

**УДК 338.49****Аддитивное производство в авиации: текущее состояние и перспективы развития****Кожиев Александр Юрьевич**

Аспирант,  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
115409, Российская Федерация, Москва, Каширское шоссе, 31;  
e-mail: lion\_1998@inbox.ru

**Аннотация**

Статья посвящена теме оптимизации производства изделий при помощи инновационных технологий, к которым относятся аддитивные технологии. Аддитивное производство имеет огромные преимущества в создании прототипов и быстром производстве, а также потенциал в интегрированном проектировании, снижении стоимости и веса, что подходит для применения в авиации. Развитие производства продукции для гражданской и военной авиации с применением аддитивных технологий ведется интенсивными темпами. В данной статье приводится информация о текущем состоянии процесса интеграции аддитивных технологий в промышленное производство в авиаиндустрии, а также об изменении процессов проектирования и конструирования изделий. В заключении показано, что аддитивные технологии имеют ряд преимуществ, благодаря которым уже в настоящее время свершается революция в области промышленного производства, в частности в авиационной отрасли, что влияет на перестроение бизнес-моделей крупных предприятий отрасли, а также изменение логистических цепочек при производстве комплектующих и запасных частей для гражданской и военной авиации. Аддитивное производство удовлетворяет двум главным характеристикам, необходимым для создания изделий в области авиации – АТ позволяет обеспечивать высокий уровень безопасности при сокращении технико-экономических издержек производства изделий, снижая вес, время производства деталей и их стоимость.

**Для цитирования в научных исследованиях**

Кожиев А.Ю. Аддитивное производство в авиации: текущее состояние и перспективы развития // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2024. Том 14. № 7А. С. 429-435.

**Ключевые слова**

Авиация, аддитивное производство, аддитивные технологии, промышленное производство, бизнес-модели, логистические цепочки.

## **Введение**

3D-печать, также известная как аддитивное производство (далее - АП), произвела революцию в различных отраслях промышленности, включая аэрокосмическую. В авиации для силовых установок и компонентов аддитивные технологии (далее – АТ) предлагают несколько важных применений, которые способны изменить способ проектирования и производства авиационных двигателей и связанных с ними деталей. АП для авиационных силовых установок особенно перспективно в таких областях применения, как легкие и высокопроизводительные компоненты, быстрое создание прототипов и итерации дизайна, изготовление на заказ и по требованию, снижение сложности цепочки поставок и совершенствование материалов. По мере развития технологий можно ожидать появления еще более инновационных конструкций, повышения эффективности, снижения воздействия на окружающую среду, а также значительных возможностей для роста рынка [Boretti, 2024].

### **Текущее состояние процесса внедрения АТ в производство продукции в области авиации**

В настоящее время авиационная промышленность использует 3D-печать для производства легких и сложных деталей, которые повышают экономию топлива и общую производительность. Данная технология предоставляет возможность создания «деликатных» деталей двигателя, воздушных трубок и конструктивных элементов, производство которых было бы существенно затруднено или невозможно с помощью традиционных процессов производства. Кроме того, аддитивные технологии позволяют инженерам сокращать финансовые и временные издержки при воспроизводстве проектов и готовых изделий при помощи быстрого прототипирования или при замене задействованных деталей, а также аддитивное производство по требованию минимизирует затраты на хранение запасов. Важно отметить тот факт, что аддитивные технологии сокращают количество отходов, в связи с чем относятся к устойчивым методам производства [Абрамов, Путилов, Шамаева, 2023].

Критически важным аспектом применения технологий АП является возможность изготовления сложных деталей и персонализированный подход при выпуске продукции. Благодаря АП становится возможным создание легких конструкций, улучшающих экономию топлива и оптимизирующих эксплуатационные расходы.

Основными элементами, производимыми с помощью технологий 3-х мерной печати в авиационной промышленности, являются топливные форсунки, лопатки турбин, детали камеры сгорания и так далее. В последнее время растет необходимость создания изделий, обладающих легкой, но прочной конструкцией: лонжеронов, переборок, воздухопроводов, кронштейнов, формованных вентиляционных решеток, каркасов сидений. В связи с этим возрастает осознание необходимости инноваций в области композитных материалов и сплавов [Тилинин, 2019].

3D-печать помогает воспроизводить легкие и сложные геометрические формы, что снижает стоимость жизненного цикла изделий. Аддитивные технологии также способны резко сократить потребление ресурсов, энергии и связанные с процессом выбросы CO<sub>2</sub> на единицу ВВП [Petrovic et al., 2021]. В авиационной отрасли это может привести к экономии топлива, где каждый килограмм сэкономленного материала сокращает ежегодные расходы на 3000 долларов США [Reeves, 2012].

