

УДК 678-419:004.925.84

Особенности проектирования 3D-моделей для аддитивного производства в условиях Индустрии 4.0

Закирова Ксения Сергеевна

kse.kseniya2014@yandex.ru

Мельникова Мария Александровна

Мельников Дмитрий Михайлович

Холопов Андрей Андреевич

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены ключевые особенности проектирования 3D-моделей для аддитивного производства с применением технологии селективного лазерного плавления (SLM) в контексте требований Индустрии 4.0. Проанализированы современные требования к цифровым моделям, включая адаптацию к параметрам печати, оптимизацию топологии, генеративный и параметрический дизайн, структурную интеграцию и реализацию концепции цифрового двойника. Рассмотрены вопросы автоматизации проектирования, применения CAD/CAE/CAM-систем, использования искусственного интеллекта и больших данных. Особое внимание уделено технологии обратного инжиниринга: на примере крыльчатки компрессора турбореактивного двигателя описаны этапы 3D-сканирования, обработки облака точек и построения цифровой модели с помощью специализированного ПО. Подчеркнута необходимость междисциплинарного подхода, стандартизации данных и интеграции цифровых цепочек в рамках интеллектуального производства.

Ключевые слова: аддитивное производство, селективное лазерное плавление, 3D-моделирование, Индустрия 4.0, генеративный дизайн, цифровой двойник, оптимизация топологии

Features of design of 3D-models for additive manufacturing in the context of Industry 4.0

Zakirova Ksenia Sergeevna

kse.kseniya2014@yandex.ru

Melnikova Maria Alexandrovna

Melnikov Dmitry Mikhailovich

Kholopov Andrey Andreevich

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The article explores the key aspects of designing 3D models for additive manufacturing using selective laser melting (SLM) technology within the framework of Industry 4.0. It analyzes current requirements for digital models, including adaptation to printing parameters, topology optimization, generative and parametric design, structural integration, and implementation of the digital twin concept. The study addresses the automation of design processes, the use of CAD/CAE/CAM systems, as well as the application of artificial intelligence and Big Data. Special attention is given to reverse engineering: a case study of

a centrifugal compressor impeller demonstrates the stages of 3D scanning, point cloud processing, and digital model reconstruction using dedicated software. The need for an interdisciplinary approach, data standardization, and digital chain integration in intelligent manufacturing is emphasized.

Keywords: *additive manufacturing, additive manufacturing, selective laser melting, 3d modeling, industry 4.0, generative design, digital twin, topology optimization*

Введение. Современный этап промышленного развития, известный как Индустрия 4.0, сопровождается активной цифровизацией производственных процессов. Аддитивные технологии, особенно селективное лазерное плавление (SLM), занимают ключевую позицию среди гибких и интеллектуальных методов производства. Эффективность таких изделий во многом зависит от качества и продуманности 3D-модели, которая становится не просто геометрическим объектом, а элементом киберфизической системы.

В процессе печати изделия создаются из порошкового материала за счет плавления лазерным лучом. Селективное лазерное плавление основано на последовательном расплавлении порошкообразного металла в заданных координатах, что требует высокой точности геометрии и учета физических параметров материала. При этом процесс достаточно чувствителен к ориентации слоев, тепловым напряжениям, поддержкам и охлаждению, что накладывает особые требования при проектировании 3D-моделей [1–3].

Развитие Индустрии 4.0 требует пересмотра подходов к проектированию цифровых моделей, предназначенных для аддитивного производства. В этой парадигме 3D-модель выступает не просто геометрическим шаблоном, а активным элементом киберфизической системы, участвующим во всех этапах жизненного цикла изделия — от проектирования до эксплуатации и утилизации (рис. 1).



Рис. 1. Роль 3D-модели в цифровом производственном цикле

Среди существующих техник в настоящее время наибольшее распространение получили следующие методы.

Цифровой двойник. Проектируемая модель должна быть частью цифрового двойника изделия — комплексной системы, включающей геометрию, физико-механические свойства, процессы жизненного цикла и данные мони-

торинга. Это требует интеграции CAD-модели с системами анализа (FEA), симуляции процессов плавления и предсказания дефектов.

Генеративный и параметрический дизайн. Использование генеративного проектирования позволяет создавать модели, оптимизированные по весу и прочности с учетом условий эксплуатации и ограничений SLM-технологии. Параметризация конструкции обеспечивает гибкость в модификации изделий без полной переработки модели.

