УДК 658.5

ПРОИЗВОДСТВО СЛОЖНЫХ ВНЕШНИХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ 3D-ПЕЧАТИ

Низамов Д.А.
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева - КАИ
Россия, г. Казань

Современная авиационная промышленность постоянно развивается и ищет инновационные технологии, которые позволяют значительно снижать массу летательных аппаратов, что напрямую влияет на уменьшение расхода топлива и повышение экономичности полётов. Кроме того, важными задачами являются сокращение времени, необходимого на проектирование и изготовление деталей, а также увеличение аэродинамической эффективности конструкций для улучшения летных характеристик. Одним из наиболее перспективных и быстроразвивающихся направлений в этой области является использование аддитивных технологий, прежде всего 3D-печати. Эти технологии открывают новые возможности для производства сложных внешних аэродинамических элементов — таких как обтекатели, законцовки крыла, воздухозаборники и другие детали, которые отвечают за формирование гладкого и эффективного обтекания воздушного потока вокруг летательного аппарата. Применение 3D-печати позволяет создавать элементы сложной геометрии, невозможной или крайне трудоёмкой при традиционных методах производства, интегрировать несколько функций в одну деталь, снижать вес конструкции и ускорять процесс прототипирования и серийного производства. Таким образом, аддитивные технологии становятся ключевым инструментом для улучшения аэродинамики, повышения топливной эффективности и сокращения сроков выхода новых моделей на рынок.

Внешние аэродинамические элементы самолёта выполняют важнейшую функцию обеспечения оптимального распределения давления и минимизации сопротивления. К ним относятся: обтекатели и капоты, обводы фюзеляжа, законцовки крыла, кили и стабилизаторы, воздухозаборники и сопла [1].

Эти элементы обладают исключительно сложной геометрией, которая разрабатывается и оптимизируется с использованием современных методов компьютерного моделирования, в частности CFD-моделирования (Computational Fluid Dynamics). CFD позволяет детально анализировать поведение воздушного потока вокруг конструкции, выявлять зоны турбулентности, перепады давления и другие аэродинамические характеристики, что помогает создавать детали с максимальной эффективностью обтекания и минимальным сопротивлением воздуха.

Традиционные методы производства таких деталей включают фрезерование, штамповку и формование из композитных материалов. Однако эти

технологии требуют изготовления дорогостоящей оснастки, штампов и пресс-форм, что существенно увеличивает затраты и время на подготовку производства. Кроме того, циклы подготовки могут занимать недели и даже месяцы, особенно при необходимости внесения изменений в конструкцию, что снижает гибкость производства и удлиняет сроки вывода новых изделий на рынок.

В отличие от традиционных способов, 3D-печать (аддитивное производство) представляет собой процесс послойного создания изделий непосредственно из цифровой модели, что значительно упрощает и ускоряет процесс изготовления. С помощью аддитивных технологий можно быстро производить сложные детали без необходимости создания инструментальной оснастки, а также легко вносить конструктивные изменения в процессе производства.

Основные технологии 3D-печати, применяемые в авиационной промышленности, включают: FDM (Fused Deposition Modeling) — метод послойного наплавления термопластичных материалов, подходящий для изготовления прототипов и некоторых функциональных деталей из полимеров; SLA/DLP (Stereolithography/Digital Light Processing) — технологии фотополимеризации, обеспечивающие высокую точность и качество поверхности деталей, часто используются для изготовления форм и сложных пластиковых элементов; SLS/SLM (Selective Laser Sintering/Melting) — технологии селективного лазерного спекания или плавления порошковых материалов, позволяющие создавать прочные металлические и пластиковые детали с высокой детализацией; EBM (Electron Beam Melting) — метод плавления металлического порошка электронным лучом, обеспечивающий высокую плотность и качество металлических изделий, применяемый для изготовления нагруженных конструкций и компонентов [2].

Использование аддитивных технологий в производстве аэродинамических элементов значительно расширяет возможности современной авиации и позволяет решать задачи, недоступные при традиционных методах. Прежде всего, эти технологии обеспечивают заметное повышение производительности — за счёт минимизации количества операций и отсутствия необходимости изготавливать сложное вспомогательное оборудование. Материальные затраты сокращаются благодаря точному контролю использования сырья и минимизации отходов, что особенно важно при работе с дорогими материалами, такими как титановые сплавы. Временные затраты также снижаются — процесс создания деталей становится быстрее, так как отсутствуют длительные циклы подготовки и замены инструментов.

Ключевое преимущество аддитивного производства — возможность создавать сложную и уникальную геометрию деталей без необходимости их сборки из множества отдельных элементов. Например, винглеты с внутренними каналами для теплоотвода или подачи воздуха производятся как монолитные конструкции, что повышает надежность и функциональность изделия. Благодаря топологической оптимизации и применению решётчатых структур масса деталей значительно уменьшается, что положительно влияет на

топливную эффективность и общую эксплуатационную надежность авиационной техники.

