нержавеющие стали и специальные легированные сплавы, которые обеспечивают долговечность и устойчивость к радиоактивной среде. Анализ таких материалов позволяет выявить их физико-химические свойства, такие как устойчивость к окислению и сплошностям, что особенно важно при эксплуатации трубопроводов, задействованных в системах охлаждения и отведения тепла. Инженеры и ученые постоянно ведут исследования, направленные на разработку новых композитных материалов, способствующих лучшей изоляции и минимизации потерь энергии.

Соблюдение международных, национальных стандартов и норм при выборе и испытании конструкционных материалов является важным этапом на пути к повышению безопасности атомных электростанций. В конечном счете, оптимизация выбора материалов и технологий их обработки способствует минимизации рисков, связанных с эксплуатацией трубопроводной системы в условиях ядерной энергетики.

Список литературы

1. Конструкционные материалы ядерных реакторов : учебник для вузов / Н. М. Бескорвайный, Б. А. Калинин, П. А. Платонов, И. И. Чернов. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 704 с.
2. Озеров, В. Б. Оптимизация выбора конструкционных материалов для трубопроводов АЭС с учетом изменения их прочности / В. Б. Озеров, Л. В. Сергеева // Вестник машиностроения. – 2015. – № 11. – С. 62.

УДК 004.94

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ТРЁХМЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

А.Ю. Бут¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299053, Россия, aybut@sevsu.ru

Аннотация. Работа посвящена обзору текущих возможностей применения технологий искусственного интеллекта в различных областях трёхмерного моделирования. Приведен общий подход, реализуемый в машинных алгоритмах для создания таких моделей. Рассмотрены наиболее активные в настоящий момент области использования 3D-моделирования на основе искусственного интеллекта. Выделены ключевые направления и механизмы влияния ИИ на базовые процессы в указанных областях, показана роль новых технологий в их оптимизации. Показаны преобладающие тенденции, а также перспективы использования ИИ в моделировании.

Ключевые слова: искусственный интеллект (ИИ), моделирование, анализ, САПР, 3D, генеративный дизайн, инженерия, строительство, медиа, медицина, аддитивное производство.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THREE-DIMENSIONAL MODELING

A.Yu. But¹

¹FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299053, Russia, aybut@sevsu.ru

Abstract. The paper is devoted to the review of current possibilities of using artificial intelligence technologies in various areas of three-dimensional modeling. A general approach implemented in machine algorithms for creating such models is presented. The most active areas of using 3D modeling based on artificial intelligence are considered at the moment. The key areas and mechanisms of influence of AI on basic processes in these areas are highlighted, the role of new technologies in their optimization is shown. The prevailing trends are shown, as well as the prospects for using AI in modeling.

Keywords: artificial intelligence (AI), modeling, analysis, CAD, 3D, generative design, engineering, construction, media, medicine, additive manufacturing.

Введение.

В последние годы всё более широкое распространение получают технологии, использующие машинные алгоритмы вычислений и принятия решений без участия пользователя. В общем виде они известны под термином «искусственный интеллект» (далее – ИИ). Они находят применение в различных областях человеческой деятельности. А такие термины, как «машинное обучение», «глубокое обучение» и «большие данные» становятся привычными в разных отраслях.

В контексте трехмерного моделирования ИИ на данный момент наиболее часто используется в так называемой арт-индустрии: создание моделей для видеоигр, компьютерной анимации, в приложениях дополненной и виртуальной реальности. Между тем, в период зарождения и на начальном этапе своего развития [1, 2] трехмерное моделирование служило именно инженерным целям и только потом нашло применение в художественных областях.

Сфера создания 3D-моделей является одним из самых интересных и сложных секторов искусственного интеллекта. В то время как, например, фотографическое направление имеет бесконечную базу материалов, на которых ИИ может «тренироваться» и стать способным воспроизводить любой объект с правдоподобием, в 3D-мире ситуация более сложная, а результаты по-прежнему ограничены. Однако существует несколько подходов к 3D, поддерживаемых ИИ, каждый из которых достигает разных уровней качества [3].

Целью данной работы является обзор текущих возможностей и тенденций использования ИИ в различных областях моделирования.

Основная часть.

В основе использования ИИ для моделирования лежит очевидный факт: 3D-модели можно разбить на код. С другой стороны, например, ChatGPT и другие языковые модели могут писать код. Таким образом, приложения ИИ способны генерировать 3D-модели. Причем, результаты на данный момент ограничиваются лишь совершенством ИИ моделей и способами их взаимодействия с человеком.

1. Как ИИ подходит к 3D-моделированию.

Процесс 3D-моделирования с использованием ИИ в самом общем виде можно разделить на несколько ключевых этапов.

Сбор данных: сбор большого количества изображений, видео или другой перцептивной информации в качестве входных данных.

Предварительная обработка данных: предварительная обработка собранных данных, включая шумоподавление и выравнивание изображений.

Извлечение признаков: использование алгоритмов компьютерного зрения для извлечения признаков из данных, таких как края, текстуры и т. д.

Создание модели: использование алгоритмов машинного обучения или глубокого обучения для сопоставления извлеченных признаков с 3D-пространством и создания 3D-моделей.

Оптимизация модели: оптимизация и уточнение созданных моделей для повышения их качества и полноты.

Вывод результатов: экспорт созданных 3D-моделей в визуальные форматы файлов, такие как OBJ, FBX и т. д. [4].

2. Генеративный дизайн

Наверное, первыми шагами в применения машинных алгоритмов в инженерном моделировании можно считать технологии генеративного или ассистивного дизайна (**Generative/Assistive Design**), которые начали внедрять ведущие мировые производители САПР в середине прошлого десятилетия (рис. 1). Например, модуль Generative Design в облачной САПР Fusion 360 от компании Autodesk [5] или решения ряда Generative Design компании 3DS, изначально реализованные в рамках облачной платформы 3DS Experience [6].



а



б

Рис. 1. Примеры генеративного дизайна: а – 3DS Experience Platform [6]; б – Autodesk Fusion 360 [7]

Эти вычислительные модели ещё не были полностью «самостоятельными», но уже имели возможности проектирования и трехмерного моделирования в фоновом режиме – без непосредственного участия пользователя.

В подобных приложениях система по заданным параметрам производит моделирование и расчёт нескольких возможных вариантов конструкции и затем предлагает их на выбор пользователя. Поддерживается быстрое внесение изменений в дизайн и оценка их результатов/влияния в режиме реального времени. При этом формы, предлагаемые программой, часто имеют футуристичный вид и вряд ли могли бы быть представлены инженерами при классическом «ручном» проектировании. Такой подход существенно

снижает затраты ресурсов (прежде всего трудовых, временных и, как следствие, финансовых), стимулирует креативность, при умелом использовании повышает эстетические качества объекта и упрощает подбор оптимального варианта.

Цифровые технологии, такие как моделирование, чаще всего используются инженерами для понимания и снижения рисков, присущих промышленным проектам, управлению весом, влиянию логистики (т. е. для получения контроля над тем, что может быть). Однако генеративный дизайн не ограничивается только соображениями эффективности. Одним из его направлений можно выделить, например, **органический дизайн**, который предполагает детальное изучение форм живой природы и реализацию их в трехмерных моделях. Он тесно взаимосвязан с понятием **устойчивого дизайна**, базирующегося на природных процессах. В последнее десятилетие это направление активно используется дизайнерами разных отраслей: архитектура, текстильное производство, биомедицинские технологии, автомобильная, аэрокосмическая промышленности и многих других. Для дизайнеров цель состоит в том, чтобы выполнять моделирование своих творческих сценариев как открытие нового, исследовать возможности творческим способом, обдумывать и оценивать актуальность своей работы [8].

Генеративный дизайн ИИ. Следующим этапом генеративного дизайна стало создание модулей и приложений, использующих технологию Generative design AI. Это связано непосредственно с разработкой и стремительным развитием моделей ИИ, произошедшим за последние три года [9].

Присущая генеративному ИИ случайность может не очень хорошо подходить для инженерии. В этой области модели должны выполнять функцию и быть точно детализированными, чтобы их можно было изготовить. В таких условиях концепция текстового описания задачи и получения работающей конструкции является менее эффективной [10]. Однако ИИ способен улучшить некоторые основные направления моделирования.

В целом, этот подход имеет два основных преимущества. Первое - **самостоятельность**: проектировщики могут указать определенные параметры, а система ИИ соответствующим образом разрабатывает проект. Например, при проектировании подъемной машины вы можете указать такие характеристики, как размер и ожидаемые уровни напряжений, и программное обеспечение создаст проект, соответствующий этим параметрам. Второе – **автоматизация**: проектировщики могут создать базовую модель и изменять ее в различных версиях с помощью подсказок на естественном языке, используя удобный пользовательский интерфейс для неподкованных в технологиях людей и одновременно обеспечивая массовую настройку.

Классические игроки рынка – крупные производители САПР – уже предлагают программные решения с акцентом на ИИ. В частности, Autodesk имеет расширение Generative design AI для того же Fusion [9]. 3DS также внедряет технологии ИИ: на данный момент кроме облачных платформ интегрирует их в известную САПР CATIA (Generative Design Engineering) [11]. Ansys предлагает свою AI-Augmented Simulation Technology: эта облачная платформа генеративного искусственного интеллекта использует результаты моделирования для надежной оценки производительности новой конструкции в течение нескольких минут [12].

Однако на этом этапе в игру включилось множество более мелких проектов, имеющих доступ к моделям ИИ. Например, программное обеспечение Leo AI: чат-бот – так называемый ассистент инженерного дизайна, превращает текст и эскизы в 3D-модели, даёт технические ответы и предоставляет доступ к более чем одному миллиону ресурсов [13].

В настоящий момент можно с уверенностью сказать, что генеративный дизайн преобразует индустрию проектирования и производства, автоматизируя создание оптимизированных инновационных проектов продуктов, которые соответствуют определенным требованиям к производительности, материалам и производству. Такой подход ускоряет разработку продуктов, способствует устойчивости за счет эффективности

материалов и энергии и обеспечивает возможность применения в различных секторах, включая автомобилестроение, аэрокосмическую промышленность и производство потребительских товаров [8].

3. 3D-инжиниринг

Под этим термином принято понимать инженерную деятельность на уровне крупных проектов, включающих направления из разных областей науки и технологий. Имея доступ к огромным наборам данных существующих проектов, алгоритмы ИИ могут анализировать шаблоны и тенденции и определять новые проектные решения, которые являются как эффективными, так и действенными. Например, ИИ может помочь инженерам оптимизировать проекты для повышения энергоэффективности, сократить отходы материалов и даже предсказать отказы машин до их возникновения. Таким образом, они могут сэкономить время и деньги, производя более качественные конечные продукты [14].

Архитектура, инженерия, строительство и эксплуатация. Одной из областей, где ИИ уже делает значительные успехи в 3D-инжиниринге, является сфера строительства. Строительные проекты, как правило, сложны и требуют много времени, с множеством взаимосвязанных задач, которые необходимо выполнять одновременно. ИИ может помочь автоматизировать многие из этих задач, включая планирование участка работ, составление графиков и распределение ресурсов. Это помогает сократить расходы и повысить эффективность, что упрощает завершение строительных проектов в срок и в рамках бюджета (иллюстрация – рис. 2).

Здесь генеративный дизайн ИИ позволяет создавать инновационные, эффективные и устойчивые проекты за счет оптимизации архитектурных концепций, городских планировок, структурной целостности и энергопотребления с помощью передовых вычислительных методов. Он оптимизирует строительные процессы и улучшает долгосрочные строительные операции, преобразуя методы проектирования, строительства и управления объектами с повышением эффективности и устойчивости [7].



Рис. 2. Иллюстрация – пример генеративного дизайна в архитектурной инженерии: реализованный проект стадиона «Feyenoord» в Роттердаме [15]

ИИ оказывает существенное влияние на сферу строительного проектирования. Он становится следующим логическим шагом в эволюции управления объектами. Технологии 3D-сканирования в сочетании с ИИ могут предлагать наиболее эффективные и экономичные стратегии реконструкции. Это важное преимущество в такой конкурентной отрасли.

Технологии ИИ и 3D преобразуют проектирование освещения, предоставляя более персонализированные, эстетичные и энергоэффективные решения.

3D-модели на основе ИИ могут играть ключевую роль на этапе эксплуатации зданий. Информация из облака точек в 3D-модели, представляющая собой богатое и точное представление об активе здания, позволяет архитекторам, инженерам и проектировщикам планировать и изменять все системы, включая электричество и сантехнику, а также помогает управлять инженерными сетями и планировать профилактическое обслуживание. Главным преимуществом служб BIM, усиленных ИИ, является прозрачность информации: участники проекта могут совместно использовать 3D-модель, при этом изменения на любом этапе строительства обновляются в режиме реального времени, хранятся в облаке и становятся доступными всем заинтересованным лицам через модель. Аналитика ИИ, применяемая к 3D-моделям зданий, может прогнозировать долгосрочное состояние и производительность здания, что позволяет принимать более обоснованные решения при управлении проектами [16].

ИИ также может помочь создать потрясающие визуализации 3D-проектов, позволяя дизайнерам и инженерам доносить сложные идеи и концепции до клиентов и инвесторов. Например, используя инструменты ИИ, такие как DALL-E [17], которые могут генерировать фотореалистичные изображения объектов на основе письменных описаний, дизайнеры могут создавать высокореалистичные визуализации своих проектов, которые точно передают их видение заинтересованным сторонам [14].

4. Медиа и развлечения

Технология ИИ, в частности, генеративный дизайн, в медиа и индустрии развлечений улучшает создание контента, позволяя автоматически генерировать сложные визуальные элементы, такие как шаблоны, среды и персонажи, на основе predetermined критериев. Этот подход оптимизирует производственные процессы для анимации, игр и виртуальной реальности, а также способствует творчеству и кастомизации, что приводит к более вовлекающему и персонализированному пользовательскому опыту. Специалисты в данной области признают, что генерация моделей при помощи ИИ фактически трансформировала 3D-пайплайн. Это проявляется в нескольких аспектах.

Генератор текстур на основе ИИ – это передовая технология, которая использует алгоритмы искусственного интеллекта при создании высокореалистичных текстур для использования в различных цифровых мультимедийных приложениях. Этот инновационный инструмент произвел революцию в создании текстур, автоматизировав процесс генерации, сократив время и усилия, необходимые художникам и дизайнерам. Генератор текстур ИИ использует методы глубокого обучения для анализа больших объемов данных изображений и определения узоров, текстур и характерных деталей различных материалов, таких как дерево, металл, ткань и камень. Затем он синтезирует эти результаты для создания гладких текстур высокого разрешения, которые очень похожи на их реальные аналоги. Это мощный инструмент для профессионалов, работающих в таких областях, как разработка игр, анимация, виртуальная реальность и графический дизайн [3, 18].

Генерация 3D-среды из видео: Гауссов Сплэттинг (3D Gaussian Splatting). Эта технология позволяет создавать сложные 3D-модели и среды, дополненные физическим поведением, используя методы, основанные на распределении Гаусса. Принцип основан на облаке точек, восстановленных искусственным интеллектом из анализа видеок кадров. Каждая точка связана с гауссовыми характеристиками, обеспечивая реалистичный фотографический эффект, который позволяет двигаться в трех измерениях, почти как однородная 3D-модель (рис. 3). Очевидно, что это не модель в полном смысле слова, и у этой техники есть свои ограничения [3].

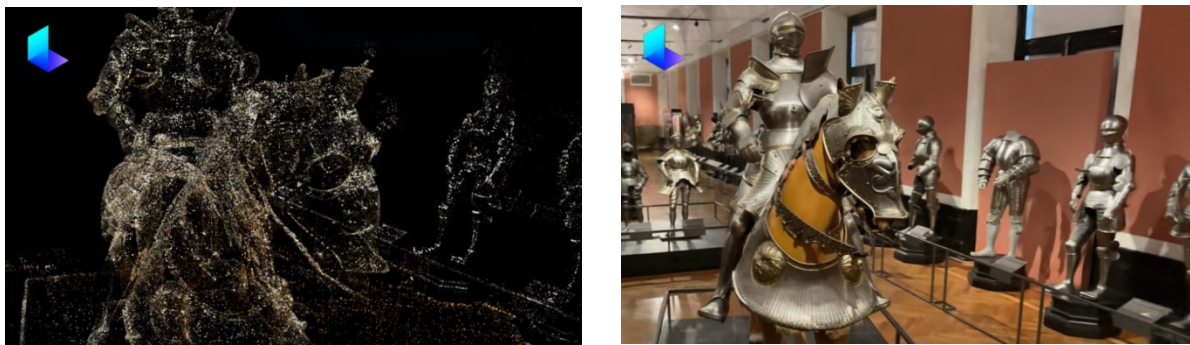


Рис. 3. Пример использования Гауссова Сплэттинга для генерации 3D-среды из видео [3]

Генерация 3D-моделей из 2D-изображений. Хотя создание моделей из статических изображений может казаться шагом назад по сравнению с моделями из вышеупомянутых видео, на самом деле эта область пытается создавать настоящую редактируемую модель: технология задействует методы глубокого обучения для создания трехмерных представлений из двухмерных изображений. Используя крупномасштабные наборы данных и мощные нейронные сети, модели генераторов ИИ могут точно реконструировать геометрию, текстуру и глубину объекта или сцены, изображенных на статическом изображении. Всё это выполняется практически без ручного вмешательства и не требует от пользователя опыта работы со сложным программным обеспечением для моделирования [3, 18].