Целенаправленная работа по развитию аддитивных технологий в авиастроении уже приносит свои плоды: так, в России впервые по аддитивной технологии с применением металлопорошковой композиции изготовлен завихритель фронтального устройства камеры сгорания перспективного авиационного двигателя ПД-14, отвечающий всем требованиям конструкторской документации. Цикл изготовления завихрителей данного вида в среднем в 10 раз короче, чем с применением технологии литья по выплавляемым моделям. Изготовление 3D-деталей осуществляется с применением технологии SLS – селективного лазерного спекания. Таким образом, с помощью данной технологии возможно получать изделия непосредственно из порошка, минуя промежуточные и подготовительные операции.

Качественная оценка интегрирования АТ показала, что эта технология имеет потенциал для снижения производственных затрат на 170-593 миллиарда долларов США, общего потребления первичной энергии на  $2,5E18$  -  $9,3E18$  Дж и выбросов  $CO_2$  на 130 - 525 тонн к 2025 году [Wohlers et al., 2019]. Одной из отраслей производства, в которой 3D-печать имеет широкие перспективы, является авиационная промышленность. Потенциал экономии топлива за счет еще облегчения веса деталей, изготовленных с помощью 3D-печати, является наибольшим преимуществом в области авиации. Кроме того, производство в авиационной отрасли способно снизить выбросы  $CO_2$ , связанные с выводом оборудования из эксплуатации, и общие потребности в первичной энергии [Powder Metallurgy Review, 2013].

Кроме того, аддитивные технологии сокращают время простоя, общие эксплуатационные затраты и загрузку производственных мощностей [2]. С помощью АП можно удовлетворить потребности заказчиков, улучшить управление цепочками поставок и снизить потребность в управлении запасами, что в корне изменяет традиционную бизнес-модель действующих на глобальном рынке авиации компаний [Абрамов, 2023]. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики между аддитивным и традиционным производством.

**Таблица 1 - Сравнительные характеристики между аддитивным и традиционным видами производства изделий**

| <b>Факторы</b>      | <b>Технология аддитивного производства</b>                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Традиционное производство</b>                                                                                                                                                                          |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Стоимость           | Продукция может производиться по сравнительно низким ценам, однако ограничена малыми и средними партиями.                                                                                                                                                                                                | Сравнительно дорогое производство для небольших партий продукции по причине затрат, связанных с литьем форм, оснасткой, отделкой и другими различными процессами, которые идут на изготовление продукции. |
| Время               | Изделия могут быть изготовлены в короткие сроки, поскольку АП создает изделия непосредственно на основе САД-модели, что помогает сэкономить время на поставку конечной продукции за счет сокращения этапа времени для производства, запуска цепочки поставок, а также увеличения зависимости от запасов. | Время изготовления продукции велико, так как зависит от наличия пресс-форм, оснастки и т.д.                                                                                                               |
| Расход ресурсов     | Только оптимальное количество, необходимое для производства продукции.                                                                                                                                                                                                                                   | Чрезвычайно высокий.                                                                                                                                                                                      |
| Сложность продукции | Используется для изготовления сложных геометрических форм и изделий. Возможности изделий ограничиваются только фантазией инженера-конструктора.                                                                                                                                                          | Сложные геометрические формы не могут быть изготовлены. Приходится изготавливать множество различных деталей по отдельности и собирать их после изготовления.                                             |

| <b>Факторы</b>                  | <b>Технология аддитивного производства</b>                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Традиционное производство</b>                                                       |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Постпроизводственная обработка  | В зависимости от техники и используемого материала после изготовления не требуется практически никакой обработки.                                                                                                                                                                                             | В большинстве случаев требуется определенная постобработка.                            |
| Качество материала и применение | Качество материала зависит от используемой технологии. Изначально 3D-изготовленные детали не использовались в несущих конструкциях, но развитие технологии быстро улучшает качество материала, что приводит к более частому использованию аддитивно произведенных компонентов в конструкциях готовых изделий. | Благодаря превосходному качеству продукция всегда использовалась для переноски грузов. |
| Материальные потери             | Сырье практически не расходуется, поскольку его можно использовать повторно.                                                                                                                                                                                                                                  | Сопряжено с большими потерями материала из-за процессов отделки после изготовления.    |
| Прототипирование                | Чрезвычайно полезен для создания прототипов и оценки концепций продуктов. Позволяет вносить изменения в дизайн и проводить итерации.                                                                                                                                                                          | Очень дорого и трудоемко. Не подходит для прототипов и концептов продуктов.            |