Цикл проектирования и производства сокращается — от разработки CAD-модели до получения физического прототипа проходит всего несколько дней, что критично для быстрого внедрения инноваций и корректировок. При этом стоимость прототипирования и малосерийного производства резко снижается, что открывает перспективы для адаптации изделий под конкретные задачи и требования.

В авиационной отрасли ведущие мировые компании уже активно используют 3D-печать. Airbus, например, применяет напечатанные обтекатели антенн и элементы воздуховодов на самолётах серии A350. Boeing внедряет более 60 компонентов из титановых порошков, включая внешние обводы, что снижает вес и упрощает конструкцию. GE Aviation серийно производит сопловые вставки для турбовентиляторных двигателей LEAP, напечатанные с использованием технологии электронно-лучевого плавления.

В России аддитивное производство развивается в структурах ОДК, ЦАГИ и НИИ авиационных материалов. Здесь ведутся интенсивные исследования по созданию оптимизированных обтекателей и элементов обшивки из высокопрочных титановых сплавов и полимеров, что говорит о растущем интересе и потенциале данной технологии в отечественной авиации [3].

Однако у 3D-печатных аэродинамических элементов есть и недостатки. Поверхность изделий после печати обычно имеет высокую шероховатость, что негативно сказывается на ламинарности воздушного потока, снижая аэродинамические характеристики. Необходимость тщательной постобработки увеличивает сложность и трудоёмкость производства. Наиболее серьёзной проблемой остаётся сертификация и испытания на усталостную прочность — эти процедуры требуют значительного времени и ресурсов, так как необходимо гарантировать безопасность и долговечность деталей в экстремальных условиях эксплуатации.

Необходимость проведения исследований в различных направлениях обусловлена стремлением повысить качество и функциональность деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий, что особенно важно для авиационной промышленности. Одним из ключевых направлений таких исследований является постобработка с использованием методов плазменного или лазерного сглаживания поверхности. Эти методы позволяют значительно снижать параметр шероховатости, достигая значений $Ra<0,8$ мкм, что соответствует требованиям к внешним поверхностям самолётов и обеспечивает высокую аэродинамическую эффективность.

Таким образом, аддитивные технологии представляют собой мощный инструмент для создания высокотехнологичных аэродинамических элементов с уникальными свойствами. Сравнение традиционных и аддитивных технологий производства аэродинамических элементов представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнение традиционных и аддитивных технологий производства аэродинамических элементов

Критерий сравнения	Традиционные методы	3D-печать	Вывод
Сложность геометрии	Ограничена возможностями инструмента и оснастки	Практически не ограничена	3D-печать позволяет реализовать сложные аэродинамические формы
Скорость производства	Высокая при массовом производстве	Высокая при малосерийном и прототипировании	3D-печать эффективна при разработке и мелких партиях
Масса изделия	Зависит от используемого материала	Можно снизить за счёт топологической оптимизации	Лёгкие решётчатые структуры уменьшают массу
Стоимость подготовки	Высокая (оснастка, штампы)	Минимальная (требуется только 3D-модель)	Особенно выгодно для малых серий
Точность и качество поверхности	Высокая после мехобработки	Требуется постобработка	Полировка или химическая обработка устраняют шероховатость
Материалы	Металлы, композиты, сплавы	Металлические и полимерные порошки	Ассортимент материалов постоянно расширяется

В заключении хотелось бы добавить, что перспективы развития аддитивных технологий в авиации связаны с расширением функциональных возможностей создаваемых элементов. В ближайшем будущем можно ожидать, что 3D-печать будет не только производить сложные аэродинамические формы, но и интегрировать в них разнообразные функциональные структуры [4]. Среди таких интеграций — встроенные датчики давления, системы обогрева и каналы для прокладки кабелей, что повысит надежность и снизит вес конструкции, а также сократит сборочное время.

Кроме того, с развитием сертификации и стандартизации материалов для аддитивного производства, 3D-печать станет общепринятым стандартом при изготовлении обводов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), легких самолетов и экспериментальных моделей. Это связано с возможностью быстро и эффективно получать сложные аэродинамические формы, адаптированные под конкретные задачи.

Список литературы:

1. Ковалевская Ж.Г., Безбородов В.П. Основы материаловедения. Конструкционные материалы: учебное пособие / Ж.Г. Ковалевская, В.П., Безбородов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 110 с.

2. Раевский Е.В., Цыганкова А.Л. Технология лазерного спекания металла вышла на новый уровень промышленного применения // Аддитивные технологии. 2016. № 1. С. 13-15.

3. Злобина И.В., Бекренев Н.В. Исследование влияния ультразвуковой пропитки на физико-механические характеристики армированных углеродными волокнами полимерных композиционных материалов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 2 (85). С. 72-78.

4. Зеленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении // пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.