Генерация моделей 3D-аватара. Специфическим направлением в мире генераторов ИИ является генерация тел и лиц. Виртуальные среды и игры требуют множества моделей 3D-аватаров. Благодаря передовой технологии распознавания лиц сфера виртуальных аватаров претерпела революцию. Генераторы 3D-аватара ИИ способны точно воспроизводить выражения лица, жесты и даже голосовые нюансы, создавая реалистичных и привлекательных цифровых персонажей. Пользователи могут легко управлять внешним видом аватара, включая черты лица, стили одежды и настройки фона, что делает его пригодным для широкого спектра приложений. Аватары, созданные ИИ, предлагают лучшие возможности взаимодействия в виртуальных средах с помощью дополненной или виртуальной реальности [3].

Распознавание движения с помощью ИИ в применении к 3D-моделям. Развитие технологии распознавания движения ИИ имеет огромный потенциал в различных секторах и приложениях. Эта технология позволяет компьютерам точно определять и интерпретировать движения человека, открывая возможности для игрового опыта, улучшенной виртуальной реальности и интерактивной конфигурации продуктов в электронной коммерции. Например, технология захвата движения на основе ИИ от участника NVIDIA Inception Move.ai объединяет библиотеку реальных движений с алгоритмами глубокого обучения для создания реалистичных движений и языка тела для 3D-персонажей. ИИ автоматически манипулирует лицом, глазами, ртом, языком и движением головы в соответствии с выбранным вами эмоциональным диапазоном и настраиваемым уровнем интенсивности.

3D-анимацию также можно создавать из аудио, путём сопоставления характеристики лица с любой закадровой дорожкой. После загрузки звука в приложение он подается в предварительно обученную глубокую нейронную сеть, выходные данные которой управляют 3D-вершинами сетки персонажа для создания лицевой анимации в реальном времени. [3, 18].

Генерация текста в 3D-модели. Самая сложная и продвинутая область, часто экспериментальная, где используются ИИ для генерации – моделирование из описательного текста. Эта передовая технология может произвести революцию в области компьютерной графики и дизайна. Интерпретируя текстовые входные данные и понимая контекст, такой тип инструмента может генерировать сложные 3D-модели с интересными деталями и реализмом. Его способность понимать нюансы языка позволяет манипулировать размерами, текстурами, освещением и другими сложными аспектами сгенерированных моделей, чтобы

согласовать их с предоставленным текстом. Эта технология направлена на ускорение процессов прототипирования, улучшение возможностей визуального повествования и открытие новой сферы возможностей в области иммерсивных впечатлений, значительно сокращая традиционно требуемые часы ручного труда для создания трехмерных ресурсов [3].

Разговорный ИИ совместно с генеративным ИИ. Некоторые приложения, как, например, *Convaï* используют разговорный и генеративный ИИ вместе, чтобы оживить аватаров в играх и виртуальных мирах. Их платформа предоставляет пользователям инструменты для создания персонажей с предысторией, голосом и определенными областями знаний. Пользователи могут легко настраивать персонажей и общаться с ними на основе ИИ в виртуальных мирах через микрофонный вход. Настройка не требует никакого опыта программирования [18].

5. Медицинские и биологические науки

3D-моделирование на основе ИИ может использоваться в обработке медицинских изображений и биологических исследованиях путем анализа данных медицинских изображений и биологических данных для создания моделей органов и моделей молекулярной структуры. Это может помочь врачам и ученым лучше понять механизмы заболеваний и поддерживать диагностику и лечение [4]. В нынешнюю эпоху быстрого технологического прогресса интеграция ИИ с биотехнологическими достижениями стала обязательной, особенно в биотехнологическом и фармацевтическом секторах, где ученые все больше полагаются на ИИ для оптимизации процессов и совершения новых прорывов.

В процессах тестирования и разработки лекарств 3D-клеточные культуры предлагают более точное представление *сред in vivo*, в сравнении с 2D-клеточными, повышая точность тестирования лекарств и предлагая более реалистичные сценарии взаимодействия клеток. Благодаря точности и послойному нанесению клеточных материалов 3D-биопечать позволила ученым создавать структуры тканей, которые точно имитируют нативные ткани с точки зрения архитектуры, функции и физиологии. Интеграция ИИ в этот процесс сыграла важную роль. Анализируя огромные объемы данных, алгоритмы ИИ могут предсказывать, какие клеточные структуры с наибольшей вероятностью будут процветать в 3D-средах, как клетки в 3D-модели могут реагировать на различные методы лечения, помогая исследователям сузить круг препаратов для изучения. Это не только упрощает производство таких моделей, но и сокращает затраты и время.

Глубокое обучение, подмножество ИИ, стало переломным моментом. Обучая нейронные сети на тысячах изображений, система может распознавать и классифицировать клеточные структуры в трехмерном пространстве. Обработывая огромные объемы данных, эти сети могут различать закономерности, которые часто слишком сложны для распознавания человеческим глазом.

Применение в клеточной и генной терапии. Улучшенные ИИ 3D-модели предоставляют:

- персонализированные планы лечения: создавая специфичные для пациента 3D-модели и используя ИИ для анализа, можно разрабатывать более персонализированные методы лечения генетических заболеваний. Модель помогает визуализировать, как клетки пациента могут реагировать на генную терапию до фактического лечения;
- оптимизированные векторные конструкции: для эффективности генной терапии векторы (средства доставки генного материала в клетки) должны быть эффективными. ИИ может анализировать 3D-клеточные взаимодействия, чтобы помочь разработать более эффективные векторы.

Интеграция ИИ в 3D-моделирование для клеточной и генной терапии и разработки лекарств – это не просто появление нового инструмента или метода. Это означает глубокую трансформацию в методологиях, подходах и перспективах, окружающих биомедицину. Этот сдвиг характеризуется не только повышенной эффективностью и точностью, но и обогащенным пониманием сложных биологических явлений [19].

3D-биопечать. В последние десятилетия 3D-биопечать привлекла значительное внимание исследователей из-за ее способности манипулировать биоматериалами и клетками

для точного создания сложных структур. Однако из-за технологических и стоимостных ограничений клиническое внедрение продуктов 3D-биопечати с лабораторного стола в стационарную практику затруднялось проблемами с персонализацией дизайна и масштабированием производства, в частности, из-за многочисленных ручных операций. В последнее время новые приложения на базе технологий ИИ значительно повысили производительность 3D-биопечати.

Технология ИИ, в частности, методологии глубокого обучения, представляет собой достаточно эффективные решения в этой области. В процессе 3D-биопечати зондирование на основе ИИ дает комплексные результаты, охватывающие такие аспекты, как проектирование и изготовление печатных структур, а также биохимические и морфологические функции.

Технология ИИ служит средством устранения противоречия «масштаб-глубина-точность», обеспечивая точную визуализацию объектов в различных масштабах. В области крупномасштабных объектов, которые встречаются в медицинских методах визуализации, таких как компьютерная томография (КТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ), сверхразрешение и шумоподавление на основе ИИ могут повысить разрешение изображения. Напротив, в области мелкомасштабных объектов технология ИИ облегчает извлечение трехмерной пространственной информации.

Технология ИИ способна значительно увеличить изобилие информации и достичь точного и надежного обнаружения сложных объектов. Она может извлекать сложные признаки и распознавать сложные шаблоны, чтобы сократить и заменить ручные операции, а также может распознавать шаблоны, которые сложно изучить людям из физических явлений, тем самым упрощая процесс восприятия и ручные операции и сводя к минимуму зависимость от дорогостоящего оборудования и реагентов. Все это служит для смягчения субъективных ошибок, рисков загрязнения и затрат, одновременно повышая повторяемость, безопасность и экономичность. Более того, автоматические процессы зондирования способствуют повышению скорости и масштабируемости [20].

6. Искусственный интеллект в САПР для оптимизации аддитивного производства

В этой области использования ИИ также выделяются несколько направлений.

Проектирование изделий. На начальных этапах ИИ оценивает жизнеспособность аддитивного производства для конкретных проектов, обеспечивая оптимальную эффективность. Далее одним из ключевых применений ИИ в 3D-печати является оптимизация дизайна и топологии, реализуемая, в частности, путём рассмотренного выше генеративного дизайна. Инструменты на основе ИИ позволяют создавать сложные геометрии, которые ранее было невозможно или трудно достичь традиционными методами. Эти инструменты привлекают ИИ для определения оптимального использования материала и структурной целостности, что приводит к получению легких, но прочных компонентов (рис. 4) [21]. Этот подход также значительно упрощает процесс прототипирования изделий.

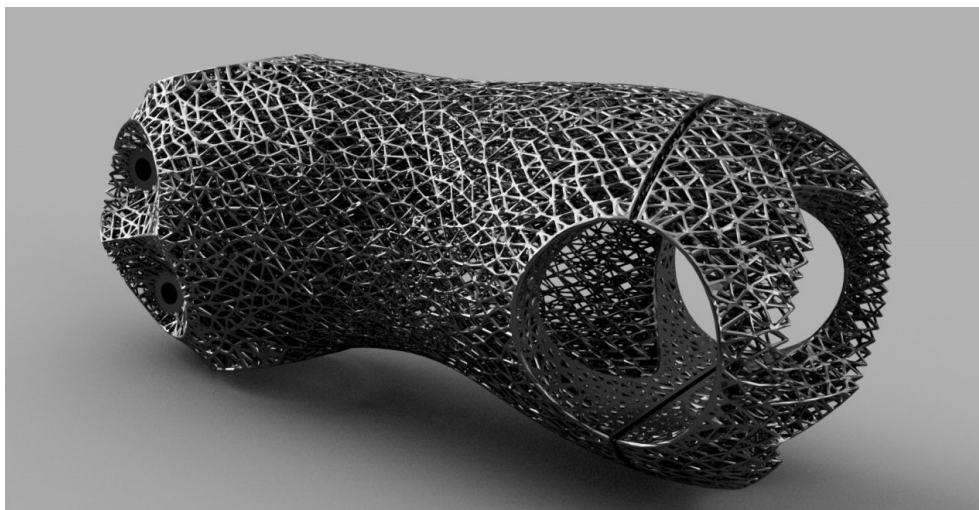


Рис. 4. Пример ИИ генеративного дизайна в аддитивном производстве [21]

Обеспечение качества и обнаружение дефектов. В контроле качества в аддитивном производстве ИИ интегрируется с системами машинного зрения для мониторинга производства в реальном времени. Он отлично выявляет даже самые мелкие дефекты, невидимые невооруженным глазом. ИИ обеспечивает точный и проактивный мониторинг качества, сводя к минимуму вероятность появления потенциально дефектных продуктов. Более того, ИИ оказывает аналогичное влияние на контроль качества после производства, быстро обнаруживая и устраняя проблемы по мере завершения производства продуктов.

Проактивное управление дефектами. Обеспечивая контроль использования материалов в реальном времени, ИИ значительно минимизирует отходы материалов. Кроме того, ИИ обеспечивает автономное принятие решений в рамках самого производственного процесса. Этот проактивный механизм управления снижает процент отбраковки дефектных деталей, оптимизируя эффективность производства.

Прогностическое обслуживание – процесс использования анализа данных и технологий в качестве системы раннего оповещения о проблемах на производстве. Этот подход революционизирует методы обслуживания, производительность, управление запасами и методы устранения неполадок. Развертывание аддитивного производства с применением ИИ поддерживает эти достижения, предлагая производство промышленных деталей, напечатанных на 3D-принтере, по запросу. Это позволяет повысить эффективность обслуживания и управления запасами за счет стратегий доставки «точно в срок». ИИ дополняет такие усилия, запуская производство при обнаружении проблем, анализируя жизненные циклы оборудования и прогнозируя требования к обслуживанию на основе исторических данных [22].

7. Сохранение исторического и культурного наследия

3D-моделирование ИИ может использоваться для сохранения и реконструкции исторического и культурного наследия путем анализа исторических документов, мест и данных об археологических объектах с целью создания 3D-моделей исторических зданий и артефактов. Следующим этапом здесь является использование приложений виртуальной и дополненной реальности, разрабатываемых, опять же, с участием ИИ, для изучения истории посредством интерактивного взаимодействия человека с виртуальной исторической средой. Это может помочь специалистам по реставрации, сотрудникам музеев и исследователям в лучшей защите и сохранении исторического и культурного наследия [4].

Заключение

В настоящей работе рассмотрены лишь некоторые наиболее активные сейчас области использования 3D-моделирования на основе ИИ. Очевидно, что по мере дальнейшего развития технологий ИИ применение 3D-моделирования ИИ будет становиться все более обширным. Речь идет не о преимуществах или недостатках этих технологий, а о растущем глобальном их влиянии на жизнь нашей цивилизации. Например, для написания данной статьи потребовалось несколько дней сбора, анализа и оформления информации, а ИИ даже на текущем этапе своего развития мог бы сделать это за считанные минуты.

Список литературы

1. The History and Future of 3D CAD Design & Modeling // Cad Crowd : [сайт]. — URL: <https://www.cadcrowd.com/blog/the-history-and-future-of-3d-cad-design-modeling/> (дата обращения: 05.02.2025).
2. Evolution of 3D Modeling In Architecture and Design: a 30-year Retrospective // ArchiCGI. Architectural Rendering Company : [сайт]. — URL: <https://archicgi.com/cgi-news/evolution-of-3d-modeling-retrospective/> (дата обращения: 05.02.2025).
3. AI - Artificial Intelligence and 3D Modeling // Digital 3D solution for web AR VR XR - Shin Software : [сайт]. — URL: <https://shinsoftware.com/en/blog/artificial-intelligence-ai-and-3d-modeling/> (дата обращения: 05.02.2025).
4. Использование ИИ для создания 3d-моделей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://apptask.ru/blog/ispolzovanie-ii-dlia-sozdaniia-3d-modelei> (дата обращения: 05.02.2025).
5. Autodesk: кое-что о реальном состоянии генеративного дизайна [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=21593 (дата обращения: 05.02.2025).
6. Generative Design Engineering // Dassault Systèmes : [сайт]. — URL: <https://events.3ds.com/generative-design-engineering> (дата обращения: 05.02.2025).
7. Idei.club: Autodesk generative design [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://en.idei.club/36328-autodesk-generative-design.html> (дата обращения: 05.02.2025).

8. Design for life // Dassault Systèmes : [сайт]. — URL: <https://www.3ds.com/insights/corporate-reports/design-life> (дата обращения: 05.02.2025).
9. Генеративный дизайн в Autodesk Fusion: революция в дизайне с помощью ИИ [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://cad.kz/about/news/generativnyy-dizayn-v-autodesk-fusion-revolutsiya-v-dizayne-s-pomoshchyu-ii-/](https://cad.kz/about/news/generativnyy-dizayn-v-autodesk-fusion-revolutsiya-v-dizayne-s-pomoshchyu-ii/) (дата обращения: 05.02.2025).
10. Новые технологии в 3D моделировании [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sky.pro/wiki/digital-art/novye-tehnologii-v-3d-modelirovani/> (дата обращения: 05.02.2025).
11. AI-Driven Generative Experiences // Dassault Systèmes : [сайт]. — URL: <https://www.3ds.com/products/catia/ai-driven-generative-experiences> (дата обращения: 05.02.2025).
12. Ansys 2024 R1: Новые возможности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cae-expert.ru/release/ansys-2024-r1-novye-vozmozhnosti> (дата обращения: 05.02.2025).
13. The world's first engineering design copilot // Leo AI - Innovating Engineering Design with AI Technology : [сайт]. — URL: <https://www.getleo.ai/> (дата обращения: 05.02.2025).
14. The Rise of AI in 3D Engineering: A Game-Changer // WSDA – Walter Shields Data Academy : [сайт]. — URL: <https://wsdlearning.ai/wsd-news/> (дата обращения: 05.02.2025).
15. ABCD Blog: OMA utilise la puissance de la conception générative pour des défis de conception complexes, notamment pour le stade Feyenoord de Rotterdam [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.abcdblog.fr/oma-utilise-la-puissance-de-la-conception-generative-pour-des-defis-de-conception-complexes-notamment-pour-le-stade-feyenoord-de-rotterdam/> (дата обращения: 05.02.2025).
16. 3D-Modeling and Artificial Intelligence Trends in BIM 2024 // AMRAX : [сайт]. — URL: <https://amrax.ai/blog/3d-modeling-and-artificial-intelligence-trends-in-bim-2024/> (дата обращения: 05.02.2025).
17. DALL·E 3 // OpenAI : [сайт]. — URL: <https://openai.com/index/dall-e-3/> (дата обращения: 05.02.2025).
18. A new way to create realistic 3D shapes using generative AI [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://news.mit.edu/2024/creating-realistic-3d-shapes-using-generative-ai-1204> (дата обращения: 05.02.2025).
19. Revolutionising Biomedicine: How AI Techniques and Applications enhance 3D Modeling in Cell & Gene Therapy and Drug Development // Oxford Global : [сайт]. — URL: <https://oxfordglobal.com/nextgen-biomed/resources/revolutionising-biomedicine-how-ai-techniques-and-applications-enhance-3d-modeling-in-cell-gene-therapy-and-drug-development> (дата обращения: 05.02.2025).
20. AI-driven 3D bioprinting for regenerative medicine: From bench to bedside / Zhenrui Zhang, Xianhao Zhou, Yongcong Fang, Zhuo Xiong, Ting Zhang // Bioactive Materials. — 2025. — Volume 45, March. — P. 201-230. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452199X2400505X> (дата обращения: 05.02.2025).
21. Искусственный интеллект и аддитивные технологии: перспективы взаимодействия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://blog.iqb.ru/ai-3d-printing-intersection/> (дата обращения: 05.02.2025).
22. Объединение аддитивного производства и искусственного интеллекта: Предвидение будущего, которое ближе, чем мы думаем [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://industry3d.ru/obedinenie-additivnogo-proizvodstva-i-iskusstvennogo-intellekta-predvidenie-buduschego-kotoroe-blizhe-chem-my-dumaem/> (дата обращения: 05.02.2025).