Топологическая оптимизация. На этапе проектирования используется программное обеспечение для оптимизации топологии, что позволяет получать органические формы, недостижимые традиционными методами. Это снижает массу изделия и повышает его эксплуатационные характеристики, но требует точной настройки параметров печати.

Требования к 3D-моделям в Индустрии 4.0

Задача	Описание
Интеграция в цифровую цепочку	3D-модель должна быть совместима с CAD/CAE/CAM-системами, станками и средствами контроля, обеспечивая бесшовный обмен данными
Гибкость и адаптивность	Возможность быстрой модификации модели под требования конкретного заказчика или изменения параметров печати
Участие в цифровом двойнике	Модель должна быть связана с физическими параметрами, симуляцией, предсказанием поведения и мониторингом изделия
Обеспечение воспроизводимости	3D-модель должна исключать вероятность брака и обеспечивать стабильное качество продукции при тиражировании
Совместимость с ИИ и Big Data	Модель должна иметь понятную структуру для последующего анализа, оценки и предсказания на основе алгоритмов машинного обучения
Поддержка топологической и генеративной оптимизации	Обеспечение возможности проектирования облегченных, но прочных конструкций с учетом специфики SLM-печати
Стандартизация и совместимость форматов	Необходимость соблюдения общепринятых форматов обмена (STEP, AMF, 3MF) для обеспечения масштабируемости и универсальности.

Инструменты и технологии проектирования. CAD/CAE/CAM интеграция. Интеграция систем автоматизированного проектирования и анализа позволяет сократить цикл разработки, автоматизировать выявление потенциальных дефектов и учитывать реальные условия печати (ориентация, поддержка, деформации). Однако их может быть недостаточно для создания копии реального объекта.

Искусственный интеллект и большие данные. Применение алгоритмов машинного обучения позволяет прогнозировать успешность печати, подбирать оптимальные параметры сканирования и выявлять зависимости между геометрией модели и качеством изделия. Big Data используется для накопления статистики о производстве, что улучшает точность прогнозов.

Реверс инжиниринг. 3D-сканирование и томография. Обратное проектирование (Reverse engineering) — это процесс проектирования цифровой модели, которая описывает объект и его технологические свойства путем выполнения комплексного анализа его структуры. Этот процесс направлен на создание виртуальной 3D-модели на основе существующего физического объекта для его изучения, дублирования или улучшения [4] Существует множество причин для использования обратного проектирования. В случае изношенных или поврежденных компонентов, которые больше не поставляются или устарели, обратное проектирование поможет проанализировать особенности их строения, для последующего улучшения их характеристик и свойств, для обновления устаревших материалов или возобновления производственного процесса. Обратное проектирование позволяет значительно сократить время на разработку 3D-модели, и является единственной возможностью математически описать какое-либо уникальное изделие, на которое отсутствует конструкторская или любая другая документация [5] Для того чтобы создать 3D-модель объекта, объект должен быть измерен с использованием 3D-технологий сканирования (контактные, лазерные, ручные 3D-сканеры и т. д.). В случае внутренних полостей и отверстий одним из возможных методов является томография изделий, которая также позволяет получить цифровую модель изделия. После того, как операция сканирования выполнена, возможно построение 3D-модели с использованием САПР (систем автоматизированного проектирования). Реверс инжиниринг становится современным стандартом жизни, что обусловлено возможностью более быстрого получения готовых моделей и является актуальным решением многих задач. Безусловно, есть и отрицательные моменты работы с прямым копированием изделий, соответственно требуются доработки и оптимизация моделей с учетом современного производства.

Стоит учитывать, что цифровая модель должна соответствовать современным стандартам форматов обмена данными (например, STEP, AMF, 3MF), обеспечивая возможность передачи информации между CAD-системами, производственным оборудованием и системами мониторинга.

Примеры реализации. В практике проектирования узлов из титана и алюминиевых сплавов для авиационной промышленности применение топологической оптимизации в совокупности с генеративным дизайном позволило снизить массу на 20–40 % при сохранении прочностных характеристик. Модели, сгенерированные на основе анализа нагрузок, демонстрируют высокую повторяемость при SLM-производстве и стабильное качество.

