

Ministry of Science and Education of the Russian Federation

---

PETER THE GREAT  
SAINT PETERSBURG POLYTECHNIC UNIVERSITY

# **ADDITIVE TECHNOLOGIES**

## **MATERIALS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES**



**ПОЛИТЕХ-ПРЕСС**

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

Saint Petersburg  
2021

Reviews:

Member of the Russian Academy of Sciences *L. I. Leontev*

Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering, professor, head of the Pressure Metal Treatment Department of Samara National Research University

*F. V. Grechnikov*

Authors:

A. I. Rudskoy, A. A. Popovich, A. F. Iliushchenko, P. A. Vitiaz, D. E. Kaledina

**Additive technologies. Materials and technological processes** / A. I. Rudskoy [et al.]. – St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2021. – 515 p.

The monograph provides classification and general information about the main categories of additive technologies and their application. The authors consider the peculiarities of additive technologies with the use of new materials and the prospects for their development in the Russian Federation and Belarus. The information about modern materials and equipment for making products in accordance with the technologies of additive manufacturing is presented.

The monograph is intended for a wide range of specialists working in industry and scientific institutions, as well as those enrolled in master's degree and postgraduate programs "Metallurgy", "Mechanical Engineering", "Design and Technological Support of Machinery Production", "Material Science and Technology of Materials".

# Оглавление

Введение . . . . .	6
<b>Глава 1. Перспективные материалы для аддитивных технологий . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1. Металлические материалы. . . . .	9
1.2. Керамические материалы . . . . .	129
1.3. Композиционные материалы . . . . .	195
1.4. Функционально-градиентные материалы. . . . .	235
1.5. Полимерные материалы . . . . .	259
<b>Глава 2. Моделирование процессов аддитивного производства . . . . .</b>	<b>278</b>
2.1. Теоретические основы процесса аддитивного производства. . . . .	279
2.2. Модели процесса селективного лазерного плавления . . . . .	286
2.3. Математическое описание тепловых процессов при селективном лазерном плавлении порошков, формирующих изделие . . . . .	293
2.4. Математическое описание напряженно-деформированного состояния изделий, полученных селективным лазерным плавлением порошков . . . . .	307
2.5. Моделирование процесса получения функционально-градиентных материалов . . . . .	315
2.6. Разработка трехмерных компьютерных моделей конструкций для аддитивного электродугового выращивания. . . . .	350
<b>Глава 3. Технологии аддитивного производства. . . . .</b>	<b>352</b>
<b>Глава 4. Оборудование для аддитивного производства . . . . .</b>	<b>412</b>
<b>Глава 5. Рынок и перспективы аддитивного производства . . . . .</b>	<b>450</b>
5.1. Рынок аддитивного производства. . . . .	450
5.2. Перспективы металлургических аддитивных технологий в Российской Федерации, Беларуси и за рубежом . . . . .	468
Заключение . . . . .	471
Библиографический список. . . . .	473

## ВВЕДЕНИЕ

Экономика приобретает инновационный характер вследствие инновационного развития в первую очередь сферы материального производства, в основе которого лежат технологии. Именно технологии определяют положение экономики страны в мире, ее стратегические позиции. Технологии позволяют применять новые высокоэффективные материалы, новые методы управления и таким образом обуславливают новое функциональное и интеллектуальное содержание продукта. Отсутствие технологий ограничивает творческий потенциал ученых и конструкторов, вынуждает их применять те технические решения, которые уже есть в их распоряжении, а не те, которые требуются для достижения целей. Поэтому технологии являются главным объектом инновационной деятельности.

Широко применяемые в настоящее время технологии формообработки нередко не способны обеспечить необходимые обоснованные элементы, содержащие сложные геометрические формы, тонкие стенки, внутренние каналы охлаждения и прочие конструктивные особенности, для реализации которых с помощью традиционных технологий, в частности, приходится сваривать отдельные части детали.

Альтернативными существующим традиционным субтрактивным методам обработки, таким как механические, электрофизические и электрохимические и пр., считаются методы аддитивного производства. В отличие от классического формообразования, где от заготовки отрезается все лишнее при изготовлении детали, с использованием технологий аддитивного производства (АП) деталь выращивается из предварительно подготовленного порошкового материала, частицы которого послойно скрепляются между собой в каждом слое, а слои — между собой.

Применяя аддитивные технологии (АТ), можно обеспечить большую свободу в выборе конфигурации изделия, что позволяет оптимизировать массовые и функциональные параметры детали за счет использования сотовых и иных сложных конструкций, уменьшения толщины стенок, а также за счет объединения нескольких деталей и изготовления их как единое целое. Немаловажный фактор — существенное уменьшение сроков изготовления первых образцов деталей (на этапе исследований и разработки новых изделий) и экономия материала.

Предшественниками современных аддитивных технологий считаются две оригинальные технологии, появившиеся в XIX веке, — фотоскульптура и топография. У истоков современного аддитивного производства, один из наиболее известных методов которого — стереолитография (SL; *от англ.* stereolithography), стоит подход, предложенный в 1951 году Отто Мунцем. Система Мунца использовала поршневой механизм для последовательной избирательной засветки и отвердевания фотополимера по сечениям сканируемого объекта.