УДК 621.762

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЕ УПЛОТНЕНИЕ И ЕГО ПЕРСПЕКТИВЫ

Т.А. Перевай¹, О.В. Мухина², В.М. Кравцова³

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299001, Россия, bratsk_tanja@mail.ru

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299001, Россия, ovmyhina@mail.sevsu.ru

³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299001, Россия, kravtsova.valera18@gmail.com

Аннотация. Разработана установка ультразвукового электроконтактного уплотнения (УЭКУ) с широкими возможностями по формированию порошковых материалов различного функционального назначения. В ходе экспериментов, проведенных на специально спроектированной лабораторной установке, было установлено, что ультразвуковые колебания способствуют более равномерному распределению частиц порошка и улучшению их гомогенизации. Результаты показали значительное улучшение прочностных характеристик, а остаточная пористость материалов снижалась до 6%.

Ключевые слова: Ультразвуковое электроконтактное уплотнение, пористость, уплотняемость, гомогенизация, ультразвуковые головки, колебания, ультразвуковой преобразователь, линия продувки, наноструктурированные материалы.

ULTRASONIC ELECTROCONTACT SEAL AND ITS PROSPECTS

T.A. Perevay¹, O.V. Mukhina², V.M. Kravtsova³

¹FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299001, Russia, bratsk_tanja@mail.ru

²FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299001, Russia, ovmyhina@mail.sevsu.ru

³FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299001, Russia, kravtsova.valera18@gmail.com

Abstract. An ultrasonic electrocontact sealing unit (UECU) with extensive capabilities for the formation of powder materials for various functional purposes has been developed. In the course of experiments conducted on a specially designed laboratory installation, it was found that ultrasonic vibrations contribute to a more uniform distribution of powder particles and improve their homogenization. The results showed a significant improvement in strength characteristics, and the residual porosity of the materials decreased to 6%.

Keywords: Ultrasonic electrocontact seal, porosity, compaction, homogenization, ultrasonic heads, oscillations, Ultrasonic transducer, purging line, nanostructured Materials.

Введение

Технология электроконтактного уплотнения (ЭКУ) демонстрирует эффективность в производстве высокоплотных материалов на основе различных порошков. Однако, с учетом современных требований к материалам, необходимо расширять возможности ЭКУ, включая использование ультразвукового воздействия (УЭКУ). В предыдущих работах [1-3] был установлен факт интенсификации диффузионных процессов и межчастичное сращивание при ЭКУ порошков карбонильного железа и бронзового. Это позволяет не только повышать плотность материалов, но и управлять их пористостью, что может привести к широкому применению в таких отраслях, как автомобильная, аэрокосмическая, медицинская и электроника. В связи с возрастающей потребностью в легких, прочных и термостойких материалах технологии УЭКУ могут стать основополагающими в разработке новых композитов, в том числе наноструктурированных, которые обладают необходимыми механическими свойствами.

Цель исследования

Настоящая статья направлена на развитие технологий ЭКУ для производства порошкообразных материалов с разнообразными характеристиками пористости и улучшенными функциональными свойствами. ЭКУ осуществляли на специально спроектированной и изготовленной лабораторной установке, представляющей собой мини – пресс. Усилие прессования создавалось лабораторным гидравлическим прессом с максимальным усилием прессования $P=7600\text{H}$, позволяющим регулировать давление масла. В качестве источника тока использовали сварочный выпрямитель для ручной дуговой сварки (РДС) ВДУ-1201 (ГОСТ 13821-77). Сила тока варьируется от 0 до 1000А, которая измерялась встроенным амперметром. Плотность тока рассчитывалась по номинальному сечению образца. При уплотнении использовали двухстороннюю схему прессования с плавающей матрицей. Принципиальная схема лабораторной установки, представлена на рис. 1, которая содержит гидравлическую цепь, включающую: бак 1 с рабочей жидкостью, гидронасос 2, распределитель с ручным управлением 3, напорный клапан 4, манометр 5, рукава высокого давления 6 и гидроцилиндр 7, и электрическую включающую: источник электрического тока 8, медные электроды 9, служащие для передачи электрической энергии пуансонам 10 пресс-формы 11, состоящая из диэлектрической матрицы, разъемной и фиксирующей обоймы, содержащей предварительно засыпанную навеску металлического порошка 12, помещенную в рабочую камеру 13, продуваемую аргоном.

Диэлектрические пластины 14 и заземляющий кабель 15 служат для предотвращения появления на корпусе лабораторной установки поражающего напряжения. Расходомер 16 предназначен для контроля подачи аргона. Амперметр 17 предназначен для контроля силы тока подаваемого от источника к электродам.

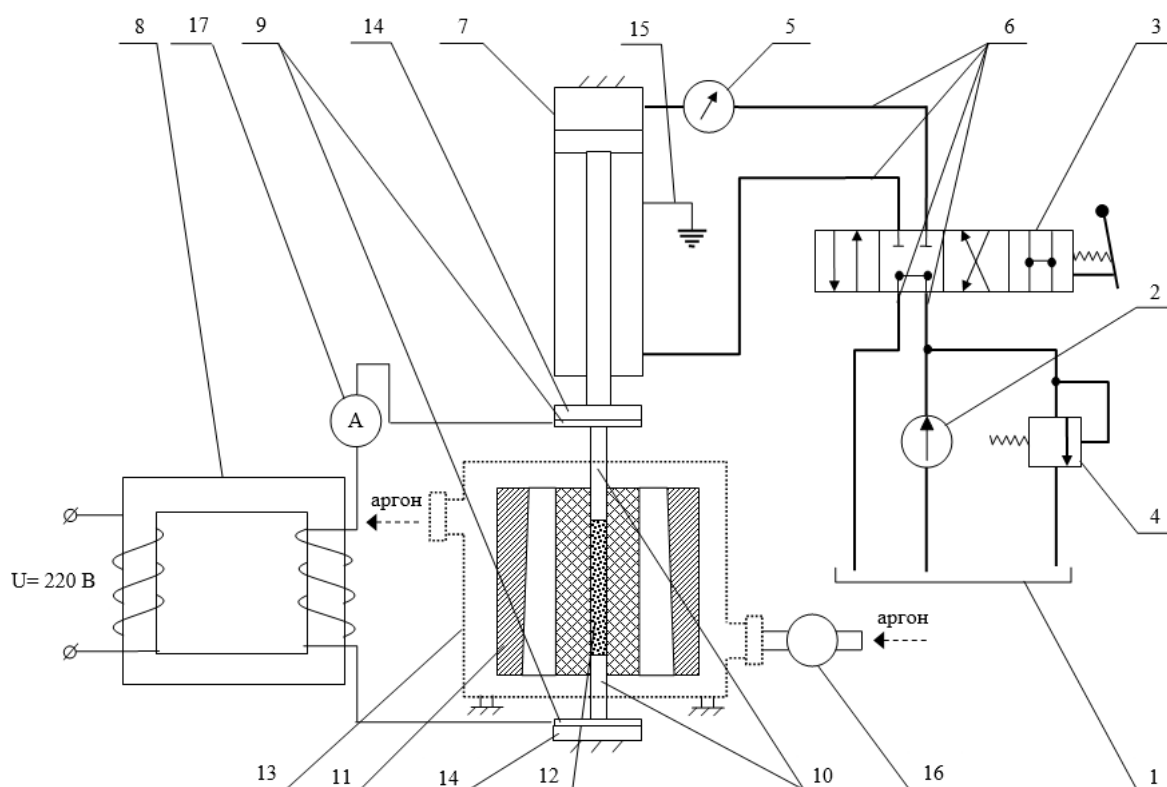


Рис. 1. Схема лабораторной установки для изготовления образцов методом электроконтактного уплотнения

Для достижения поставленной цели в технологический процесс формирования порошковых материалов на порошковую шихту оказывается ультразвуковое воздействие. С этим нововведением осуществляется технологический процесс ультразвукового электроконтактного уплотнения. Установка (УЭКУ) включает в себя особенности, делающие ее уникальной. Для эффективности дополнительно применяется система контроля температуры и давления, так же установка снабжается ультразвуковыми головками и линией продувки, которая минимизирует присутствие кислорода в процессе. Это предотвращает окисление порошковых материалов, что существенно улучшает их качества.

При проведении экспериментов было установлено, что использование ультразвуковых колебаний позволяет достигнуть более равномерного распределения частиц порошка, а также улучшает процесс гомогенизации. Результаты показали, что применение УЭКУ повышает прочностные характеристики материалов и уменьшает остаточную пористость до 6%, что является значительным достижением.

Заключение

Таким образом, ультразвуковое электроконтактное уплотнение представляет собой перспективное направление в порошковом материаловедении. Оно позволяет не только усовершенствовать существующие технологии, но и открывает новые горизонты для создания инновационных материалов, отвечающих современным требованиям индустрии. Важно продолжать исследования в данной области, чтобы максимизировать потенциал УЭКУ и внедрить его в производственные процессы.

Список литературы

1. Литвинова, Т. А. Закономерности формирования порошковой стали при электроконтактном уплотнении / Литвинова Т. А., Егоров С. Н. // Металлург. – 2013. - № 4. - С. 94-97.
2. Гомогенизация материала, полученного электроконтактным уплотнением порошковой бронзы / Егоров С. Н., Мецлер А. А., Медведев Ю. Ю., Литвинова Т. А. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. - 2010. - № 3. - С. 51-53.
3. Литвинова, Т. А. Механические свойства порошковой стали, полученной методом электроконтактного уплотнения / Литвинова Т. А., Егоров С. Н. // Металлург. – 2010. - № 1. - С. 65-67.

УДК 621.774.353

СРАВНЕНИЕ УРОВНЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРОШИВНЫХ СТАНОВ В РАЗЛИЧНЫХ ТРУБОПРОКАТНЫХ АГРЕГАТАХ

О. В. Першин¹, Е.Ю. Раскатов², М. Ю. Булганина³

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, 620002, Россия, opershin2012@yandex.ru

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, 620002, Россия, e.j.raskatov@urfu.ru

³ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, 620002, Россия, marina.bulganina@urfu.ru

Аннотация. Объектом данного исследования являлись прошивные станы с грибовидными валками и индивидуальным приводом валков, которые входят в технологическую линию трубопрокатного агрегата ТПА-140. Данные станы аналогичны по конструкции и установленным в цехах Челябинского трубопрокатного завода (ЧТПЗ) и Синарского трубного завода (СинТЗ). Предметом исследования являлись уровни технологических нагрузок (и их сравнение), возникающих в главной линии стана (приводе валков) при прокатке аналогичных по размерам заготовок на прошивных станах разных заводов. Методом исследования, в обоих случаях, являлся комплексный экспериментально-теоретический анализ данных, полученных в заводских условиях в ходе проведения промышленного эксперимента, при различных технологических режимах работы исследуемого оборудования.

Несмотря на то, что данные станы сходны по конструкции и деформирующему инструменту, предназначены для обработки одинаковых по размеру и маркам стали заготовок, они имеют различные по мощности двигатели главного привода. Представляет интерес сравнения нагрузок, возникающих в приводе валков, при прошивке аналогичных по маркам стали и типоразмерам заготовок на различных станах.

Для этой цели авторами работы были разработаны: методика проведения экспериментальных исследований; определён комплекс регистрируемых величин; а также осуществлен сбор данных, который позволил собрать необходимую информацию для определения уровня нагруженности главного привода прошивных станов. При последующем анализе полученных данных промышленного эксперимента сформулированы выводы по проделанной работе.

Ключевые слова: Винтовая прокатка, гильза, грибовидные валки, настроечные параметры стана, привод рабочей клетки, прокатка бесшовных труб, прошивной стан, технологический режим, токовые нагрузки.

COMPARISON OF TECHNOLOGICAL LOAD LEVELS OF PIERCING MILLS IN DIFFERENT PIPE ROLLING UNITS

O. V. Pershin¹, E Yu. Raskatov², M. Yu. Bulganina³

¹ Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, O.V. Pershin, Ekaterinburg, 620002, Russia, opershin2012@yandex.ru

² Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, E. Yu. Raskatov, Ekaterinburg, 620002, Russia, e.j.raskatov@urfu.ru

³ Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, M. Yu. Bulganina, Ekaterinburg, 620002, Russia, marina.bulganina@urfu.ru

Abstract. The object of this study was piercing mills with conical rolls and an individual roller drive, which are part of the technological line of the TPA-140 pipe rolling unit. These mills are similar in design and installed in the workshops of the Chelyabinsk Tube Rolling Plant (ChTPZ) and the Sinarsky Pipe Plant (SinTZ). The subject of the study was the levels of technological loads (and their comparison) that occur in the main line of the mill (roller drive) when rolling similar-sized workpieces in piercing mills of different plants. In both cases, the research method was a comprehensive experimental and theoretical analysis of data obtained in the factory during an industrial experiment, under various technological operating modes of the studied equipment.

Despite the fact that these mills are similar in design and deforming tools, they are designed for processing workpieces of the same size and grades of steel, they have different main drive motors in terms of power. It is of interest to compare the loads that occur in the shaft of rolls when stitching workpieces of similar steel grades and sizes at different mills.

For this purpose, the authors of the work developed: a methodology for conducting experimental studies; a set of recorded values was determined; and data collection was carried out, which made it possible to collect the necessary information to determine the load level of the main drive of the piercing mills. With the subsequent analysis of the obtained data from the industrial experiment, conclusions were formed on the work done.

Keywords: Helical rolling, hollow billet, conical roll, mill setting parameters, working stand drive, rolling of seamless pipes, piercing mill, technological mode, current loads.

Постановка проблемы.

Прошивные станы являются головными станами в линии трубопрокатных агрегатов (ТПА) по производству горячекатаных труб. Способ винтовой прошивки сплошной круглой заготовки, реализованный на них, является наиболее эффективным способом получения толстостенной гильзы, используемой для дальнейшей раскатки, калибрования и редуцирования её в последующих станах линии ТПА в горячедеформированную трубу. Данный способ является наиболее эффективным как с точки зрения производительности самого процесса производства, невысоких энергозатрат, так и приемлемым по качеству и точности геометрических размеров получаемого проката [1-3]. Такие станы с косораположенными валками, получили широкое распространение в отечественном трубном производстве и во всем мире.

На Российских трубных заводах АО «Челябинский трубопрокатный завод» (ЧТПЗ) и АО «Синарский трубный завод» (СинТЗ) для получения гильз в линии ТПА-140 используются аналогичные прошивные станы поперечно-винтовой прокатки. По своему конструктивному исполнению оба прошивных стана относятся к группе двухвалковых станов винтовой прокатки с индивидуальным и безредукторным приводом валков, расположенным с выходной стороны рабочей клетки прошивного стана [3]. Прокатка в станах осуществляется в грибовидных валках с осевой выдачей гильзы в линию проката и вертикальным расположением поддерживающих заготовку линейек.

Несмотря на то, что оба прошивных стана аналогичны по виду деформирующего инструмента (грибовидные валки, направляющие линейки, оправки) и сходны по своей компоновке, они имеют некоторые существенные конструктивные отличия главной линии станов. Это вызвано, с одной стороны, тем, что в своем составе трубопрокатные агрегаты разных трубных заводов имеют различные раскатные станы (станы для последующей раскатки толстостенной гильзы, получаемой после прошивки). С другой стороны, данные ТПА вводились в эксплуатацию в разное время, что позволило доработать конструкцию более поздних введенных в работу станов, с учетом выявленных недостатков у предыдущих. Однако, т.к. данное оборудование разрабатывалось и вводилось в эксплуатацию в основном в советский период (в 60-70-х годах прошлого столетия), то на сегодняшний момент, по большей части, оно морально устарело и физически изношено. Это требует постоянных капитальных вложений и затрат на ремонты и модернизацию. В то же время, постоянно повышаются требования к производимым трубам: требования к качеству и точности их размеров, расширяется сортамент труб и марочный состав используемых сталей. Все это вызывает необходимость в проведении исследований, с целью выяснения потребности в модернизации, повышении производительности станов, расширении сортамента и установления конструктивных возможностей оборудования и его узлов. Такие данные можно получить лишь проводя комплексные экспериментальные исследования на основе сбора и анализа максимально полной информации о параметрах, характеризующих энергосиловые показатели при прошивке.