Для исследования была выбрана деталь крыльчатки центробежного компрессора турбореактивного двигателя, которая изображена на рис. 2. Для ра-

боты турбореактивного двигателя необходима непрерывная подача сжатого воздуха в камеры сгорания [6]. Данная крыльчатка или рабочее колесо относится к закрытому типу. В современных авиационных компрессорах угол наклона лопаток составляет от 55 до 90° [7]. В данном случае тип крепления крыльчатки в центробежном компрессоре подразумевает установку с помощью системы вал-отверстие с применением шпоночного соединения.

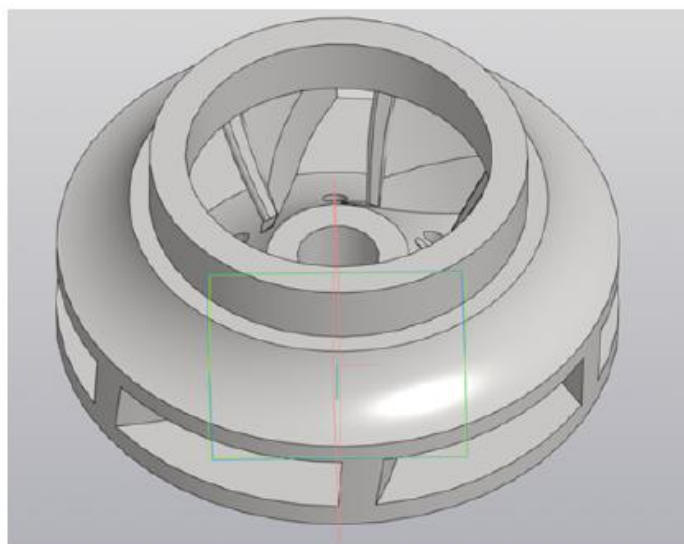


Рис. 2. Крыльчатка

Крыльчатка, анализируемая 3D-оптическим сканером, является моделью реального изделия, но созданного из неметаллического материала. Первым этапом анализа было снятие объемного скана с данного образца. Процесс сканирования показан на рис. 3. Особенностью снятия скана является необходимая подготовка к данному процессу, заключающаяся в нанесении специальных меток на поверхность изделия, а также на поверхность, на которой это изделие находится. Такие действия необходимы для точного позиционирования детали самим сканером и создания правильной компьютерной модели. Во время сканирования деталь должна быть неподвижной. Сам сканер обладает несколькими режимами работы: режим сетки, состоящий из пересекающихся друг с другом наборов параллельных полос, которые попадают на поверхность изделия и искажаются в соответствии с его геометрией, такой режим используют в основном для снятия общей геометрии; режим параллельных полос, назначение которого совпадает с вышеуказанным режимом; режим одиночной полосы, используемый для снятия геометрии сложно доступных объектов, например, малых отверстий, поднутрений и т. д. Сканы были сняты с нескольких сторон объекта для повышения точности при последующем объединении.

Второй этап проведения обратного проектирования заключался в объединении сканов в специализированном программном обеспечении — Geomagic Design X. Данное ПО позволяет при помощи опорных точек на

сканах объединять их в один объемных элемент, максимально точно передающий геометрию детали. Сложность данного этапа заключается в неодинаковом внешнем виде геометрии каждого из сканов. На рис. 4 показаны три скана изделия.

