

УДК 681

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ СИНТЕЗА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФОРМ ИЗДЕЛИЙ

Ефременкова М.В.<sup>1</sup>, инженер, Черкасов П.В.<sup>1,2</sup>, инженер<sup>1</sup>, аспирант<sup>2</sup>  
гр.МРа-221, III курс, Баловнев Е.А.<sup>1</sup>, инженер  
Научный руководитель: Никитенко М.С.<sup>1,2</sup>, к.т.н., заведующий  
лабораторией<sup>1</sup>, доцент<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского  
отделения Российской академии наук», г. Кемерово

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово

Современные вызовы промышленного производства и инженерного проектирования требуют новых подходов к созданию продукции. В условиях повышенных требований к сложной конструкции, их функциональности и экономической эффективности, традиционные методы проектирования демонстрируют свою ограниченность. Перед инженерами стоят задачи по сокращению временных затрат на проектирование и производство, а также минимизацию материальных расходов. В этих условиях технологии синтеза геометрических форм изделий становятся возможными вариантами, обеспечивающими достижение указанных целей.

Под синтезом геометрических форм понимается совокупность операций и процедур, направленных на создание и/или изменение геометрической модели изделия, отражающей его геометрические свойства [1]. Электронная (геометрическая) модель изделия содержит необходимые сведения о геометрической форме, размерах и свойствах изделия [2].

Целью работы является анализ современных технологий синтеза геометрических форм изделий, их преимуществ, недостатков, ограничений и особенностей.

Консервативное проектирование основывается на классических методах, таких как ручное черчение, математические расчеты и макетирование. Современное инженерное проектирование включает в себя компьютерное моделирование и аддитивные технологии.

Компьютерное моделирование представляет собой технологию, которая использует специализированное программное обеспечение для создания, анализа, оптимизации и визуализации цифровых моделей объектов или процессов [3]. Оно базируется на применении системы автоматизированного проектирования (computer aided design – CAD), системы автоматизированного производства (computer-Aided Manufacturing – CAM) и системы автоматизированного инженерного анализа (computer-aided engineering – CAE), которые

обеспечивают проектирование геометрических форм, выполнение расчетов, моделирование физических явлений и генерацию управляющих кодов для технологического оборудования [4]. Данная технология охватывает широкий спектр задач, включая разработку геометрии изделий, анализ их характеристик, оптимизацию производственных операций и контроль качества. Благодаря компьютерному моделированию достигается существенное сокращение сроков проектирования, высокая точность и детализация, снижение количества ошибок и повышение эффективности на всех этапах жизненного цикла продукции.

Компьютерное моделирование имеет несколько основных подходов: параметрическое 3D-моделирование, генеративный дизайн, топологическая оптимизация, бионический дизайн. Основными особенностями между указанными методами проектирования является, что параметрическое 3D-моделирование основывается на изменении параметров для создания моделей, генеративным дизайном использует алгоритмы для автоматического генерирования множества вариантов, задача топологической оптимизации распределить материал для достижения лучших характеристик и бионическим дизайн заимствует из природных форм и процессов идеи для создания инновационных решений.

Параметрическое 3D-моделирование – это метод автоматизированного проектирования (CAD), при котором создание моделей основывается на задании параметров (например, размеров, углов) и установлении зависимостей между элементами [5-6]. Этот подход позволяет автоматически корректировать геометрию модели при изменении исходных параметров, обеспечивая гибкость и точность проектирования.

Генеративный дизайн – инновационное компьютерное моделирование, основанное на применении специализированного программного обеспечения с использованием алгоритмов искусственного интеллекта, которое на основе правильно поставленной задачи автоматически генерирует трехмерные модели на основе заданных параметров, направленных как на улучшение массы или веса изделия с учетом его геометрических характеристик, действующих нагрузок и заданных пользователем ограничений, так и на случайный поиск решений проектных задач [5-8]. Данный подход использует алгоритмы, включая методы конечных элементов, для создания множества вариантов решений, оптимизированных по заданным критериям (например, прочность, вес, стоимость).