Целями данной работы являлись:

- исследование уровней технологических нагрузок, возникающих в главной линии станов (приводе валков) при прошивке наиболее распространенных типоразмеров труб в заводских условиях;
- сравнение уровней технологических нагрузок при прошивке на сходном по конструкции и своему функционалу оборудовании;
- выявление отличий возникающего уровня нагрузок на разных станах и сопоставление полученных результатов с известными из предыдущих исследований закономерностями.

Характеристики исследуемых прошивных станов.

Разработчиком и изготовителем обеих прошивных станов являлся Электростальский завод тяжелого машиностроения (ЭЗТМ). Элементы главной линии прошивных станов (рабочие валки, универсальные шпиндели, промежуточные валы, зубчатые муфты) ТПА 140 АО ЧТПЗ и АО СинТЗ имеет сходную конструкцию. Сравнительная характеристика исследуемых станов представлена в таблице 1.

Методика экспериментального исследования.

Для проведения экспериментального исследования, на обоих станах, были разработаны: методика проведения; определён комплекс регистрируемых величин и интервалы изменения параметров технологического процесса; осуществлен эксперимент, выполненный по определенной программе. В целом, проведение исследований выполнялось аналогично приведенным в источниках [4, 5], неоднократно опробованными специалистами УрФУ на аналогичных станах. Дальнейший интерес представляет также сопоставление полученных результатов исследований, с массивами данных, регистрируемыми системами мониторинга работы электроприводов и температурного режима прокатки аналогичных прошивных станов для других ТПА. Для этого требуется их периодическая регистрация и обработка по определенной методике с распечаткой результатов и их анализом.

Таблица 1 - Отличительные характеристики прошивных станов ЧТПЗ и СинТЗ

Отличительные характеристики	Прошивной стан ЧТПЗ	Прошивной стан СинТЗ
Год ввода в эксплуатацию	1971	декабрь 1975
Конструкция рабочей клетки	закрытого типа	разъёмная, с поднимающейся верхней крышкой
Тип стана	двухвалковый	двухвалковый
Тип валков	грибовидные	грибовидные
Диаметры рабочих валков: - по пережиму, мм; - максимальный по торцу бочки с приводной стороны, мм; - минимальный по торцу бочки с приводной стороны, после переточки, мм	897 – 944 1084 990	860 – 1000 1139 999
Длина бочки валка, мм	600	620
Материал валков	сталь 35Л	сталь 35Л сталь 45Л
Угол подачи валков, град	0 - 15	0 - 20
Угол раскатки, град	17	17
Привод валков	индивидуальный	индивидуальный
Мощность электродвигателей постоянного тока главного привода стана, кВт	2 x 1000	2 x 1950
Тип электродвигателя	П 20 – 45 – 4К	П21-55-9К
Материал оправок	сталь 15Х5М	сталь 35ХН2Ф
Материал линеек	сталь Х30Н5Л	сталь 185Х31Н6Л

Регистрации нагрузочных параметров прошивного стана ТПА-140 ЧТПЗ.

Для измерения была построена система регистрации на основе персонального компьютера со специальным измерительно-регистрирующим блоком. Используемое программное обеспечение предусматривало его работу с использованием операционных систем DOS, Windows с использованием пакетов типа FAR manager и аналогичных ему, что позволяет конвертировать и формировать массивы цифровых данных для дальнейшей

статистической обработки результатов исследований с использованием стандартных программных пакетов типа Microsoft Excel.

Регистрация нагрузочных характеристик: токов якорей главных электродвигателей прошивного стана, частот вращения якорей электродвигателей, токов обмоток возбуждения производилась от контрольно-измерительных приборов, выведенных в машинный зал ТПА-140. Измерение крутящих моментов передаваемых промежуточными валами производилась методом электротензометрии, аналогично рассмотренным в источниках [4, 6].

Всего в ходе исследования были записаны процессы прошивки из заготовок диаметрами 120, 140 и 150 мм. Прошивка гильзы осуществлялась из сталей марок 20, 20А, 09Г2С и 13ХФА для труб диаметрами 114, 146, 159 мм, с толщиной стенки 5,0... 12,0мм. Методика проведения экспериментального исследования, анализ полученных результатов и выводы, полученные в ходе обработки результатов, более подробно описаны в предыдущей работе [7].

Регистрации нагрузочных параметров прошивного стана ТПА-140 СинТЗ.

Данные для регистрации нагрузочных параметров прошивного стана СинТЗ брались из цеховой системы мониторинга непосредственно от первичных штатных измерительных приборов, предусмотренных в схеме электропривода (датчиков, шунтов, амперметров и вольтметров). Система мониторинга трубопрокатного агрегата представляет собой программную оболочку iBaAnalyzer v.5.18.0, которая в многоканальном режиме позволяет обрабатывать и хранить в цифровой форме данные получаемые с различного оборудования линии проката, а также позволяет представить их для анализа в визуализированной форме в виде диаграмм и графиков (рис. 1).

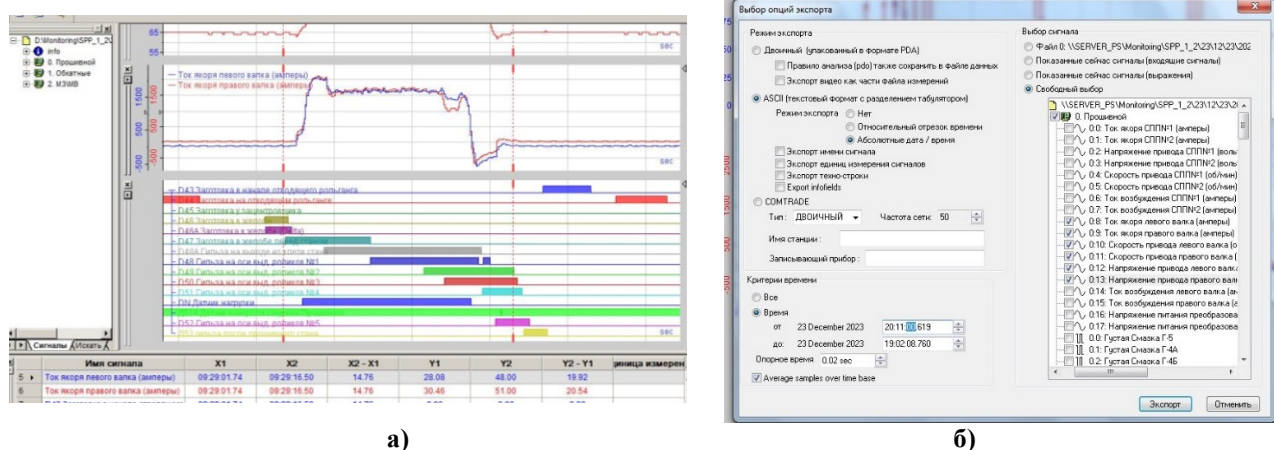


Рис. 1 - Окна системы мониторинга iBaAnalyzer ТПА-140 АО СинТЗ: а) визуализация диаграммы при прошивке; б) окно для выбора анализируемых параметров.

Система позволяет выбирать необходимые параметры, регулировать такт опроса, производить загрузку ранее полученных данных из массива, хранящегося на сервере, а также конвертировать выбранные для анализа данные в файлы в формате текстового документа (txt).

Выбор данных из массива производился с помощью сопоставления записей регистрации основных параметров с агрегатных журналов оборудования (прошивного стана, журнала посадки металла в печь и др.), приборов КИПиА, рапорта диспетчера завода, с соотносением и фиксацией по времени. Такт опроса регистрации данных, при выборе, был установлен 0,02 сек. В дальнейшем данные конвертировались в формат Microsoft Excel (xls), для последующей обработки и анализа.

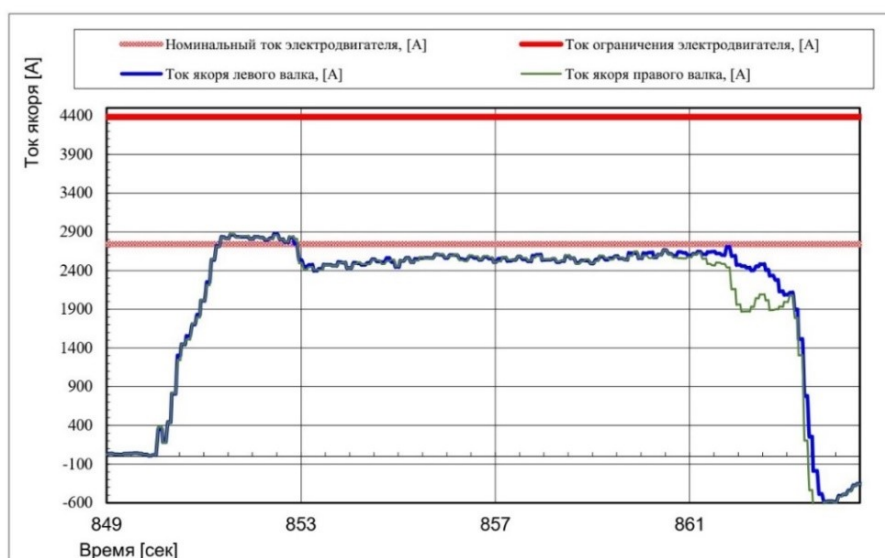
Для сравнения нагрузочных параметров прошивного стана, из массива были выбраны данные, аналогичные прошивке на стане ЧТПЗ. Критериями выбора послужили: диаметр заготовки, размер гильзы после прошивки, конечный размер получаемых труб, марка стали. Были отобраны данные прошивки из заготовок диаметрами 120 и 150 мм, с различной длиной от 1980 до 2500 мм (в соответствии с цеховым заданием на прокат). Прошивка осуществлялась для труб диаметрами 114, 146, 159 мм, с толщиной стенки 5,0...12,0мм, из

сталей марок 20, и 09Г2С, 45 (и её аналоги м/ст. Д и Д-8), 32Г2ФА. Температура нагрева металла в печи по зонам, в зависимости от марки стали, варьировалась от 1120 до 1290°C. Настроечные параметры стана: угол подачи, расстояния между валками и линейками в пережиме, установка стержня (выдвижение оправки за пережим), были взяты из агрегатного журнала прошивного стана, в который технологический персонал фиксирует данные при настройке и периодически в процессе проката. Диаметр валков в пережиме также брался из агрегатного журнала, где он фиксируется старшим вальцовщиком после каждой перевалки валков и их установки в стан. Фактические диаметры валков в пережиме, при прокатке составляли 1000мм (для новых валков) и 989мм (для валков, установленных после переточки).

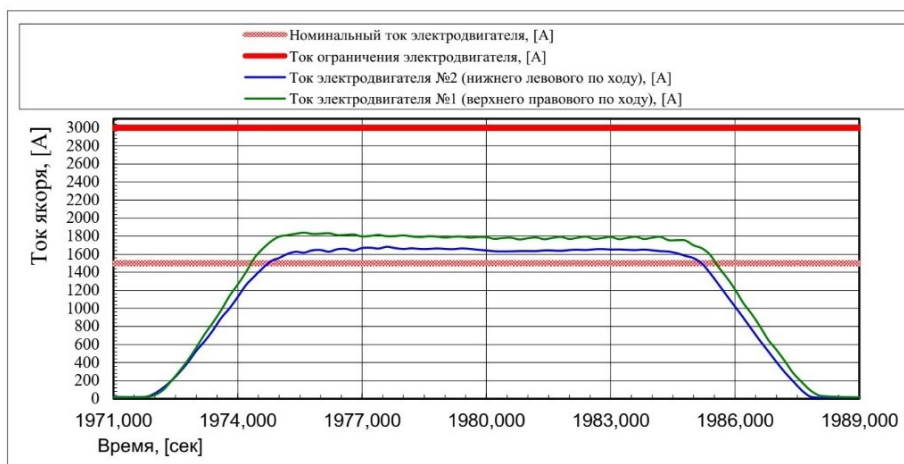
Анализ результатов экспериментального исследования.

Анализ осциллограмм токов электродвигателей для обоих станов и их сравнение позволяет сформулировать следующие выводы.

Длительность заполнения металлом очага деформации и выхода из него одинаковы и аналогичны для обоих станов, для всех типоразмеров прокатываемых гильз, марок сталей и настроек прошивных станов. Отсутствуют заметные динамические моменты в приводе станов при прошивке. На диаграмме представлена прошивка из заготовки м/ст 09Г2С, диаметром 150 мм в гильзы сопоставимых размеров на разных станах (рис.2).



а)



б)

Рис. 2. Диаграмма токовых нагрузок при прошивке заготовки диаметром 150 мм под трубы 159х8,0 мм, м/ст 09Г2С на прошивных станах ТПА-140:
а) СинТЗ, заготовка L=2600 мм, гильза 160х13,2 мм; б) ЧТПЗ, заготовка L=2350 мм, гильза 157х12,0 мм.

В целом, уровень токовых нагрузок (при прошивке аналогичных типоразмеров труб) выше на прошивном стане СинТЗ по сравнению со станом ЧТПЗ. Это объясняется применением двигателя большей мощности (большой динамический момент якоря двигателя из-за его габаритов), а также прошивке с повышенными углами подачи в 11° на СинТЗ, по сравнению с 8° на ЧТПЗ. Как видно из диаграммы, уровень нагрузок на стане СинТЗ составил 2700-2800А (при установившемся процессе прошивки) и находится ниже номинального уровня токовой нагрузки. В то время как, уровень токовых нагрузок стана ЧТПЗ составил 1600-1800А и находится выше номинального тока электродвигателя. Зависимость уровня нагрузок при повышении оборотов валков стана при прошивке приведена на рисунке ниже (рис.3).

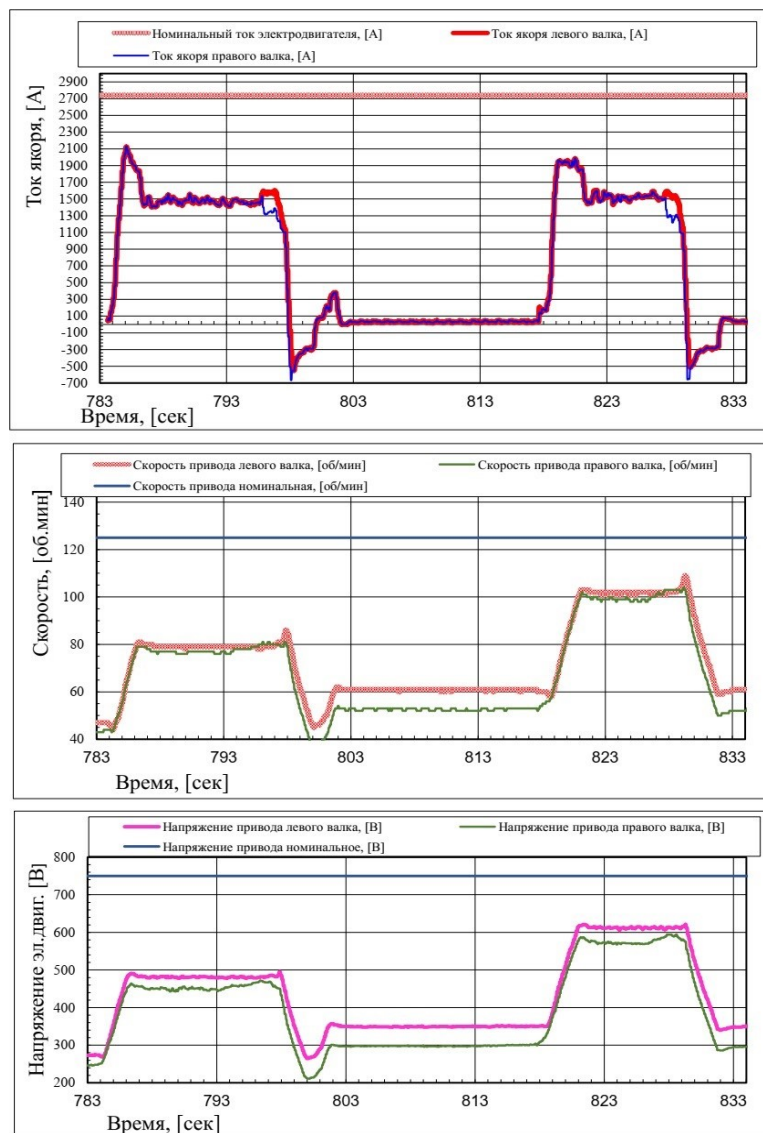


Рис. 3. Диаграмма токовых нагрузок, оборотов якоря и напряжения в цепи электродвигателя при прошивке заготовки диаметром 120 мм под трубы 114х6,0 мм, м/ст 20 на прошивном стане СинТЗ из заготовки L=2200 мм в гильзу размером 130х9,2 мм.