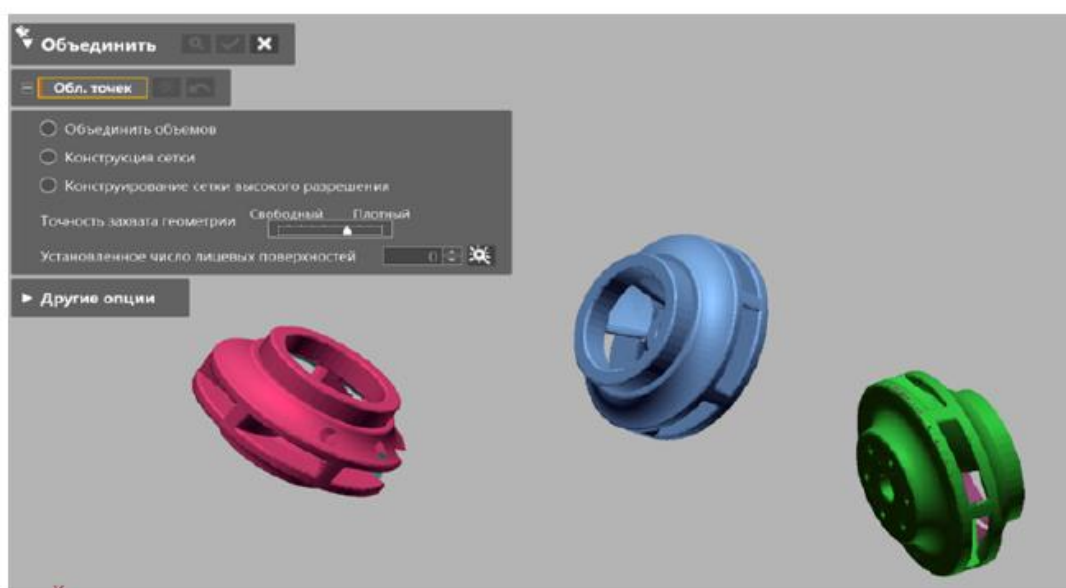
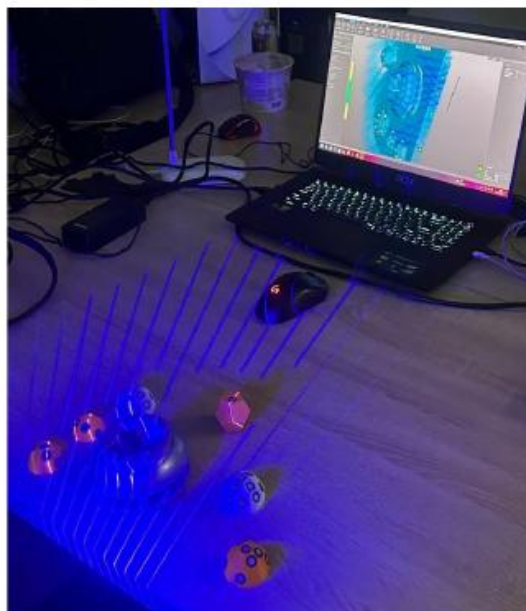


Рис. 3. Снятие 3D-скана и сканы крыльчатки

Данные сканы снимались при одинаковом расположении реперных точек, которые в виде специальных маркеров клеились на поверхность стола и отдельные участки детали. Каждый и сканов изначально имеет много шумов, возникающих из-за отражений оптических сигналов из устройства сканера. Поэтому важной задачей перед объединением является исключение шумов из видимого поля полученного изделия. Это позволяет без особых потерь в точности получить качественную 3D-модель.

Обсуждение полученных результатов. Полученную 3D-модель можно увидеть на рис. 4. Изображение дает основную информацию о геометрии детали. Некоторые сканы могут иметь не все данные о взаимном расположении поверхностей изделия, поэтому только их сочетание можно использовать для исследования. Чем больше количество сканов, тем более точной будет модель. Для успешного сканирования поверхности детали должны быть чистыми, матовыми и без бликов, при необходимости можно наносить исчезающий матирующий спрей. Также стоит учитывать разрешение, минимальные зазоры для сопрягаемых деталей, а также обработку поверхностей и возможные дефекты. Эти и другие моменты корректируются либо возможностями оборудования (разрешение) либо доработкой моделей. Следует отметить, что внутренние поверхности имеют свои особенности сканирования и, как правило, такие проблемы можно решить с помощью томографии.

Данная модель может использоваться для выращивания в процессе селективного лазерного плавления, а подобный метод получения трехмерной модели значительно сокращает время на разработку моделей. Следует учитывать, что реконструированная модель должна быть адаптирована под технологические ограничения SLM, т. е. должны быть устранены поднутрения и тонкие стенки, не поддающихся печати, добавлены поддержки или проведено изменение ориентации слоев. Данные особенности будут учтены при дальнейшей печати.