В 1977 году Вин Келлин Свейнсон предложил способ получения трехмерных объектов посредством отверждения фоточувствительного полимера в точке пересечения двух лазерных лучей. Примерно в это же время начинают появляться технологии послойного синтеза из порошковых материалов.

В 1980-х годах американский ученый Чарлз Халл, работая в компании Ultra Violet Products, экспериментировал с УФ-отверждаемыми материалами, подвергая их лазерному сканированию. В процессе работы он обнаружил, что можно производить твердые полимерные структуры, отверждая последующий слой над предыдущим слоем, ему удалось изготовить трехмерный твердый объект. В 1986 году Халл предложил способ послойного синтеза с использованием ультрафиолетового излучения, сфокусированного на тонкий слой фотополимерной смолы. Он же и ввел в оборот термин «стереолитография». Патент Халла признан наиболее значимой работой, благодаря которой была создана компания 3D Systems — компания, первой приступившая к коммерческой деятельности в области послойного синтеза.

Примерно в то же время были разработаны методы аддитивного производства с использованием нагрева лазерным и электронным лучом. Эти методы внедрены в производство в 1990-х годах, что позволило применять аддитивные технологии для изготовления металлических объектов [69].

В 1990 году аддитивные технологии с использованием нагрева частиц порошков металлов лазерным или электронным лучом для получения трехмерных объектов — металлургические АД стали частью мирового производства. Металлургические аддитивные технологии, разделяемые по способу формирования слоя на два основных направления — технология Bed Deposition и технология Direct Deposition, по большинству характерных признаков относят к технологиям порошковой металлургии, которые используются в промышленном производстве уже более 100 лет.

В основе порошковой металлургии — области, где наиболее тесно сплетены научные достижения и эффективные технологические решения, — лежит ряд перспективных и прогрессивных теоретических разработок, технических и технологических решений, главные принципы которых были заложены П. Г. Соболевским и В. В. Любарским. В дальнейшем значительную роль в развитие порошковой металлургии внесли такие видные ученые, как М. Бальшин, С. Кипарисов, О. Роман, Ю. Дорофеев, Г. Жданович, В. Перельман, В. Скороход, В. Шатт, Г. Хаузнер, Ф. Айзенкольб и многие другие [763].

В 50–60 годы XX века на территории России, Беларуси и Украины были созданы специализированные кафедры порошковой металлургии, а позднее организованы специализированные центры по данному направлению. В частности, в Советском Союзе один из таких центров — Центр порошковой металлургии в Перми, который возглавлял выдающийся ученый с мировым именем академик РАН В. Н. Анциферов.

Родоначальником и основателем порошковой металлургии Беларуси был Олег Владиславович Роман, обучавшийся в очной аспирантуре ЛПИ, — видный ученый, талантливый организатор и руководитель науки и производства, академик НАН Беларуси, лауреат Государственной премии БССР и премии

Совета министров СССР, заслуженный деятель науки и техники Беларуси, доктор технических наук, профессор. С 2018 года Институт порошковой металлургии Беларуси, успешно решающий задачи развития науки и промышленности страны, проводящий исследования в русле мировых тенденций порошковой металлургии и материаловедения композиционных материалов, носит имя своего основателя академика Романа [666].

Технологиями XXI века называют аддитивные технологии, кроме очевидных преимуществ в скорости и нередко в стоимости изготовления изделий эти технологии имеют важное преимущество с точки зрения охраны окружающей среды, и в частности эмиссии парниковых газов и теплового загрязнения. Аддитивные технологии позволяют значительно снизить энергетические затраты при создании самых разных видов продукции.

Интерес к аддитивным технологиям, непосредственному выращиванию металлических изделий, в качестве альтернативы традиционным технологическим методам для производства товарной продукции возник в авиации, космической индустрии и энергетическом машиностроении. Мотивацией являлась экономическая целесообразность, в ряде случаев аддитивные технологии оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные технологии, а также открывают новые возможности производства изделий. Экономический эффект от внедрения АТ в масштабе предприятия, производящего элементы авиационных двигателей, оценивается в 500–700 млн руб., при этом обеспечивается изменение в подходе к конструированию: улучшение массогабаритных и иных функциональных показателей эффективности изделий.

Аддитивный подход позволяет создавать уникальные изделия с внутренней полостью структурой, например теплообменники со сложной системой каналов охлаждения любой формы, литейную оснастку для создания корпусов новых двигателей и насосов, фильтрующие элементы с сетчатой структурой, размер ячеек которой определяется размером гранул порошкового материала, и пр. С появлением данных технологий представилась возможность изготавливать детали с прямоугольной либо другой формой внутренних полостей (спиралевидного типа) и с любой формой сетчатого наполнения.

Стремительное совершенствование технологий, инновационные материалы и недоступные ранее возможности, предоставляемые АП в плане гибкости, экономичности, повышения скорости производственных процессов, а также успешные результаты применения напечатанных деталей привели к тому, что АП уверенно занимает первое место практически во всех отраслях реального сектора экономики и на всех производственных этапах.