Как видно из диаграммы уровень токовых нагрузок слабо зависит от оборотов валков. При прошивке заготовки диаметром 120 мм под трубы 114х6,0 мм, м/ст20, при увеличении оборотов валков операторами стана с 80 до 100 об/мин (т.е. на 25%), уровень токовой нагрузки не изменился и остался на уровне 1500А. Так как прошивка осуществлялась с уровнем токовой нагрузки ниже номинала, то напряжение в цепи электродвигателя при этом было поднято системой автоматического регулирования стана с 480 до 600В. Время

прошивки заготовки в гильзу сократилось с 14 до 11 секунд, т.е. эквивалентно изменению оборотов якоря двигателя.

Размер заготовки существенно влияет на уровень нагрузок. Увеличение уровня нагрузок с увеличением размера заготовки объясняется большей площадью контактной поверхности очага деформации и большим объемом находящегося в очаге деформации деформируемого металла. Так, например, при прошивке заготовки 20 м/ст диаметром 120 мм в гильзу 130x9,2 мм уровень токовых нагрузок двигателей составил 1500А. А при прошивке заготовки диаметром 150 мм в гильзу 159x11,5 мм уровень токовых нагрузок двигателей составил 2300А (т.е. повысился на 53%).

В ходе экспериментальных исследований на прошивном стане СинТЗ была подтверждена зависимость нагрузок двигателей стана от температуры деформируемого металла, аналогично полученной ранее в исследованиях на стане ЧТПЗ. Когда, при прокате одинаковой марки стали из заготовки большего размера, в гильзу также большего размера, токовые нагрузки оказались ниже, чем при прокате заготовки и гильзы меньшего диаметра и толщины стенки, но с температурой нагрева ниже на 100°C.

Выводы.

В целом, по проведенным исследованиям на аналогичных прошивных станах разных трубопрокатных агрегатов, можно сформулировать следующие выводы:

1) Уровень нагрузок (при прошивке аналогичных типоразмеров труб) выше на прошивном стане СинТЗ по сравнению со станом ЧТПЗ. Это объясняется применением двигателя большей мощности, а также прошивке с повышенными углами подачи на СинТЗ.

2) Прошивной стан СинТЗ (в сравнении со станом ЧТПЗ) имеет запас по мощности, которая может быть использована при прошивке заготовок повышенного размера гильзы, в т.ч., например и из трудно деформируемых марок сталей.

3) Уровень токовой нагрузки при прошивке зависит от марки прошиваемой стали и возрастает пропорционально сопротивлению металла деформированию, который зависит от химического состава стали, степени деформации и температуры прошивки. Изменение токовых нагрузок двигателей в зависимости от температуры обрабатываемого металла происходило аналогично на обоих прошивных станах СинТЗ и ЧТПЗ.

4) Размер заготовки существенно влияет на уровень нагрузок. С увеличением диаметра обрабатываемой заготовки повышается уровень нагрузок. Это объясняется большей площадью контактной поверхности очага деформации и большим объемом находящегося в очаге деформации деформируемого металла.

5) При прошивке с увеличением оборотов валков операторами стана на 25%, уровень токовой нагрузки не изменился и остался на уровне 1500А, хотя время прошивки заготовки в гильзу сократилось эквивалентно изменению оборотов якоря двигателя.

Список литературы

1. Технология трубного производства : учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности "Обработка металлов давлением" / В. Н. Данченко, А. П. Коликов, Б. А. Романцев, С. В. Самусев. - Москва : Интермет Инжиниринг, 2002. - 638, [1] с. : ил., портр., табл. — ISBN 5-89594-083-8.
2. Розов, Н. В. Производство труб : справочник для рабочих. - Москва : Металлургия, 1974. - 598 с. : ил.
3. Трубное производство : учеб. / Б. А. Романцев, А. В. Гончарук, Н. М. Вавилкин, С. В. Самусев. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2011. – 970 с. — ISBN 978-5-87623-504-6.
4. Экспериментальное исследование уровня нагруженности рабочей линии прошивного стана ТПА-80 / Беляев С. Ю., Багазеев Ю. М., Кузнецов В. И., Чечулин Ю. Б., Чечулин А. В. // Достижения в теории и практике трубного производства : сб. научных трудов. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2004. — С. 292 – 299.
5. Experimental Research of the Hot-Rolled Pipe Wall Sizing Process at the Reeling Mill of Pipe-Rolling Plant-140 in Conditions of Product Mix Extension / S.Yu. Belyaev, Yu.B. Chechulin, A.A. Fedulov, M.Yu. Bulganina // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 718, – С. 012002.
6. Бровман, М. Я. Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки / М. Я. Бровман. - Москва : Металлургия, 1995. - 256 с. : ил. — ISBN 5-229-01136-X.
7. Нухов, Д. Ш. Экспериментальные исследования технологических нагрузок в линии привода при изготовлении гильз на прошивном стане ТПА-140 / Д. Ш. Нухов, О. В. Першин, Г. А. Орлов // Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования : сборник статей всероссийской научно-практической конференции, Севастополь, 13–15 мая 2024 года. — Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2024. – С.73-78.

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ПИТАНИЯ

Т.А. Перевай

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299001,
Россия, talitvinova@sevsu.ru

Аннотация. Цель исследования заключается в создании эффективной и комфортной среды для посетителей и сотрудников предприятия общественного питания. Результаты работы показывают необходимость в адаптации пространственных решений к современным потребностям, включая внедрение инновационных технологий, таких как 3D-визуализация. Приведенный анализ исходного проекта предприятия предполагает расширение помещения, изменение формы стен и обновление раскладки, что позволяет создать более приятную атмосферу. Отметим также, что модификация раскладки способствует учету различных категорий посетителей и улучшает общий функционал заведения.

Ключевые слова: Проект помещения, предприятие общественного питания, эффективность, визуализация, моделирование.

ANALYSIS AND MODELING OF A CATERING COMPANY

Т.А. Perevay

Sevastopol State University, Sevastopol, 299045, Russia, talitvinova@sevsu.ru

Abstract. The purpose of the study is to create an efficient and comfortable environment for visitors and employees of a catering company. The results of the work show the need to adapt spatial solutions to modern needs, including the introduction of innovative technologies such as 3D visualization. The above analysis of the initial project of the enterprise involves the expansion of the premises, changing the shape of the walls and updating the seating, which allows you to create a more pleasant atmosphere. We also note that the seating modification helps to account for different categories of visitors and improves the overall functionality of the institution.

Keywords: Room design, catering company, efficiency, visualization, modeling.

Введение

В последнее время тенденция к росту уровня жизни населения повышает спрос на услуги предприятий общественного питания. Современное кафе выполняет роль не только предприятия питания, но и развлекательного центра, в который люди приходят не только покушать, но и отдохнуть, получить положительные эмоции от атмосферы гостеприимства. Важнейшим аспектом в сфере данной отрасли является качество предоставляемых услуг потребителю и планировка помещения. Одной из проблем, стоящих перед отраслью общественного питания, является поиск путей повышения эффективности продвижения услуг, анализ которых является неотъемлемой частью организации бизнеса. Эффективная планировка помещения способствует повышению статуса предприятия [1].

Актуальность выбранной темы обусловлена тем, что индустрия данного бизнеса является одной из наиболее динамично развивающихся форм в международной торговле услугами. Предприятия общественного питания играют огромную роль в жизни современного общества, и очень важно, как они развивались и развиваются в настоящее время, ведь основная цель предприятий питания – удовлетворение потребностей человека в пище и отдыхе.

Цель исследования

Моделирование здания предприятия общественного питания — это комплексный процесс, который требует учета множества факторов, включая функциональное использование пространства, технологические процессы и требования к безопасности. Основной целью проектирования является создание эффективной и комфортной среды как для сотрудников, так и для клиентов.

Важным аспектом является правильная организация потока людей и продуктов, что способствует оптимизации работы кухни и залов обслуживания. Архитектурные решения

должны быть адаптированы к современным экологическим стандартам, включая использование устойчивых материалов и энергетически эффективных систем [2].

При проектировании также учитываются эргономика и эстетика интерьеров, что создает привлекательную атмосферу для посетителей. Каждое помещение — будь то кухня, склад, зал или санитарные узлы — должно четко исполнять свои функции, имея при этом возможность для адаптации к меняющимся потребностям бизнеса. Моделирование требует тесного сотрудничества между архитекторами, дизайнерами и специалистами в области общественного питания, что позволяет создать успешный и конкурентоспособный проект.

В современном обществе, где гастрономия становится неотъемлемой частью культурной идентичности, анализ и моделирование зданий предприятий общественного питания играют ключевую роль в создании комфортной и функциональной среды для потребителя. Успешное проектирование должно учитывать не только эстетические требования, но и социальные, экономические и экологические факторы. Важно применение инновационных технологий для оптимизации потока посетителей и скорости обслуживания. Моделирование, основанное на современных методах, таких как 3D-визуализация, позволяет проанализировать недостатки и достоинства проектов предприятия. На рис. 1 представлен исходный проект предприятия общественного питания. Проанализировав исходный проект было предложено расширить помещение, стену сделать полукруглой и расширить оконный проём, это визуально расширит помещение и улучшить освещение предприятия (рис.2).



Рис. 1. Исходный проект предприятия общественного питания



Рис. 2. Спроектированный (модернизированный) проект предприятия общественного питания

Также изменена рассадка посетителей, выделены зоны: столики на 2 человека, столики на 8 человек и барные столы со стульями. Данная рассадка позволило зондировать пространство. С помощью барной стойки, столиков на 2 человека, столики на 8 человек разделяется на различные стилистические решения и распределены категории посетителей. Расположения столиков в зоне вблизи входа отсутствуют, полностью учтено соотношения размера помещения и формата столиков.

Заключение

Таким образом, комплексный подход в анализе и моделировании не только улучшает функционирование заведения, но и создает уникальный уют для клиентов, способствуя их возвращению в данное предприятие общественного питания.

Список литературы

1. Краснов, С. В. Концепция системы поддержки архитектуры предприятия / С. В. Краснов, А. Р. Диязитдинова // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. – 2012. – № 2 (19). – С. 60 – 65.
2. Soares, M. M. Ergonomics in Design: Methods and Techniques / Marcelo M. Soares, Francisco Rebelo. – CRC Press, 2016. – 532 p. – ISBN: 9781498760706.

УДК 621.01

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ И АВТОСПОРТЕ: РЕВОЛЮЦИЯ 3D-ПЕЧАТИ И ОБРАТНОГО ИНЖИНИРИНГА

И.Е. Столяр¹, Ю.О. Стреляная²

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299053, Россия, winni20199@gmail.com

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299053, Россия, YOStrelyanaya@sevsu.ru

Аннотация. В данной статье рассмотрены ключевые особенности применения перспективных технологий, 3D сканирования и обратного инжиниринга при конструировании обычных и гоночных автомобилей. Как облегчают и улучшают процесс производства деталей 3D принтер и 3D сканирование. Какие преимущества получает и как 3D сканирование влияет на аэродинамику гоночного автомобиля. В заключение подчёркивается влияние этих технологий на повышение производительности, снижение затрат и ускорение внедрения инноваций, что открывает новые возможности для автомобильной индустрии.

Ключевые слова: 3D-сканирование, 3D-принтер, обратный инжиниринг, автомобилестроение, гоночный автомобиль.

THE USE OF ADVANCED TECHNOLOGIES IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY AND MOTORSPORT: THE REVOLUTION OF 3D PRINTING AND REVERSE ENGINEERING

I.E. Stoliar¹, Yu.O. Strelyanaya²

¹ FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299053, Russia, winni20199@gmail.com

² FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299053, Russia, YOStrelyanaya@sevsu.ru

Abstract. This article discusses the key features of applying advanced technologies, 3D scanning and reverse engineering in the design of regular and racing cars. How a 3D printer and 3D scanning facilitate and improve the production process of parts. What advantages does 3D scanning receive and how does it affect the aerodynamics of a racing car. The paper concludes by highlighting the impact of these technologies on increasing productivity, reducing costs and accelerating innovation, opening up new opportunities for the automotive industry.

Keywords: 3D scanning, 3D printer, reverse engineering, automotive, racing car.

Постановка проблемы. Современная автомобильная промышленность, включая разработку гоночных автомобилей, сталкивается с рядом вызовов, требующих использования инновационных подходов. Ключевыми проблемами являются необходимость повышения эффективности производства, сокращения сроков разработки, уменьшения веса транспортных средств без потери прочности, а также оптимизация аэродинамических характеристик. В условиях усиливающейся конкуренции и растущих требований к экологичности и безопасности автомобилей становится критически важным внедрение технологий, способных обеспечить экономичное и высокоточное производство сложных компонентов.

Традиционные методы проектирования и производства не всегда способны удовлетворить современные запросы, что приводит к необходимости применения новых инструментов, таких как 3D-печать и обратный инжиниринг. Эти технологии позволяют решать задачи создания уникальных деталей, быстрого прототипирования, а также восстановления и модернизации существующих моделей. Однако их интеграция сопряжена с вызовами, включая адаптацию производственных процессов, обучение персонала и внедрение цифровых решений. Таким образом, актуальной становится проблема поиска эффективных способов использования перспективных технологий для преодоления этих барьеров и достижения максимальной производительности в автомобильной отрасли.

Изложение основного материала. Использование перспективных технологий в автомобилестроении и разработке гоночных автомобилей представляет собой ключевой вектор развития отрасли, направленный на повышение эффективности, улучшение эксплуатационных характеристик и снижение производственных затрат. Основные направления внедрения таких технологий охватывают 3D-печать и обратный инжиниринг.

Процесс обратного инжиниринга начинается с создания цифровой копии объекта с высокой степенью точности. Для этого применяются различные 3D-сканирующие устройства, включая лазерные сканеры, приборы структурированного света и координатно-измерительные машины (КИМ). Координатно-измерительные машины обеспечивают исключительную точность, достигающую 0,005 мм, однако их низкая скорость сканирования ограничивает область применения [1]. Альтернативой выступают портативные 3D-сканеры (например, MetraSCAN 750), сочетающие точность ($\pm 0,025$ мм) с мобильностью [2]. В автомобилестроении это позволяет: реставрировать утраченные детали ретроавтомобилей (пример: восстановление кузова Aston Martin DB4 GT Zagato с использованием данных сканирования), анализировать геометрию компонентов двигателя для оптимизации КПД.

3D-печать играет центральную роль в обратном инжиниринге, обеспечивая возможность быстрого производства физических прототипов и деталей на основе созданных цифровых моделей. Этот метод не только снижает затраты на изготовление, но и значительно повышает точность готовых изделий. Интеграция 3D-печати с процессами обратного инжиниринга открывает доступ к созданию деталей сложной геометрии, которые невозможно или крайне сложно произвести с использованием традиционных технологий.

3D-печать, особенно методы SLS (селективное лазерное спекание) и DMLS (прямое лазерное спекание металлов), обеспечивает создание деталей с топологической оптимизацией, снижая массу на 30–50% без потери прочности. Примеры внедрения:

- Компания Bugatti использует 3D-печать титановых тормозных суппортов для гиперкара Chiron, сократив их массу с 4,9 кг до 2,9 кг.
- В гоночном болиде Mercedes-AMG F1 W14 применены напечатанные кронштейны подвески с интегрированными каналами охлаждения.

Преимущества использования 3D-печати в обратном инжиниринге включают:

- **Снижение производственных затрат:** Процесс позволяет эффективно и точно создавать детали и прототипы, существенно сокращая затраты по сравнению с традиционными методами.
- **Повышение точности:** 3D-принтеры обеспечивают высокую точность изготовления, что критически важно при работе с деталями сложной формы.

- Ускорение разработки: быстрое производство физических прототипов значительно сокращает временные затраты на разработку и тестирование новых изделий.

- Создание сложных форм: технология позволяет изготавливать детали со сложной геометрией, которые невозможно создать традиционными методами.

- Экономия времени: процесс разработки и производства деталей ускоряется благодаря минимизации необходимости в длительном проектировании и испытаниях.

- Проверка и тестирование: создание физических моделей позволяет проверять совместимость, эргономику и совершенствовать конструкции до финального производства.

В автомобильной промышленности 3D-сканирование активно используется для контроля качества, реверс-инжиниринга автокомпонентов и разработки новых аксессуаров. Этот метод позволяет получать точные измерения и адаптировать конструкции под конкретные задачи, что особенно важно для тюнинга и производства навесного оборудования.

Примеры применения 3D-сканирования в автомобилестроении:

- Кузовные элементы: сканирование крыльев, бамперов, капотов и других деталей позволяет создавать точные модели для ремонта и тюнинга.

- Колесные диски: используется для производства новых дисков или модификации существующих с высокой точностью.