### **Перспективы развития траектории внедрения аддитивных технологий в промышленное производство в области авиации**

Возможности аддитивного производства будут увеличиваться параллельно с развитием программного обеспечения. С помощью обновленного ПО будет обеспечена возможность создания комплексных систем для оптимизированной автоматизации процессов, создания более качественных моделей для отслеживания и наиболее точного корректирования недочетов, а также для повышения уровня безопасности и эффективности осуществляемых операций при производстве изделий [Евтодьева, 2020]. Для развития данной области производства в авиации необходимо создать единое информационное пространство, в котором все транзакции, связывающие поставщиков, производителей и конструкторов, будут транспарентны и позволят наилучшим образом упростить коммуникацию и процедуру принятия решений в области производства готовой продукции.

В среднесрочной перспективе развития АТ на первый план выйдет стратегия, предполагающая разработку комплексных, а также новых, высокофункциональных продуктов, таким образом изменив логистические цепочки, существующие на сегодняшний день. Предполагается, что в долгосрочной перспективе предприятия будут обладать возможностью существенно увеличить технологичность производства, а также устранить посредников из цепочки поставок.

### **Заключение**

Таким образом, аддитивные технологии имеют ряд преимуществ, благодаря которым уже в настоящее время свершается революция в области промышленного производства, в частности в авиационной отрасли, что влияет на перестроение бизнес-моделей крупных предприятий отрасли, а также изменение логистических цепочек при производстве комплектующих и

запасных частей для гражданской и военной авиации. Аддитивное производство удовлетворяет двум главным характеристикам, необходимым для создания изделий в области авиации – АТ позволяет обеспечивать высокий уровень безопасности при сокращении технико-экономических издержек производства изделий, снижая вес, время производства деталей и их стоимость. Основная часть вложений, которая в перспективе будет направляться на развитие процесса внедрения АТ в авиации, в среднесрочной и долгосрочной перспективе будет связана с программным обеспечением, необходимым для оптимизации автоматизации и создания более точных моделей для производства компонентов со сложной геометрией.

## Библиография

1. Additive manufacturing study shows cuts in material consumption and reduced CO2 Emissions (2013), Powder Metallurgy Review. Источник: <http://www.ipmd.net/articles/002490.html>.
2. Berman, B. 3-D printing: The new industrial revolution // Business Horizons. — 2012. — V. 55(2). — P. 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.
3. Boretti A. A techno-economic perspective on 3D printing for aerospace propulsion // Journal of Manufacturing Processes. Volume 109, 2024. pp. 607-614.
4. Petrovic, V., Gonzalez, J.V.H., Ferrando, O.J., Gordillo, J.D., Puchades, J.R.B., & Grinan, L.P. (2021). Additive layered manufacturing: Sectors of industrial application shown through case studies. International Journal of Production Research, 49(4), 1071-1079.
5. Reeves, P., (2012). Example of Econolyst research – Understanding the benefits of Am on CO2. Источник: <http://www.econolyst.co.uk/resources/documents/files/Presentation%20-%20Nov%202012%20-%20TCT%20conference%20UK%20-%20AM%20and%20carbon%20footprint.pdf>
6. Wohlers, T.T.; Campbell, R.I.; Caffrey, T. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report; Wohlers Associates: Fort Collins, CO, USA, 2019.
7. Абрамов В.И., Путилов А.В., Шамаева Е.Ф. Формирование механизмов управления устойчивым развитием экономики промышленных отраслей и комплексов // Энергетическая политика. — 2023. — № 2(180). — С. 40–53. — DOI 10.46920/2409-5516\_2023\_2180\_40. — EDN QTFKDF.
8. Абрамов, И. В. Проблемы и перспективы цифровизации промышленных предприятий с использованием аддитивных технологий / И. В. Абрамов // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/69ECVN223.pdf>
9. Евтодьева М.Г. Аддитивное производство и дополненная реальность как новые производственные технологии в авиационной отрасли // Вестник МГИМО. 2020. №5 (74). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnoe-proizvodstvo-i-dopolnennaya-realnost-kak-novye-proizvodstvennye-tehnologii-v-aviatsionnoy-otrasli>.
10. Тилинин, М. В. Аддитивные технологии в отечественном авиастроении: текущие позиции и направления развития / М. В. Тилинин, Б. М. Прибытков. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2019. — № 47 (285). — С. 133-138. — URL: <https://moluch.ru/archive/285/64365/>.