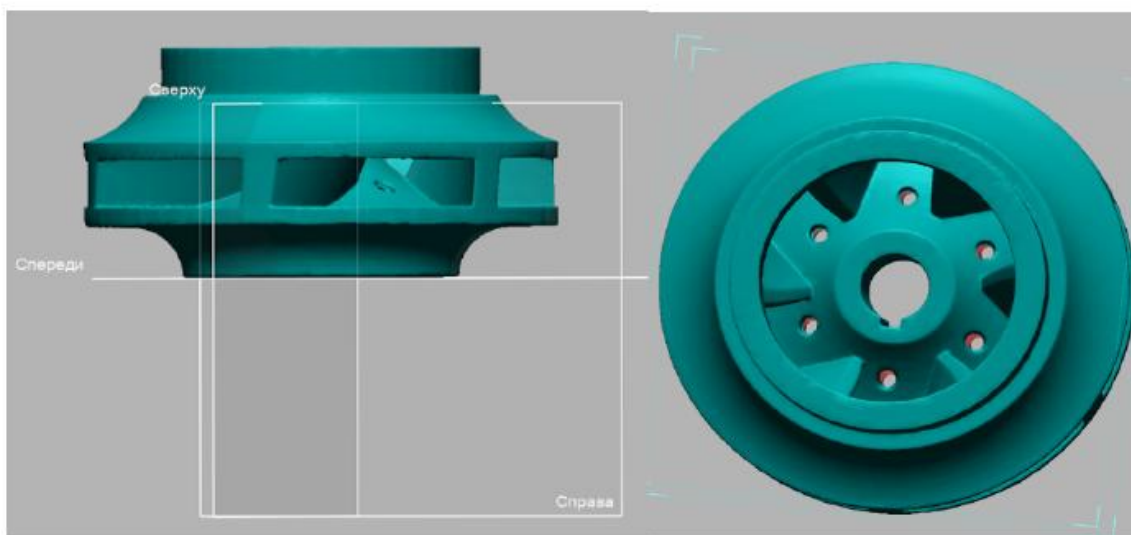


Рис. 4. Объединенный скан в двух проекциях

Исходя из проведенной работы можно выделить возможные дефекты и ошибки 3D-сканирования:

- недостаток элементов — сканер не захватил мелкие детали (резьбы, фаски), либо образовались «дыры» из-за низкого разрешения или плохого доступа;
- неверные размеры — из-за ошибок оборудования, неподходящих условий (вибрации, температура, освещение) или человеческого фактора;

– проблемы с материалом — неправильный выбор материала для сканирования (например, слишком блестящий или прозрачный).

Тогда для минимизации дефектов важно подобрать сканер под задачу и особенности объекта, подготовить поверхность (очистка, матирование), контролировать условия сканирования и проводить двойную проверку размеров.

Внедрение интеллектуального проектирования в аддитивном производстве связано с рядом проблем: требуется высокая квалификация инженеров в области цифровых технологий, необходимы единые стандарты цифровых двойников и обмена данными, возникает проблема верификации и сертификации оптимизированных моделей. Однако эти вызовы сопровождаются перспективами:

- снижение массы и стоимости изделий;
- повышение надежности за счет прогнозируемых характеристик;
- возможность персонализации производства.

Таким образом, обратное проектирование — это лишь начальный этап цифрового воспроизводства изделия. Для соответствия требованиям Индустрии 4.0 полученная 3D-модель должна пройти дальнейшие этапы обработки: параметризацию, оптимизацию, включение в цифрового двойника и адаптацию под SLM-производство. Только в этом случае реконструированное изделие сможет эффективно использоваться в интеллектуальной цепочке аддитивного производства.

Заключение. Проектирование 3D-моделей для аддитивного производства в условиях Индустрии 4.0 — это комплексная задача, требующая междисциплинарного подхода, применения интеллектуальных технологий и учета множества факторов печати. Развитие цифровых инструментов и методов проектирования открывает новые возможности для создания эффективных, легких и надежных изделий, способных интегрироваться в умные производственные системы. Рассмотрен пример проведения реверс инжиниринга детали с получением ее цифровой модели, выделены основные особенности проведения сканирования с учетом возникновения различных дефектов.

Список источников

- [1] Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 2021.
- [2] ISO/ASTM 52900:2021. *Additive manufacturing. General principles. Terminology*. ASTM International, 2021.
- [3] Zhang Y., Bernard A., Harik R., Perry N. Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing. *J. Intell. Manuf.*, 2015, vol. 28. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1057-1>
- [4] Диго С.М. *Базы данных. Проектирование и создание*. Москва, Изд. центр ЕАОИ, 2008.
- [5] Норенков И.П. *Основы автоматизированного проектирования*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
- [6] *Каменский станкостроительный завод*. URL: <https://777russia.ru/book/uploads/ПРОИЗВОДСТВО/Устройство%20двигателя%20%28подробно%29.pdf> (дата обращения 21.11.2024).
- [7] Гильзин К.А. *Воздушно-реактивные двигатели*. Москва, Воениздат, 1956, 172 с.