- Защитные элементы: сканирование защиты картера и бронированных частей помогает улучшить их конструкцию и повысить защитные свойства.

- Интерьерные компоненты: оцифровка кресел и других элементов интерьера позволяет создавать индивидуальные модели, адаптированные под анатомию водителя.

- Ретроавтомобили: применение 3D-сканирования упрощает восстановление утраченных деталей ретроавтомобилей, обеспечивая их точное воспроизводство.

- Детали двигателя и трансмиссии: оцифровка этих компонентов позволяет анализировать и совершенствовать их конструкции, повышая производительность автомобиля.

Таким образом, комбинация 3D-печати и 3D-сканирования предоставляет автомобилестроению мощные инструменты для ускорения разработки, повышения качества продукции и оптимизации производственных процессов. Эти технологии особенно востребованы в сегментах тюнинга, ремонта и разработки инновационных решений для автопрома.

3D-сканирование значительно ускоряет процесс разработки гоночных автомобилей, предлагая ряд ключевых преимуществ:

- Точное моделирование и симуляции: 3D-сканирование позволяет создавать высокоточную цифровую модель автомобиля, что важно для проведения симуляций в аэродинамических трубах и вычислительной гидродинамике (CFD). Эти симуляции помогают анализировать и оптимизировать аэродинамические характеристики автомобиля без необходимости создания физических прототипов, что экономит время и ресурсы.

- Снижение времени разработки: использование 3D-сканеров ускоряет процесс разработки и тестирования аэродинамических компонентов. Например, компания APR применяет 3D-сканер EinScan HX для быстрого создания точных моделей, что позволяет оперативно анализировать и улучшать аэродинамические характеристики гоночных автомобилей.

- Экономия ресурсов: 3D-сканирование и последующие симуляции в цифровой среде позволяют избежать затрат на физические испытания в аэродинамических трубах, уменьшая потребность в материальных ресурсах и снижая риск ошибок, связанных с ручными измерениями.

- Повышение точности и надежности: высокая точность 3D-сканирования помогает выявлять даже незначительные отклонения в геометрии автомобиля, что критически важно для оптимизации аэродинамических характеристик. Современные 3D-сканеры, такие как MetraSCAN 750, обеспечивают не только высокую точность измерений, но и большую

производительность, что позволяет оперативно выявлять и исправлять возможные дефекты.

- Возможность индивидуализации: 3D-сканирование в сочетании с 3D-печатью дает возможность создавать кастомизированные аэродинамические компоненты, адаптированные к особенностям конкретного автомобиля. Это особенно важно в гоночной индустрии, где каждая деталь играет решающую роль в достижении максимальной производительности.

Таким образом, 3D-сканирование не только значительно ускоряет разработку гоночных автомобилей, но и позволяет снизить затраты, повысить точность и улучшить аэродинамические характеристики, что в свою очередь способствует увеличению эффективности и конкурентоспособности в гонках.

В свою очередь комбинация 3D-сканирования и печати позволяет моделировать аэродинамические элементы на основе данных CFD-анализа (вычислительной гидродинамики). Команда Red Bull Racing применяет эту связку для оптимизации антикрыльев, снижая сопротивление при сохранении прижимной силы, и быстрого прототипирования обвесов для тестов в аэродинамических трубах.

Внедрение данных технологий сокращает бюджет разработки на 15–20% (по данным Porsche Motorsport [3]) и ускоряет вывод продуктов на рынок. Однако ключевыми барьерами остаются:

- Высокая стоимость оборудования для металлической 3D-печати.
- Необходимость сертификации деталей (например, стандарт FIA для гоночных компонентов).

Заключение. Применение перспективных технологий, таких как 3D-сканирование и 3D-печать, значительно расширяет возможности обратного инжиниринга, обеспечивая быстрое и точное восстановление цифровых моделей объектов. Эти технологии позволяют не только эффективно анализировать свойства деталей, но и создавать улучшенные версии компонентов, что особенно важно в высокотехнологичных отраслях, таких как автомобилестроение и гоночные автомобили. В перспективе развитие автоматизации и искусственного интеллекта будет способствовать еще более широкому внедрению реверс-инжиниринга в различные сферы промышленности. Это, в свою очередь, приведет к значительному повышению эффективности производства, сокращению затрат и улучшению качества конечных продуктов. В будущем, с развитием этих технологий, можно ожидать появления более устойчивых и инновационных решений, которые окажут положительное влияние на экономику и развитие высокотехнологичных отраслей.

Список литературы

1. Водин, Д. В. Применение технологии обратного инжиниринга в машиностроении / Д. В. Водин // Технические науки: проблемы и перспективы : материалы IV Международной научной конференции. — 2016. — С. 5–10.
2. Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / Gibson I., Rosen D., Stucker B. — Springer, 2021. — 523 p.
3. Ford, S. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of industrial advantages and challenges / Ford S., Despeisse M. // Journal of Cleaner Production. — 2020. — Vol. 268. — 122289.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D-СКАНИРОВАНИЯ: ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

А.Ю. Тараховский¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299001, Россия, aytarakhovskiy@sevsu.ru

Аннотация. В статье рассматриваются современные технологии 3D-сканирования, их принципы работы, возможности и области применения, а также проводится анализ перспектив дальнейшего развития данного направления. Основное внимание уделяется различным типам 3D-сканеров, их преимуществам и недостаткам, а также практическим аспектам использования этих устройств в промышленности, медицине, архитектуре и науке. Подробно описаны преимущества и недостатки лазерных 3D-сканеров, такие как высокая точность, широкий диапазон расстояний, скорость сканирования, отсутствие физического контакта и универсальность, а также ограничения, связанные с условиями освещения, работой с прозрачными и блестящими поверхностями, стоимостью, энергопотреблением, безопасностью и подверженностью шумам и помехам.

Ключевые слова: Технологии 3D-сканирования, лазерные 3D-сканеры, промышленность, медицина, архитектура, наука, высокая точность, широкий диапазон расстояний, скорость сканирования, интеграция с искусственным интеллектом, цифровые модели, реверс-инжиниринг.

MODERN 3D SCANNING TECHNOLOGIES: PRINCIPLES OF OPERATION, APPLICATIONS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

A.Y. Tarakhovsky¹

¹FSAEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, 299001, Russia, aytarakhovskiy@sevsu.ru

Abstract. The article discusses modern 3D scanning technologies, their principles of operation, capabilities and applications, as well as analyzes the prospects for further development of this area. The focus is on various types of 3D scanners, their advantages and disadvantages, as well as practical aspects of using these devices in industry, medicine, architecture, and science. The advantages and disadvantages of 3D laser scanners are described in detail, such as high accuracy, wide range of distances, scanning speed, lack of physical contact and versatility, as well as limitations related to lighting conditions, working with transparent and shiny surfaces, cost, energy consumption, safety and exposure to noise and interference.

Keywords: 3D scanning technologies, 3D laser scanners, industry, medicine, architecture, science, high accuracy, wide range of distances, scanning speed, integration with artificial intelligence, digital models, reverse engineering.

Введение. В последние десятилетия технологии трехмерного сканирования претерпели значительные изменения, став неотъемлемой частью множества отраслей – от промышленного производства до медицины и архитектуры. Этот процесс не только позволяет создавать точные цифровые модели реальных объектов, но и открывает новые горизонты для автоматизации производственных процессов, повышения точности диагностики и ускорения научных исследований [1 - 4]. В данной статье мы рассмотрим основные принципы работы современных 3D-сканеров, их применение в различных сферах деятельности и перспективы дальнейшего развития.

Цель исследования – изучение современных технологий 3D-сканирования, их принципов работы, возможностей и областей применения, а также анализ перспектив дальнейшего развития этого направления. Особое внимание будет уделено сравнению различных типов 3D-сканеров, их преимуществам и недостаткам, а также практическому применению в таких сферах, как промышленность, медицина, архитектура и наука. Исследование направлено на выявление текущих тенденций и прогнозирование будущих изменений в технологиях 3D-сканирования, включая интеграцию искусственного интеллекта и машинного обучения, а также снижение стоимости оборудования для расширения доступности этой технологии.

Изложение основного материала. Существует несколько основных типов 3D-сканеров, каждый из которых имеет свои особенности и область применения:

Лазерные 3D-сканеры. Лазерные 3D-сканеры работают путем проецирования лазерного луча на объект и измерения времени возврата отраженного сигнала. Это позволяет создать точную карту поверхности объекта. Такие сканеры широко используются в промышленном производстве, где требуется высокая точность измерений [5, 6].

Преимущества лазерных 3D-сканеров:

Высокая точность: Лазерные 3D-сканеры обеспечивают высокую точность измерений благодаря использованию лазерного луча, который точно определяет расстояние до объекта. Это делает их идеальными для задач, требующих высокой степени детализации [7].

Точность лазерных 3D-сканеров может варьироваться в зависимости от модели устройства, его технических характеристик и условий применения. В среднем, современные профессиональные лазерные 3D-сканеры могут обеспечивать точность измерения от 0,01 мм до 1 мм.

Основные факторы, влияющие на точность [8]:

Разрешение сканера: Чем выше разрешение (количество точек на единицу площади), тем точнее будет результат.

Дальность действия: На больших расстояниях между объектом и сканером точность снижается.

Условия окружающей среды: Освещение, температура, наличие пыли и вибрации также влияют на качество данных.

Тип лазера: Лазеры с более узким пучком дают лучшие результаты.

Алгоритмы обработки данных: Современные алгоритмы позволяют корректировать ошибки и улучшать конечный результат.

Примеры популярных моделей и их точности:

FARO Focus S350/S150: Точность: около ± 1 мм при дальности до 350 м.

Leica BLK360: Точность: около ± 6 мм при расстоянии до объекта менее 20 метров.

Trimble X7: Точность: около $\pm 1,5$ мм при максимальном диапазоне до 80 метров.

Z+F IMAGER 5010C/5016: Точность: около $\pm 0,8$ мм для объектов на расстоянии до 100 метров.

Surphaser HSX: Точность: около $\pm 0,05$ мм на малых дистанциях (до нескольких метров).

Важно отметить, что эти значения являются ориентировочными и зависят от конкретных условий использования. Для высокоточных задач, таких как метрология или реверс-инжиниринг, обычно выбирают сканеры с максимальной точностью и минимальным уровнем шума.

Широкий диапазон расстояний: Лазерные сканеры способны работать на больших расстояниях, что делает их полезными для сканирования крупных объектов или труднодоступных мест (табл. 1) [9, 10].

Таблица 1-Технические характеристики и применение лазерных 3D-сканеров

Модель	Максимальная дальность	Точность	Для чего предназначен
FARO Focus S350	До 350 метров	Около ± 1 мм	Съемка зданий, мостов, туннелей
RIEGL VZ-400i	До 800 метров	Около ± 10 мм	Горная промышленность, строительство
Leica ScanStation P50	До 1 километра	Около $\pm 1,2$ мм на 50 м;	Мониторинг строительства высотных зданий
Teledyne Optech Polaris	До 2 километров	Около ± 15 мм	Топографическая съемка, мониторинг
Trimble TX8	До 120 метров	Около ± 2 мм	Метрологические задачи, реверс-инжиниринг

Скорость сканирования: Некоторые современные лазерные 3D-сканеры могут выполнять сканирование очень быстро, что важно в условиях промышленного производства или при работе с большими объемами данных (табл. 2) [11, 12].

Таблица 2 - Скорости сканирования современных лазерных 3D-сканеров

Модель	Скорость сканирования	Применение
FARO Focus M70	До 976 000 точек/сек	Средние объекты, интерьеры, архитектура
Leica RTC360	До 2 млн точек/сек	Строительные площадки, памятники
Z+F IMAGER 5016	До 1 млн точек/сек	Архитектура, строительство, археология
Trimble X7	До 500 000 точек/сек	Стройплощадки, обследование зданий
RIEGL VZ-2000i	До 1,24 млн точек/сек	Городские ландшафты, горные районы

Отсутствие физического контакта: Поскольку лазерные сканеры работают без прямого контакта с объектом, они подходят для сканирования хрупких или деликатных предметов, таких как произведения искусства или исторические артефакты [13].

Универсальность: Лазерные 3D-сканеры могут использоваться для сканирования самых разнообразных материалов и поверхностей, от металла до пластика и даже тканей [14].

Простота интеграции: Многие лазерные 3D-сканеры легко интегрируются с другими системами и оборудованием, такими как промышленные роботы или автоматизированные производственные линии [15].

Недостатки лазерных 3D-сканеров:

Зависимость от условий освещения: Качество сканирования может ухудшаться при ярком солнечном свете или других источниках интенсивного света, поскольку лазерный луч может рассеиваться или поглощаться окружающей средой.

Ограниченная работа с прозрачными и блестящими поверхностями: Лазерный свет может отражаться от прозрачных или сильно блестящих поверхностей, что затрудняет получение точных данных. Для таких случаев часто требуется специальная подготовка поверхности перед сканированием.

Стоимость: Лазерные 3D-сканеры, особенно высокоточные профессиональные модели, могут быть довольно дорогими, что ограничивает их доступность для некоторых пользователей [16].

Энергопотребление: Некоторые лазерные сканеры потребляют значительное количество энергии, что может быть проблемой в условиях ограниченных ресурсов или удаленной работы [17 - 19].

Безопасность: Использование лазеров требует соблюдения мер предосторожности, так как прямое воздействие лазерного излучения на глаза может привести к повреждению зрения.

Шумы и помехи: Лазерные сканеры могут быть чувствительны к внешним шумам и помехам, таким как вибрации или движение объекта во время сканирования, что может ухудшить качество получаемых данных.

Заключение

1. Современные технологии 3D-сканирования играют важную роль в различных отраслях, таких как промышленность, медицина, архитектура и наука, обеспечивая создание точных цифровых моделей реальных объектов.

2. Лазерные 3D-сканеры обладают рядом значительных преимуществ, среди которых:

- Высокая точность измерений, достигающая долей миллиметра;
- Возможность работы на больших расстояниях;
- Быстрая скорость сканирования;
- Отсутствие необходимости физического контакта с объектами;
- Универсальность применения для разных материалов и поверхностей;
- Простота интеграции с другим оборудованием.

3. Несмотря на многочисленные достоинства, у лазерных 3D-сканеров есть и определенные недостатки:

- Зависимость качества сканирования от условий освещения;
- Ограничения при работе с прозрачными и блестящими поверхностями;
- Высокие затраты на приобретение и эксплуатацию;
- Значительное потребление энергии;
- Необходимость соблюдения строгих мер безопасности при использовании лазеров;
- Чувствительность к внешним шумам и вибрациям.

4. Развитие технологий 3D-сканирования идет в направлении улучшения точности, снижения стоимости оборудования и интеграции с искусственным интеллектом и машинным обучением, что обещает расширить доступ к этим технологиям и повысить их эффективность в будущем.

Список литературы.

1. Лутьянов, А. В. Обратное проектирование деталей с отверстиями с использованием технологии 3D-сканирования / А. В. Лутьянов, А. В. Кислова. – DOI 10.31044/1684-2499-2024-0-1-21-24. — Текст : непосредственный // Технология металлов. – 2024. – № 1. – С. 21-24.
2. Тараховский, А. Ю. Реверс-инжиниринг коленчатого вала компрессора. – DOI 10.26160/2658-3305-2023-18-91-97. — Текст : непосредственный / А. Ю. Тараховский, И. А. Смирнов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 18. – С. 91-97.
3. Шутков, Д. В. Использование технологии lidar для создания качественных 3D моделей / Д. В. Шутков. — Текст : непосредственный // Студенческий. – 2024. – № 4-2(258). – С. 5-10.
4. Авраменко, Е. П. Инновационные технологии современного строительства: лазерное сканирование при строительстве и реконструкции зданий / Е. П. Авраменко. — Текст : непосредственный // Цифровая среда как инструмент модернизации и инновационного развития : сборник статей Международной научно-практической конференции, Ижевск, 12 января 2024 года. – Уфа : Омега сайнс, 2024. – С. 170-173.
5. Федчишин, О. В. Лазерный 3D сканер 3SHAPE D700 основа точности и быстродействия CAD/CAM системы / О. В. Федчишин. — Текст : непосредственный // Сибирский медицинский журнал (Иркутск). – 2010. – Т. 97, № 6. – С. 259-261.
6. Области применения 3D сканера Scanform. — Текст : электронный // 3D-сканеры Scanform : [сайт]. — URL: <https://scanform.ru/application/areas-of-use/> (дата обращения: 11.01.2025).
7. Смирнова, А. Топ лучших 3D-сканеров в первом полугодии 2024 года: рейтинг и отзывы пользователей / Анна Смирнова. — Текст : электронный // Топ 3D Shop : [сайт]. — URL: <https://top3dshop.ru/blog/top-luchshih-3d-skanerov.html>. — Дата публикации: 04.07.2024.
8. Гулбаев, А. Х. Анализ российского рынка 3D-сканеров и нормативной базы технологии лазерного сканирования. Проблемы выбора лазерного 3D-сканера / А. Х. Гулбаев. — Текст : непосредственный // Научные исследования: теория, методика и практика : сборник материалов Международной научно-практической конференции, Чебоксары, 21 мая 2017 года. – Чебоксары : Центр научного сотрудничества "Интерактив плюс", 2017. — Том 1. – С. 320-323.
9. Тузикова, К. В. Применение лазерных сканеров для планирования ведения горных работ / К. В. Тузикова, С. А. Чилимова, И. В. Смолин. — Текст : непосредственный // Инновации в технологиях и образовании : сборник статей XVII Международной научной конференции, Белово, 19 апреля 2024 года. – Кемерово : Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2024. – С. 145-147.
10. Миуский, Д. А. Наземные лазерные сканеры в городской и застроенной среде / Д. А. Миуский, А. Н. Городничая. — Текст : непосредственный // Инновации. Наука. Образование. – 2022. – № 50. – С. 1723-1727.
11. Новоселов, Д. Б. Применение наземных лазерных сканеров при геодезическом сопровождении строительства горнодобывающих промышленных предприятий / Д. Б. Новоселов. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-104-112. — Текст : непосредственный // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 1. – С. 104-112.
12. Болбасов, Р. А. Схема работы триангуляционного лазерного 3D-сканера и расчёт погрешности измерений / Р. А. Болбасов, З. Д. Климашевич, А. О. Линкевич. — Текст : непосредственный // Лучшая научно-исследовательская работа 2024 : сборник статей VI Международного научно-исследовательского конкурса,

Пенза, 30 апреля 2024 года. – Пенза : Международный центр научного сотрудничества "Наука и Просвещение", 2024. – С. 7-10.