Бионический дизайн представляет собой современное проектирование на основе заимствования и адаптации структурных принципов, встречающихся в живой природе, например, механизм роста деревьев или закон Вольфа, с использованием математических расчётов для создания высокоэффективных инженерных решений. Применение раннего технологического решения позволяет разрабатывать конструкции с оптимальными массо-габаритными и прочностными характеристиками, повторяющими природные аналоги [9]. Такой подход обеспечивает создание изделий с улучшенными эксплуатационными свойствами при одновременном сокращении сроков разработки и снижения материоемкости.

Топологическая оптимизация – это метод проектирования геометрической структуры объекта, направленный на поиск оптимального распределения материала в заданной области с учетом нагрузок, ограничений и целевых функций, таких как минимизация массы или максимизация жесткости, с применением математического анализа. Основное отличие между топологической оптимизацией и генеративным дизайном, что в первом случае инженер совершил уже готовую деталь, тогда как во втором проектировщик задает параметры и ограничения, а система сама генерирует множество вариантов конструкций, которые могут значительно отличаться от исходной формы. Этот процесс позволяет создавать легкие и прочные конструкции, сохраняя их функциональные характеристики [10-12]. При этом производить оценку технологичности объектов, полученных с применением последних двух подходов с позиции классических способов мехобработки не следует поскольку для изготовления такого рода деталей применяются специализированные методы.

К наиболее распространённому программному обеспечению (ПО) реализации технологий синтеза геометрических форм компьютерного моделирования можно отнести: КОМПАС-3D, AutoCAD, PTC Creo, OpenSCAD, Rhinoceros, Autodesk Inventor, SolidWorks и CATIA [13]. ПО оснащены функционалом для создания параметрических моделей, что обеспечивает возможность оперативного изменения геометрии изделия в соответствии с требованиями проекта, а также поддерживает анализ, визуализацию, высокую детализацию, интеграцию с современными технологиями и активное сообщество пользователей.

К числу широко используемого ПО для генеративного дизайна относятся: Ansys Discovery, CATIA, Creo, CogniCAD, Coldstream, Fusion 360, MSC APEX, nTop, NX, OptiStruct [14]. Результатом применения ПО является создание оптимизированных геометрических форм, которые соответствуют заданным параметрам, таким как нагрузка, материал, вес и функциональные требования и пр. Это позволяет значительно сократить время проектирования, снизить материальные затраты и повысить эффективность создания конечных изделий.

Рассмотренные методы проектирования широко применяются в различных областях, включая промышленный дизайн, архитектуру, аэрокосмическое проектирование и машиностроение, значительно ускоряя процесс разработки и повышая качество конечных решений.

К одному из методов современного проектирования относятся аддитивные технологии (АТ) – процесс создания изделий на основе цифровых 3D-моделей (CAD-моделей) методом послойного наращивания материала [15]. Это даёт возможность производить детали и конструкции со сложной геометрической формой, включая внутренние полости и решетчатые структуры, которые невозможно или затруднительно воспроизвести с помощью традиционных методов изготовления. Применяется в качестве макетов и прототипов, так и в качестве готовых изделий. Основное отличие от традиционных субтрактивных методов с механической обработкой, где материал удаляется для получения

конечной формы, аддитивные технологии предполагают постепенное добавление вещества слой за слоем.

Существует множество технологий 3D-печати, которые различаются по методам послойного формирования объектов [16]. Эти технологические процессы варьируются в зависимости от используемых материалов и принципов работы оборудования. Классификация технологий аддитивного производства основывается на агрегатном состоянии материала: жидким, твердом и порошковом [17].

Метод моделирования с использованием наплавления (FDM, FFF) основан на послойной экструзии нити из термопластичного материала (включая воск, пластик и металл) [18]. Рабочий материал подается в экструдер, который выдавливает расплавленный материал через сопло на охлажденную или нагретую платформу, формируя слой объекта. Лазерная стереолитография (SLA) включает использование специального жидкого фотополимера, который затвердевает под воздействием лазерного излучения [19]. После создания топологии текущего слоя лазером объект погружается в фотополимер на толщину одного слоя, после чего процесс повторяется. Существует модификация данной технологии – SLA-DLP, в которой вместо лазера используется DLP-проектор, что позволяет создавать топологию слоя целиком и тем самым ускорять процесс печати.