## Additive manufacturing in aviation: status and development prospects

**Aleksandr Yu. Kozhiev**

Postgraduate student,  
National Research Nuclear University “MEPHI”,  
115409, 31, Kashirskoe sh., Moscow, Russian Federation;  
e-mail: lion\_1998@inbox.ru

## Abstract

This article focuses on the topic of optimizing the production of products using innovative technologies, which include additive technologies. Additive manufacturing has tremendous

advantages in prototyping and rapid production, as well as the potential for integrated design, cost and weight reduction, which is suitable for aviation applications. The development of additive manufacturing for civil and military aviation products is progressing at an intensive pace. This article provides information on the current status of the process of integrating additive technologies into industrial production in the aviation industry, as well as the changes in product design and construction processes. The article is devoted to the topic of optimizing the production of products using innovative technologies, which include additive technologies. Additive manufacturing has huge advantages in prototyping and rapid production, as well as the potential for integrated design, cost and weight reduction, which is suitable for aviation applications. The development of production of products for civil and military aviation using additive technologies is proceeding at an intensive pace. This article provides information on the current state of the process of integrating additive technologies into industrial production in the aviation industry, as well as on changes in the processes of designing and constructing products. In conclusion, it is shown that additive technologies have a number of advantages, thanks to which a revolution is already underway in the field of industrial production, in particular in the aviation industry, which affects the restructuring of business models of large enterprises in the industry, as well as changing logistics chains in the production of components and spare parts for civil and military aviation. Additive manufacturing satisfies two main characteristics necessary for the creation of products in the field of aviation – IT allows for a high level of safety while reducing the technical and economic costs of manufacturing products, reducing the weight, production time of parts and their cost.

#### For citation

Kozhiev A.Yu. (2024) Additivnoe proizvodstvo v aviatsii: tekushchee sostoyanie i perspektivy razvitiya [Additive manufacturing in aviation: status and development prospects]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 14 (7A), pp. 429-435.

#### Keywords

Aviation, additive manufacturing, additive technologies, industrial production, business models, supply chains.

#### References

1. Additive manufacturing study shows cuts in material consumption and reduced CO2 emissions (2013). Powder Metallurgy Review. Retrieved from <http://www.ipmd.net/articles/002490.html>
2. Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
3. Boretti, A. (2024). A techno-economic perspective on 3D printing for aerospace propulsion. *Journal of Manufacturing Processes*, 109, 607-614.
4. Petrovic, V., Gonzalez, J. V. H., Ferrando, O. J., Gordillo, J. D., Puchades, J. R. B., Grinan, L. P. (2021). Additive layered manufacturing: Sectors of industrial application shown through case studies. *International Journal of Production Research*, 49(4), 1071-1079.
5. Reeves, P. (2012). Example of Econolyst research – Understanding the benefits of AM on CO2. Retrieved from <http://www.econolyst.co.uk/resources/documents/files/Presentation%20-%20Nov%202012%20-%20TCT%20conference%20UK%20-%20AM%20and%20carbon%20footprint.pdf>
6. Wohlers, T. T., Campbell, R. I., Caffrey, T. (2019). 3D printing and additive manufacturing state of the industry: Annual worldwide progress report. Wohlers Associates: Fort Collins, CO, USA.
7. Abramov, V. I., Putilov, A. V., Shamaeva, E. F. (2023). Formation of mechanisms for managing sustainable development of the economy of industrial sectors and complexes. *Energy Policy*, (2), 40–53. [https://doi.org/10.46920/2409-551620232180\\_40](https://doi.org/10.46920/2409-551620232180_40)
8. Abramov, I. V. (2023). Problems and prospects of digitalization of industrial enterprises using additive technologies.

- 
- Bulletin of Eurasian Science, 15(2). Retrieved from <https://esj.today/PDF/69ECVN223.pdf>
9. Evtodieva, M. G. (2020). Additive manufacturing and augmented reality as new production technologies in the aviation industry. Bulletin of MGIMO, (5), 74. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnoe-proizvodstvo-i-dopolnennaya-realnost-kak-novye-proizvodstvennye-tehnologii-v-aviatsionnoy-otrasli>
10. Tilinina, M. V., Pribytkov, B. M. (2019). Additive technologies in domestic aircraft manufacturing: Current positions and development directions. Young Scientist, (47), 133-138. Retrieved from <https://moluch.ru/archive/285/64365/>