13. Саса, Д. А. Создание методики повышения производительности процесса создания твердотельной 3-D модели из реального объекта с помощью оптического сканера / Д. А. Саса, А. Ю. Тараховский. — Текст : непосредственный // Современные технологии: проблемы и перспективы : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых ученых, Севастополь, 19–22 апреля 2021 года. – Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2021. – С. 49-55.

14. Тараховский, А. Ю. Трехмерное моделирование объекта на основе данных лазерного 3D сканирования / А. Ю. Тараховский. – DOI 10.26160/2309-8864-2023-14-16-19. — Текст : непосредственный // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2023. – № 14. – С. 16-19.

15. Саса, Д. А. Использование многофункционального измерительного манипулятора для контроля параметров получаемых после механической обработки / Д. А. Саса, А. Ю. Тараховский. — Текст : непосредственный // Вестник современных технологий. – 2020. – № 3(19). – С. 54-59.

16. Тараховский, А. Ю. Реверс инжиниринг импеллера / А. Ю. Тараховский, М. А. Тараховский, И. А. Кинаш. — Текст : непосредственный // Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования : Сборник статей всероссийской научно-практической конференции, Севастополь, 13–15 мая 2024 года. – Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2024. – С. 41-45.

17. Знакомство с принципом работы лазерного сканера Zenmuse L1 / К. А. Жирнова, А. В. Иваныш, Ф. М. Ядрышников [и др.]. — Текст : непосредственный // Славянский форум. – 2022. – № 1(35). – С. 333-339.

18. Кильдюшов, Л. С. Что такое 3D-сканер и как он работает / Л. С. Кильдюшов, Н. В. Береза. — Текст : непосредственный // Проблемы развития науки и образования в эпоху модернизации : материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 20 апреля 2023 года. – Ростов-на-Дону : Манускрипт, 2023. – С. 102-105.

19. Мишкина, К. А. Выбор и обоснование применения 3D сканирования в реверс-инжиниринге / К. А. Мишкина, Р. С. Чернов, Ю. О. Стреляная. — Текст : непосредственный // Современные технологии и реверс-инжиниринг : сборник статей Всероссийских научно-практических конференций, Севастополь, 17 апреля – 12 2023 года / гл. редактор О. В. Мухина. – Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2023. – С. 206-208.

Секция 4 ВОЗМОЖНОСТИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ

УДК 621.01

ПРИМЕНЕНИЕ СТУПЕНЧАТОЙ ГИБКИ ДЛЯ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ДУГООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОНКОЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

А. О. Карфидов¹, Н. А. Чиченев², М. В. Васильев³, О. Н. Чиченева⁴

¹ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет МИСИС,
г. Москва, 119049, Россия, a.korf@mail.ru

²ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет МИСИС,
г. Москва, 119049, Россия, chich38@mail.ru

¹ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет МИСИС,
г. Москва, 119049, Россия, mv@karfidovlab.com

²ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет МИСИС,
г. Москва, 119049, Россия, ch-grafika@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы получения тонкостенных деталей с дугообразными элементами для небольших аппаратов и приборов в условиях мелкосерийного или единичного производства с использованием принципов прототипирования, которое в последнее время широко используется для тестирования и оценки идей на самой ранней стадии разработки, а в некоторых случаях и для проверки функционирования прототипа устройства. С учетом требований, предъявляемых к качеству деталей, выбрана технология ступенчатой (пошаговой) гибки, в которой используется множество последовательных V-образных изгибов для получения заданной кривизны заготовки. С применением технологии ступенчатой гибки изготовлены различные детали прототипа универсального плазменного низкотемпературного стерилизатора серии Пластер Мед ТеКо, который позволяет быстро, безопасно и эффективно стерилизовать широкий спектр медицинского оборудования. В качестве примера рассмотрено использование технологии ступенчатой гибки листовой заготовки для изготовления тонкостенного бампера двери стерилизатора.

Ключевые слова: тонкостенные детали, дугообразные элементы, прототипирование, ступенчатая гибка, стерилизатор.

THE USE OF STEP-BY-STEP BENDING FOR PROTOTYPING ARC-SHAPED ELEMENTS OF THIN-SHEET PARTS

A. O. Karfidov¹, N. A. Chichenev², M. V. Vasiliev³, O. N. Chicheneva⁴

¹National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, 119049, Russia
a.korf@mail.ru

²National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, 119049, Russia
chich38@mail.ru

³National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, 119049, Russia
mv@karfidovlab.com

⁴National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, 119049, Russia
ch-grafika@mail.ru

Abstract. The issues of obtaining thin-walled parts with arc-shaped elements for small devices and devices in small-scale or single production using the principles of prototyping, which has recently been widely used to test and evaluate ideas at the earliest stage of development, and in some cases to verify the functioning of a prototype device, are considered. Taking into account the requirements for the quality of the parts, the technology of stepwise (stepwise) bending was chosen, which uses a set of consecutive V-shaped bends to obtain a given curvature of the workpiece. Using step bending technology, various parts of the prototype of the universal plasma low-temperature sterilizer of the Plaster Med TECHO series have been manufactured, which allows fast, safe and effective sterilization of a wide range of medical equipment. As an example, the use of the technology of stepwise bending of a sheet blank for the manufacture of a thin-walled bumper of a sterilizer door is considered.

Keywords: thin-walled parts, arc-shaped elements, prototyping, step-by-step bending, sterilizer.

В различных отраслях народного хозяйства (медицина, фармацевтика, ветеринария, косметология, пищевая промышленность и др.) для стерилизации изделий широко применяются плазменные технологии, которые отличаются универсальностью использования, что позволяет стерилизовать большое разнообразие изделий и материалов [1]. На практике наибольшее распространение получили стерилизаторы, в которых в качестве активного агента используется ионизированный газ, образующийся при низком давлении – низкотемпературная плазма. В качестве стерилизующего агента обычно применяют пероксид водорода, который подается в рабочую вакуумную камеру, где в результате воздействия на обрабатываемые изделия (материалы) происходит нарушение процессов жизнедеятельности микроорганизмов. Низкотемпературная плазма практически не оказывает влияние на конструкционные материалы, что обеспечивает возможность стерилизации изделий, выполненных из различных материалов (металл, пластик, текстиль и др.). Применение плазменных технологий особенно эффективно для обработки материалов, чувствительных к действию высокой температуры и влаги, а также инструментов и изделий со специальными покрытиями или красками.

С применением технологии ступенчатой гибки [2-5] изготовлены различные тонкостенные детали прототипа универсального плазменного низкотемпературного стерилизатора серии Пластер Мед ТеКо [6]. В качестве примера использования технологии ступенчатой гибки рассмотрим процесс получения дугообразного сегмента бампера двери стерилизатора, аксонометрическое изображение которого показано на рис. 1, а его продольный разрез на рис. 2. Окончательное качество заготовки при такой формовке зависит от количества изгибов и шага между ними - чем их больше, тем более гладким будет поверхность изделия.

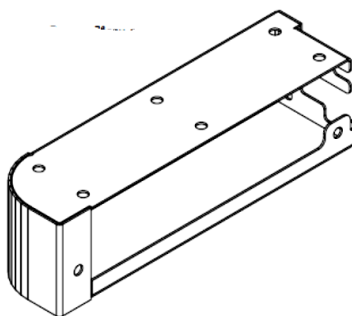


Рис. 1. Аксонометрическое изображение бампера двери стерилизатора.

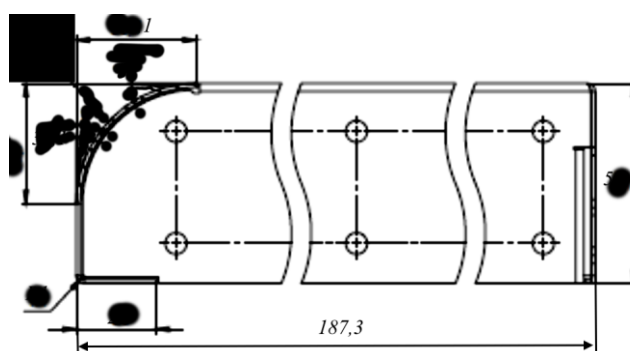


Рис. 2. Продольный разрез чертежа бампера двери стерилизатора, показанного на рис. 6.

В работе [7] приведены выражения для углов изгиба каждой ступени и разница между полученным ступенчатым профилем в виде полилиний и заданного дугообразного профиля (окружности). С использованием безразмерных (относительных) параметров выведена формула для определения угла изгиба ступени в зависимости от перемещения пуансона, на основе которой сделаны предложения по выбору числа изгибов, необходимого для обеспечения технических требований к профилю данного изделия. Показано, что для

деталей, наружные размеры которых должны быть выполнены по качеству h12 (ГОСТ 25346-2013), количество ступеней должно быть $Z_{ст} \geq 0$, по качеству h14, - $Z_{ст} \geq 6$.

В рассматриваемом случае с некоторым запасом принято $Z_{ст} = 10$, и поэтому угол изгиба, соответствующий одной ступени; $\alpha_{ступ} = 9^\circ$. При этом, как сказано выше, для обеспечения более плавного перехода дуги в прямолинейный участок заготовки (т.е. в начале и конце дугообразного сегмента) угол ступени целесообразно принимать равным половине угла центральных сегментов, т.е. на концевых участках $\alpha_{ступ} = 4,5^\circ$. Развернутый вид деформируемой заготовки бампера двери стерилизатора с указанием линий изгиба показан на рис. 3.

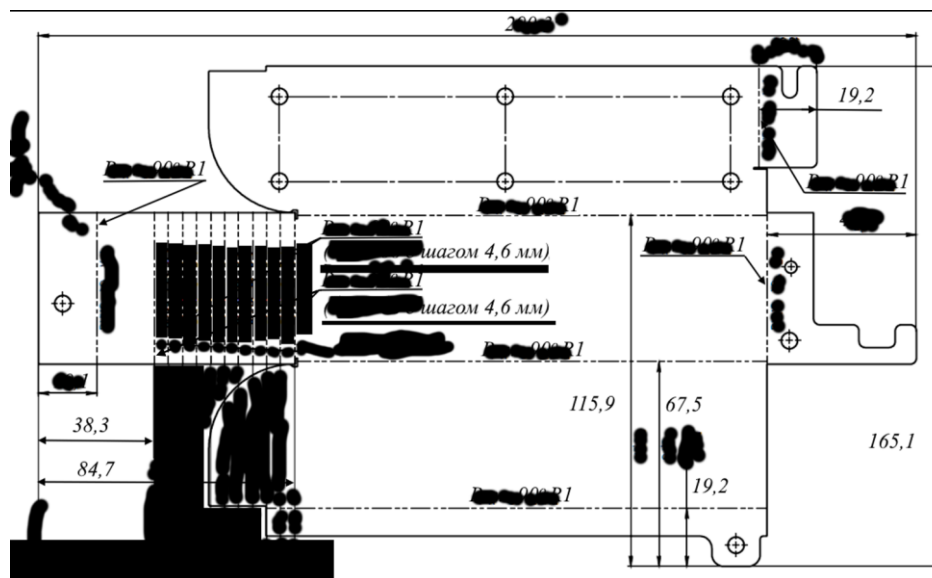


Рис. 3. Развернутый вид деформируемой заготовки бампера двери стерилизатора с указанием линий изгиба

Рассмотрены вопросы изготовления тонкостенных деталей с дугообразными элементами аппаратов и приборов мелкосерийного или единичного производства с применением технологии ступенчатой (пошаговой) гибки, в которой используется множество последовательных V - образных изгибов для получения заданного радиуса заготовки. С применением этой технологии изготовлены различные тонкостенные детали прототипа универсального плазменного низкотемпературного стерилизатора серии Пластер Мед ТеКо. Практическое применение данной технологии рассмотрена на примере получения дугообразного сегмента бампера двери стерилизатора.

Список литературы

1. Салманов, А. Г. Стерилизация изделий медицинского назначения / А. Г. Салманов, О. М. Вернер. – Х. : Панов А. М., 2015. – 412 с. — Текст : непосредственный.
2. Metal forming science and practice / ed. Lenard J. G. – Oxford : Elsevier Science, 2002. – 378 p. — Текст : непосредственный
3. Shane. Bump Bending for Large Bend Radius in Sheet Metal / Shane. — Текст : электронный // MachineMFG : [сайт]. — URL <https://www.machinemfg.com/bump-bending/> (дата обращения 12.12.2024 г.).
4. Benson S. Bending Basics / S. Benson. – Cincinnati : Fabricators & Manufacturers Association, 2017. - 581 pp. — Текст : непосредственный
5. Прототипирование ступенчатой гибки листового металла для изготовления тонкостенных корпусов / А. О. Карфидов, Н. А. Чиченев, М. В. Васильев, О. Н. Чиченева. – Текст: непосредственный // Современные технологии и реверс-инжиниринг : сборник статей Всероссийских научно-практических конференций, Севастополь, 17 апреля – 12 мая 2023 года / гл. редактор О. В. Мухина. – Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2023. – С. 220-222.
6. Низкотемпературный стерилизатор Пластер Прайм Мед ТеКо. — Текст : электронный // Мед ТеКо – медицинская техника : [сайт]. — URL: <https://medteco.ru/product/sterilizatsiya/plazmennye-sterilizatory/plaster-praym/> (дата обращения 12.12.2024 г.).
7. Определение параметров ступенчатой гибки тонколистового металла / Чиченев Н. А., Карфидов А. О., Васильев М. В., Чиченева О. Н. — Текст : непосредственный // Черные металлы. — 2024. — №1. — С. 17-20

АНАЛИЗ СХОДНЫХ ЧЕРТ И РАЗЛИЧИЙ В ФИЗИЧЕСКОЙ СУЩНОСТИ, ПРИНЦИПАХ И ФУНКЦИОНАЛЬНОМ НАПОЛНЕНИИ ПРОЦЕССОВ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ И СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПОИСКОВЫХ ЗАПРОСОВ

И. Б. Парашук¹, Л. А. Саяркин¹, Е. С. Владимирова², А. В. Селезнев¹

¹ ФГКВОУ ВО «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, 194064, Россия, shchuk@rambler.ru

² ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 299053, Россия, ESVladimirova@sevsu.ru

Аннотация. Рассмотрены ключевые аспекты, ориентированные на выявление сходных черт и различий в физической сущности, принципах и функциональном наполнении процессов быстрого прототипирования и создания цифровых двойников алгоритмов и программных средств для реализации поисковых запросов пользователей на информационных ресурсах распределенных систем хранения данных, крупных дата-центров и облачных платформ. Обе рассмотренные технологии цифрового проектирования – прототипы и цифровые двойники, имеют свои достоинства и недостатки, которые определяют их пригодность для моделирования в интересах предварительного анализа проектов (объектов) в конкретной ситуации, для конкретных условий информационного поиска. Выбор той или иной технологии и ее практическое применение будут зависеть от целого ряда условий, включая время и цели, стоящие перед проектировщиком и имеющиеся исходные данные. Проведенные исследования позволили выявить наиболее общие и специфические черты, которые присущи этим двум базовым современным технологиям цифрового проектирования, облегчающим работу исследователя и разработчика.