Метод ламинации (LOM) предполагает формирование объекта путем послойного склеивания тонких пленок рабочего материала с вырезанием контуров на каждом слое с помощью режущих инструментов или лазерного излучения [19].

Лазерное плавление (SLM) представляет собой технологию аддитивного производства, основанную на использовании лазера для послойного формирования объектов [19]. Эта технология получила широкое распространение благодаря высокому качеству получаемых изделий, которое обеспечивается малым радиусом лазерного пятна.

Селективное лазерное спекание (SLS) основывается на плавлении порошкового материала (пластика или металла) под действием лазерного излучения [19]. Рабочий материал равномерно наносится на платформу тонким слоем, после чего лазер формирует топологию текущего слоя. Далее платформа опускается на толщину одного слоя, и процесс повторяется.

Электронно-лучевая плавка (EBM) является аналогом технологии SLS, однако в данном случае формирование объекта осуществляется путем плавления рабочего материала электронным лучом в вакууме [19].

Разнообразие аддитивных технологий 3D-печати обуславливает необходимость разработки соответствующего ПО, адаптируемого к различным методам печати, материалам, отраслям и уровням пользователей. Программное обеспечение для 3D-печати предоставляет возможность разрабатывать, модифицировать трехмерные модели и конвертировать их в управляющие команды для 3D-принтера. На 2025 год наиболее известные и применяемые программы для аддитивного производства [20]: Ansys, Autodesk Netfabb, 3DSystems,

Siemens NX AM, Materialise Magics, Solid Edge, Amphyon, Genoa 3d Simulation, AdditiveLab, 3yourmind

Использование в работе аддитивных технологий позволяет значительно сократить время на изготовление продукции, уменьшить экономические издержки на производстве и снизить количество отходов материалах, повысить качество условий труда сотрудников, которые могли сталкиваться в процессе изготовления образцов с вредными и опасными факторами при субтрактивных методах, создание деталей и прототипов любой сложности, формы и геометрии.

К особенностям активного масштабирования аддитивных технологий для массового производства относятся ограничения по материалам и точности, а также необходимость интеграции различных технологий в единый производственный процесс. Кроме того, важным аспектом является обучение специалистов, способных эффективно использовать современные инструменты, методы проектирования и режимы работы оборудования для обеспечения высокого качества изделия.

Вывод.

Применение технологий синтеза геометрических форм находят применение в различных отраслях: машиностроении, медицине, аэрокосмической промышленности, архитектуре и дизайне благодаря своей гибкости, точности и возможности минимизации отходов материала. Представленные в работе результаты анализа демонстрируют существенные преимущества современных методов проектирования по сравнению с традиционными подходами и подтверждают целесообразность внедрения современных технологий проектирования в производства, что соответствует мировым тенденциям цифровизации промышленности. Особого внимания заслуживает: возможность создания сложных геометрических форм, недостижимых при использовании классических методов; существенное сокращение временных затрат на этапе проектирования; оптимизация материальных ресурсов при сохранении требуемых эксплуатационных характеристик. Перспективность направления генеративного дизайна и топологической оптимизации.

Дальнейшее развитие рассмотренных подходов будет способствовать созданию отечественной конкурентоспособной продукции с улучшенными технико-экономическими характеристиками.

Список литературы:

1. Основы автоматизированного проектирования // Статьи о радиотехнике, технологиях, чертежах, 3D-моделировании URL: <https://kompaswork.ru/stati/12-stati/44-osnovy-avtomatizirovannogo-proektirovaniya.html> (дата обращения: 25.03.2025).
2. Межгосударственный стандарт «Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения». ГОСТ 2.052—2021. – С изм. и допол. в ред. от 2022.

3. Чемпинский Л. А. Основы геометрического моделирования в машиностроении: конспект лекций / Л.А. Чемпинский. - Самара: Изд-во Самарского университета. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 160 с.: ил. с.
4. Мошкова, Т. В. Проблема синтеза модели 3D объекта по его проекционным изображениям. Аналитический обзор / Т. В. Мошкова, С. И. Ротков, В. А. Тюрина // Научная визуализация. – 2018. – Т. 10, № 1. – С. 135-156. – DOI 10.26583/sv.10.1.11.
5. Цифровое проектирование с применением генеративного дизайна / С. И. Анциферов, А. О. Лютенко, Е. А. Сычев, Л. А. Сиваченко // Техническая эстетика и дизайн-исследования. – 2019. – Т. 1, № 4. – С. 38-44. – DOI 10.34031/2687-0878-2019-1-4-38-44.
6. Пахтаева, А. Я. Методы генеративного дизайна / А. Я. Пахтаева // Ноэма (Архитектура. Урбанистика. Искусство). – 2021. – № 2(7). – С. 213-221.
7. Solid Edge: Генеративное моделирование // cadis URL: <https://www.cad-is.ru/> (дата обращения: 25.03.2025).
8. Топологическая оптимизация или генеративный дизайн? // Autodesk URL: [https://isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=19982](https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19982) (дата обращения: 25.03.2025).
9. Боровков, А. И. бионический дизайн / А. И. Боровков, Л. А. Щербина, Ю. А. Рябов // Бионика - 60 лет. Итоги и перспективы : Сборник статей Первой Международной научно-практической конференции, Москва, 17–19 декабря 2021 года / Под редакцией А.П. Карпенко. – Москва: Ассоциация технических университетов, 2022. – С. 18-29. – DOI 10.53677/9785919160496\_18\_29.
10. Petroff R. Методическое пособие по работе в разделе "Генеративный дизайн" для Siemens SolidEdge ST10.
11. Фомин, В. В. Топологическая оптимизация деталей с помощью Компас-3D / В. В. Фомин // Студенческая наука - взгляд в будущее : Материалы XIX Всероссийской студенческой научной конференции, Красноярск, 27–29 февраля 2024 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2024. – С. 83-86.
12. Топологическая оптимизация элементов конструкций с учетом структурной неоднородности материала с использованием градиентного метода / В. А. Левин, К. М. Зингерман, А. В. Вершинин, П. А. Васильев // Чебышевский сборник. – 2022. – Т. 23, № 4(85). – С. 308-326. – DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-4-308-326.
13. Раков, А. П. Современные компьютерные технологии в архитектуре / А. П. Раков, А. С. Павлюк, Е. С. Шафрай // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и градостроительство: Сборник статей 80-ой юбилейной Всероссийской научно-технической конференции, Самара, 17–22 апреля 2023 года / Под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пищуле-ва, Е.А. Ахмедовой. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2023. – С. 857-870.

14. 10 Best Additive Manufacturing Software of 2025 // [erp-information.com](https://www.erp-information.com) URL: <https://www.erp-information.com/additive-manufacturing-software> (дата обращения: 25.03.2025).
15. Спрукуль, В. О. Внедрение аддитивных технологий / В. О. Спрукуль // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 3, № 13. – С. 304-306.
16. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 656 с.
17. Варакин, Д. А. Параметры программ-слайсеров, влияющие на качество деталей машин, изготовленных с помощью 3D печати / Д. А. Варакин, В. А. Зорин // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2023. – № 1. – С. 250-254.
18. Исследование программных способов корректировки дефектов послойного наплавления при печати на 3D-принтере / М. В. Ефременкова, Я. В. Попинако, С. А. Кизилов, М. С. Никитенко // Наука и инновационные технологии. – 2023. – № 1(26). – С. 104-111. – DOI 10.33942/sit042250.
19. Добрынин, С. Л. Проблематика управления аддитивным производством на основе технологий промышленного интернета вещей / С. Л. Добрынин, В. Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 7-13. – DOI 10.36622/VSTU.2021.17.2.001.
20. 10 Companies Offering Cutting-Edge 3D Printing Simulation Software // AMFG URL: <https://amfg.ai/> (дата обращения: 25.03.2025).