Ключевые слова: Быстрое прототипирование, цифровой двойник, реализация поисковых запросов, цифровое проектирование, алгоритм, программное средство, принцип

ANALYSIS OF SIMILARITIES AND DIFFERENCES IN THE PHYSICAL ESSENCE, PRINCIPLES AND FUNCTIONAL CONTENT OF THE PROCESSES OF RAPID PROTOTYPING AND CREATION OF DIGITAL TWINS OF ALGORITHMS AND SOFTWARE TOOLS FOR THE IMPLEMENTATION OF SEARCH QUERY

I. B. Parashchuk¹, L. A. Sayarkin¹, E. S. Vladimirova², A. V. Seleznev¹

¹ FSTMI HE "Military Orders of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny" of the Ministry of Defense of Russian Federation, St. Petersburg, 194064, Russia, shchuk@rambler.ru

² FSAEI HE "Sevastopol State University", Sevastopol, 299053, Russia, ESVladimirova@sevsu.ru

Abstract. The key aspects aimed at identifying similarities and differences in the physical essence, principles and functional content of rapid prototyping processes and creating digital twins of algorithms and software for implementing user search queries on information resources of distributed data storage systems, large data centers and cloud platforms are considered. Both digital design technologies considered - prototypes and digital twins - have their advantages and disadvantages that determine their suitability for modeling in the interests of preliminary analysis of projects (objects) in a specific situation, for specific conditions of information retrieval. The choice of one or another technology and its practical application will depend on a number of conditions, including the time and goals facing the designer and the available initial data. The conducted studies allowed us to identify the most general and specific features inherent in these two basic modern digital design technologies that facilitate the work of a researcher and a developer.

Keywords: Rapid prototyping, digital twin, search query implementation, digital design, algorithm, software, principle

Введение.

Эффективная реализация поисковых запросов пользователей на информационных ресурсах современных систем хранения данных, дата-центров и облачных программно-аппаратных технологических площадках, представляет собой сложную и нетривиальную

задачу, особенно, если речь идет о поиске необходимых сведений (данных) на облачных платформах для хранения, обработки и анализа больших данных [1-4].

С учетом того факта, что большие данные представляют собой колоссальные массивы гетерогенной информации, для сбора, обработки и хранения которой приходится использовать специфические, зачастую, интеллектуальные, специализированные методы и алгоритмы, составляющие основу современных «сквозных» цифровых технологий, актуальность решения задачи эффективной реализации поисковых запросов на ресурсах подобных платформ, на наш взгляд, не вызывает сомнений [5, 6].

Формулировка задачи.

Особую теоретическую значимость и практическую ценность данная задача приобретает при проектировании и создании современных многофункциональных и эффективных алгоритмов и программных средств для реализации поисковых запросов, когда в рамках формулировки технического задания по созданию таких информационно-поисковых объектов необходимо учитывать не только наличие очень больших массивов информации, но и условия неопределенности, неполноты и противоречивости, объективно присутствующие в функциональной среде формирования поисковых запросов и при формулировке предпочтений пользователей. Это обуславливает объективную необходимость упреждающего, проактивного, предварительного (до этапа непосредственного практического построения реальных алгоритмов и программных средств) использования моделей, натурных и полунатурных макетов и иных относительно несложных прототипов, позволяющих взглянуть на современные «поисковые движки» со стороны, проверить их работоспособность, оценить их параметры и показатели качества еще на этапе замысла архитектуры, без существенных материальных и иных затрат.

Практическим решением задач построения цифровых моделей, натурных и полунатурных макетов и прототипов сложных алгоритмов, программ и информационных объектов, к которым, по праву, относятся алгоритмы и программные средства для эффективной реализации поисковых запросов, вплотную занимается теория прототипов, а для конкретных задач технического плана, используются принципы прототипирования, реверс-инжиниринга и создания цифровых двойников. Проблемам упреждающего моделирования, предварительного анализа и проактивного оценивания работоспособности сложных алгоритмов, программ и иных объектов, посвящено большое количество работ, детальный анализ которых позволяет выделить, как наиболее рациональные, методы и средства прототипирования и создания цифровых двойников.

В этой связи, на наш взгляд, необходим детальный анализ базовых понятий этих методов и средств, анализ сходства и различия в содержании и функциональном наполнении общих процессов и частных процедур прототипирования (либо быстрого прототипирования) и создания цифровых двойников алгоритмов и программных средств реализации поисковых запросов. Это, в свою очередь, позволит повысить объективность принятия решений по выбору конкретных методов и средств, составляющих содержание этих ключевых категорий предварительного контроля и анализа, по выбору критериев создания прототипов.

Базовые понятия, функциональное наполнение и принципы быстрого прототипирования и построения цифровых двойников в интересах проектирования и практического создания алгоритмов и программных средств реализации поисковых запросов.

Анализ современных работ, посвященных методологии реализации поисковых запросов пользователей на информационных ресурсах больших систем хранения данных, крупных дата-центров и разветвленных облачных хранилищ, анализ исследований, посвященных вопросам цифрового проектирования, в частности, методам построения и использования моделей, макетов и прототипов для предварительной проверки работоспособности механизмов информационного поиска, обуславливают необходимость выделения в отдельную подзадачу и детального исследования ряда понятий, связанных с процедурами быстрого прототипирования и построения цифровых двойников алгоритмов и

программных средств эффективного поиска [7-14].

При этом под быстрым прототипированием алгоритмов и программных средств для информационного поиска принято понимать предварительный этап разработки, как самих таких алгоритмов, так и программного обеспечения для их реализации, заключающийся в создании макета – пробной, по сути, черновой, эскизной версии подобного алгоритмического или программного объекта [7-10].

В отличие от прототипирования, технология цифровых двойников (Digital Twin), также являясь важным средством цифрового проектирования, предусматривает создание модели («двойника») – электронной копии объектов, например, алгоритма или программного средства, помогающей оптимизировать их работу и повысить эффективность их функционирования. В интересах построения и совершенствования алгоритмов и программных средств информационного поиска, технология цифровых двойников призвана помочь быстрее обнаруживать алгоритмические коллапсы, программные сбои и физические проблемы, точнее предсказывать результаты этих сбоев и коллизий, и, как следствие, обеспечить производство более качественных алгоритмов и программных средств для реализации поисковых запросов пользователей [6, 11-14].

Важное место технология цифровых двойников может и должна, по нашему мнению, занимать в оборонной отрасли, где она будет эффективным средством планирования и предварительного (прогностического) анализа ситуаций в контексте поведения алгоритмов и программных средств для реализации поисковых запросов в различных экстремальных условиях обстановки [6, 12].

С точки зрения поиска сходных черт и различий в содержании и функциональном наполнении процессов быстрого прототипирования и создания цифровых двойников, следует отметить, что быстрое прототипирование алгоритмов и программных средств для реализации поисковых запросов используется, чаще всего, для тестирования предлагаемых разработчиками концепт, идей, замыслов, архитектурных, алгоритмических или технологических решений с точки зрения их соответствия техническому заданию и иным требованиям, а также потенциальным условиям эксплуатации. Создание эскизных прототипов алгоритмов и программных средств для реализации поисковых запросов, также необходимо для их заблаговременной демонстрации заказчику на начальных этапах (стадиях) процесса разработки подобных средств и механизмов информационного поиска, особенно при поиске на ресурсах больших данных.

В отличие от цифровых двойников, которые, по сути, тоже являются копиями (но более точными копиями), моделями реальных алгоритмов и программных средств, технология быстрого прототипирования дает возможность работать по этапам – сначала позволяет алгоритмисту проверить работоспособность своих идей и решений для «поисковых движков» без привлечения программистов, а на втором этапе – с привлечением непосредственных разработчиков программного обеспечения процедур информационного поиска. При этом в короткие сроки, создается упрощенный прототип (макет, эскиз), который может быть на какой-то следующей стадии разработки «брошен», забыт и не станет частью готового алгоритма или программного обеспечения механизмов и интерфейсов для информационного поиска.

Если основное преимущество цифровых двойников заключается в оптимизации работы и повышении эффективности функционирования алгоритмов и программных средств, интерфейсов для информационного поиска, то главное достоинство технологии быстрого прототипирования – экономия времени, выигрыш в оперативности. Создавая упрощенный макет алгоритма, интерфейса для информационного поиска или иного программного обеспечения для реализации поисковых запросов, в ответ на свои ранее сформулированные стартовые требования исследователь практически немедленно обретает эскизный прототип объекта разработки и может в режиме реального времени уточнить эти требования, до того, как начато написание рабочего кода программы на основе алгоритма поиска информации.

Базовые принципы быстрого прототипирования и построения цифровых двойников алгоритмов и программных средств реализации поисковых запросов для удобства сравнения и детального анализа сосредоточены в таблице 1.

Таблица 1 - Принципы быстрого прототипирования и построения цифровых двойников

Принципы быстрого прототипирования	Принципы построения цифровых двойников
- прототип создается только после определения целевой аудитории; - в прототипе должны быть учтены основные пользовательские сценарии поиска; - прототип всегда интерактивен, так как он направлен на проверку возможных действий пользователя; - в основе любого прототипа должна лежать гипотеза, которую необходимо проверить и сформулировать так, чтобы на нее можно было ответить «да» или «нет»; - при тестировании прототипа необходимо давать минимум информации потенциальному пользователю, чем больше он сделает ошибок, тем лучше для продукта; - дизайн прототипа должен быть максимально лаконичным, без отвлекающих внимание пользователя ярких картинок, или цветовых акцентов; - прототип необходимо сделать максимально похожим на реальный объект – алгоритм или программу.	- цифровой двойник должен иметь иерархическую структуру и включать в себя многоканальную информационную систему контроля внешней среды и состояния системы; - цифровой двойник – многомасштабное представление виртуальной модели алгоритма или программного обеспечения для информационного поиска; - цифровой двойник должен учитывать инвариантное представление внешней среды и поведения пользователей; - постоянное обучение цифровых двойников с целью повышения их адекватности; - цифровой двойник содержит мультимодельное отражение реального объекта и окружающей среды; - цифровые двойники учитывают подчинение и сопоставление уровней реального объекта; - цифровые двойники учитывают и используют многоконтурное управление; - наличие у цифровых двойников механизмов прогнозирования изменений внешней среды.

С точки зрения анализа функционального наполнения и инструментария для реализации процессов быстрого прототипирования и создания цифровых двойников алгоритмов и программных средств поиска данных, следует признать, что у этих процессов есть ряд сходных черт, и они иногда используют подобные инструменты. В частности, анализ решения практических задач в этой области знаний позволяет говорить о том, что, как для создания цифровых двойников, так и для быстрого прототипирования могут использоваться, например, инструменты «нулевого кода» – программные платформы, позволяющие алгоритмизировать поисковые задачи и создавать средства информационного поиска без написания кода.

Эти программные платформы, используемые как при быстром прототипировании, так и при создании цифровых двойников, нацелены на сокращение времени разработки, на снижение затрат и на возможность совместного проектирования различных субпроцессов и процедур, они заметно упрощают процессы прототипирования и конструирования цифровых двойников и делают их более доходчивыми, а также легче практически применимыми и доступными для пользователей, даже не обладающих навыками алгоритмизации процессов информационного поиска и навыками программирования.

Как создание цифровых двойников, так и быстрое прототипирование алгоритмов и программных средств информационного поиска, позволяют более детально проработать проекты этих реальных объектов, уточнить их целевые параметры. Вместе с тем, несопоставимы затраты и время на создание цифровых двойников и прототипов. Очевидно,

что ресурсопотребление (человеко-часы, финансы, вычислительные ресурсы) на создание цифровых двойников, как максимально приближенных к реальности цифровых копий, значительно выше, в то время, как прототип, создаваемый для ответа на вопрос о реализуемости объекта (алгоритма или программы) и уточнения его технических характеристик, можно и нужно создавать с минимальным функционалом, быстро и недорого. Существуют важные различия и с точки зрения исходных данных – быстрые прототипы для уточнения технических требований проектируемого объекта (алгоритма или программы для информационного поиска) могут быть построены с использованием минимального количества имеющихся тестовых данных или данных, легко и быстро собираемых из иных источников, в то время, как для создания цифровых двойников, таких исходных данных будет явно недостаточно.

Заключение

Таким образом, рассмотрены ключевые аспекты, ориентированные на выявление сходных черт и различий в физической сущности, принципах и функциональном наполнении процессов быстрого прототипирования и создания цифровых двойников алгоритмов и программных средств для реализации поисковых запросов пользователей на информационных ресурсах распределенных систем хранения данных, крупных дата-центров и облачных платформ. Обе рассмотренные технологии цифрового проектирования – прототипы и цифровые двойники, имеют свои достоинства и недостатки, которые определяют их пригодность для моделирования в интересах предварительного анализа проектов (объектов) в конкретной ситуации, для конкретных условий информационного поиска. Выбор той или иной технологии и ее практическое применение будут зависеть от целого ряда условий, включая время и цели, стоящие перед проектировщиком и имеющиеся исходные данные.

Проведенные исследования позволили выявить наиболее общие и специфические черты, которые присущи этим двум базовым современным технологиям цифрового проектирования. Направлением дальнейших исследований в этом направлении может стать более детальный анализ функционального наполнения и практических (программных и аппаратных) инструментов быстрого прототипирования и создания цифровых двойников, который, позволит получить новые знания о средствах реализации этих технологий, позволит выявить тенденции и закономерности, которые в дальнейшем могут стать фундаментом для новых технологий цифрового проектирования алгоритмов и программных средств информационного поиска.

Список литературы

1. Нагорный, К. Д. Эксплуатация ЦОД : практическое руководство/ К. Д. Нагорный, А. А. Чеснов, Т. А. Чирков. — Текст : непосредственный. — Москва : Альпина ПРО, 2024. — 320 с.
2. Парашук, И. Б. Эффективность современных центров обработки данных / Парашук И. Б., Михайличенко Н. В. — Текст : непосредственный // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы III Межрегиональной научно-практической конференции. — Севастополь : СевГУ, 2017. — С. 24-26.
3. Макшанов, А. В. Большие данные. Big Data : учебник / А. В. Макшанов, А. Е. Журавлев, Л. Н. Тындыкарь. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 184 с. : ил. - (Высшее образование). — ISBN 978-5-8114-9690-7. — Текст : непосредственный.
4. Парашук, И. Б. Проблемы Больших Данных. Особенности и пути решения / И. Б. Парашук. — Текст : непосредственный // IX Санкт-Петербургская Межрегиональная конференция «Информационная безопасность регионов России 2015 (ИБРР-2015)». — СПб. : СПОИСУ, 2015. — С. 175-176.
5. Абашева, О. Ю. Цифровая экономика и сквозные цифровые технологии: современные вызовы и перспективы экономического, социального и культурного развития : монография / О. Ю. Абашева, Э. Ф. Амирова, С. В. Беляева [и др.]. — Самара : ПНК, 2020. — 297 с. — Текст : непосредственный.
6. Парашук, И. Б. Анализ особенностей и роли современных «сквозных» цифровых технологий в построении и совершенствовании техники средств связи и автоматизации управления специального назначения / И. Б. Парашук, Д. В. Салюк. — Текст : непосредственный // Техника средств связи. — № 2 (158). — 2022. — С. 13-21.

7. Кугаевский, С. С. Реверс-инжиниринг и быстрое прототипирование в машиностроении : учебно-методическое пособие / С. С. Кугаевский. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2023. – 98 с. — Текст : непосредственный.
8. Голубева, И. Л. 3D-моделирование и прототипирование : методические указания / И. Л. Голубева, А. Р. Альтапов. – Казань : Изд-во КНИТУ, – 2021. – 46 с. — Текст : непосредственный.
9. Ключеня, В. В. Быстрое прототипирование встраиваемых программируемых систем на ПЛИС для мультимедийных приложений / В. В. Ключеня, Н. А. Петровский. — Текст : непосредственный // Информатика. – 2015. – №3. С.13-28.
10. Майлингова, О. Л. Прототипирование программ на языке Scheme / О. Л. Майлингова, С. Г. Манжелей, Л. Б. Соловская – М. : Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова, 2001. – 83 с. — Текст : непосредственный.
11. Прохоров, А. Н. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Н. Прохоров, М. Н. Лысачев ; под ред. Боровкова А. И. – М. : АльянсПринт, 2020. — 401 с. : ил. — ISBN 978-5-98094-008-9. — Текст : непосредственный.
12. Цифровые двойники в военном кораблестроении. – Текст : электронный // Новый оборонный заказ. Стратегии : [сайт]. – URL: <https://dfnc.ru/c106-technika/tsifrovye-dvojniki-v-voennom-korablestroenii/>. — Дата публикации: 07.09.2020.
13. Бурлаков, В. В. Цифровой двойник: ключ к совершенствованию бизнес-процессов телекоммуникационных компаний : монография / В. В. Бурлаков, Т. К. Мясоедова. – М. : Солон-Пресс, 2024. – 104 с. — Текст : непосредственный.
14. Дмитриев, В. М. Цифровые двойники : учебное пособие / В. М. Дмитриев, Л. А. Гембух, А. Е. Сахабутдинов. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 88 с. — Текст : непосредственный.

Научное издание

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА
И БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**

*Сборник статей
Всероссийской научно-практической конференции
12 - 14 февраля 2025 года*

Главный редактор: канд. техн. наук, PhD, доц. О.В. Мухина

Изд. № 47/2025. Объем 14 п.л. Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 13,72.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»