

and elasto-optic tensors of BaTiO₃ crystal. – Phys. Rev. B, 1994, v. 50, № 9, pp. 5941-5949.

3. Kirillov A.M., Burimov N.I., Shandarov S.M. Electromechanical coupling coefficients of BaTiO₃ crystals. In: International symposium and exhibition “Ferro-piezoelectric materials and their applications” (ISEFPMA-94)/ Abstract booklet, Moscow, 1994, p. 35.

4. Кириллов А.М., Титоренко А.А., Шандаров С.М., Буримов Н.И. Коэффициенты электромеханической связи кристалла BaTiO₃. Тез. докл. Областной научно-практической конференции молодежи и студентов по техническим наукам и высоким технологиям, Томск, 1995, с.69.

УДК 539.3

И.Д. Ларченко

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Красноярск, Россия

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ: ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

***Аннотация.** В статье рассматривается влияние параметров аддитивного производства металлических изделий на их структуру и свойства. Анализируются технологии SLM и EBM, параметры печати и термообработка. Отмечаются анизотропия свойств и значение постобработки. Подчёркивается потенциал отечественных аддитивных технологий.*

I.D. Larchenko

Siberian State University of Science and Technology
named after Academician M. F. Reshetnev
Krasnoyarsk, Russia

ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR METALLIC PRODUCTS: INFLUENCE OF PRINTING PARAMETERS ON STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

***Abstract.** The article examines the influence of additive manufacturing parameters on the structure and properties of metallic parts. SLM and EBM technologies, printing parameters, and heat treatment are analyzed. Property anisotropy and the importance of post-processing are noted. The potential of domestic additive technologies is emphasized.*

Аддитивные технологии становятся важным направлением современного промышленного производства, особенно при работе с металлами. В России формируется собственная научно-техническая база, ориентированная на послойное производство металлических изделий. Эти процессы позволяют создавать сложные детали без традиционной оснастки, сокращать расход материалов и повышать экономическую эффективность, при этом структура материала и параметры технологического режима напрямую определяют прочность, пластичность и долговечность изделий [1].

Наиболее распространены технологии селективного лазерного плавления (SLM) и электронно-лучевого плавления (EBM), различающиеся источником энергии и условиями проведения процесса. В ходе плавления формируется сложная система тепловых потоков, кристаллизации и затвердевания, что приводит к разнотекстурности и анизотропии. Управление этими процессами позволяет достичь оптимального сочетания плотности и механических характеристик. Изменение мощности лазера, скорости сканирования и толщины слоя напрямую влияет на форму расплавленной ванны и морфологию кристаллитов [2].

Недостаточная энергия облучения приводит к появлению пор и неполного спекания, а избыток — к перегреву и трещинообразованию. Качество межслойного соединения зависит от скорости сканирования: высокая скорость снижает прочность, низкая — увеличивает остаточные напряжения. Оптимальная настройка мощности и скорости обеспечивает равномерное спекание и однородную микроструктуру [2].

Выбор стратегии сканирования с перекрытием треков 30–50 % позволяет снизить пористость и повысить плотность до 99 %. Толщина слоя и шаг между треками также существенно влияют на адгезию и точность деталей [3].

Предварительный подогрев платформы снижает термические градиенты, уменьшает трещинообразование и остаточные напряжения, что особенно важно при печати массивных деталей. Термообработка и горячее изостатическое прессование позволяют устранить микродефекты, повысить плотность и выровнять структуру. Сочетание оптимальных режимов печати с постобработкой обеспечивает механические свойства, сопоставимые с традиционными методами литья иковки [3, 4].

Формируемая в процессе аддитивного производства микроструктура определяет ключевые механические характеристики

металлических изделий, включая прочность, пластичность, предел текучести и усталостную долговечность. В отличие от традиционных методов обработки, таких как литьё или ковка, при послойном синтезе структура материала формируется в условиях высоких температурных градиентов и локального плавления, что приводит к появлению анизотропии. Направление слоёв и тепловой поток в процессе затвердевания создают ориентацию кристаллитов, вследствие чего свойства материала могут различаться вдоль слоёв и поперёк [1, 2].

Анизотропия проявляется в том, что прочность по направлению слоёв обычно ниже, чем в направлении перпендикулярно к слоям, что связано с особенностями межслойного сцепления. Даже при высоком качестве спекания между слоями остаются микропоры или непроваренные участки, которые становятся источником концентрации напряжений при внешней нагрузке. Корректировка стратегии сканирования, увеличение перекрытия треков и оптимизация скорости сканирования позволяют уменьшить анизотропию и улучшить механические характеристики по всем направлениям [3].

Толщина слоя и параметры лазера влияют на размер зерна и распределение дефектов: более тонкие слои способствуют формированию мелкозернистой структуры и повышают прочность, тогда как толстые слои увеличивают риск неполного проплавления. Термообработка и горячее изостатическое прессование помогают устранить микропоры, выровнять структуру и снизить остаточные напряжения, что положительно сказывается на пластичности и усталостной стойкости [3, 4].

Российская промышленность сталкивается с проблемами стандартизации оборудования, стабильности порошков и локализации компонентов. Однако отечественные установки SLM и EBM уже внедряются на предприятиях Москвы, Екатеринбурга и Томска. Государственные программы стимулируют разработку отечественных порошков, ПО и интеграцию аддитивных процессов с традиционной механической обработкой. Перспективными направлениями являются автоматическая оптимизация параметров печати, мониторинг процесса и разработка сплавов, адаптированных для слоя [5].

Анализ исследований показывает, что параметры печати металлических изделий критически влияют на структуру и свойства. Оптимизация мощности, скорости и температурных условий позволяет повысить качество и приблизить характеристики к традиционным изделиям. Для России актуальны вопросы стандартизации, сертификации материалов и подготовки квалифицированных кадров. С накоплением экспериментальных данных и внедрением

отечественного оборудования можно ожидать дальнейшего роста эффективности и надёжности аддитивных технологий.

Список использованных источников

1. Стариков А. И. Некоторые аспекты повышения качества изделий, получаемых методом аддитивных технологий // *CyberLeninka*. – 2024. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-aspekty-povysheniya-kachestva-izdeliy-poluchaemyh-metodom-additivnyh-tehnologiy?ysclid=mgkcixig3e5429924668> (дата обращения: 10.10.2025).
2. Безукладников И. И. Исследование современных методов процесса наплавки в 3D-принтерах // *CyberLeninka*. – 2024. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-sovremennyh-metodov-protssesa-naplavki-v-3d-printerah?ysclid=mgkcy77iifl45363357> (дата обращения: 10.10.2025).
3. 3D-печать металлами на отечественном оборудовании // *IndPages*. – 2022. – Режим доступа: <https://indpages.ru/tech/sdelano-v-rossii-3d-pechat-metallami-na-otechestvennom-oborudovanii> (дата обращения: 10.10.2025).
4. Неустроев Д. В. Аддитивные технологии и их применение в промышленном и транспортном строительстве // *CyberLeninka*. – 2021. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnye-tehnologii-i-ih-primenenie-v-promyshlennom-i-transportnom-stroitelstve?ysclid=mgkcywxr9n791394140> (дата обращения: 10.10.2025).
5. Металлическая 3D-печать технологией электронно-лучевого плавления (EBM) // *Industry3D*. – 2023. – Режим доступа: <https://industry3d.ru/metallicheskaya-3d-pechat-tehnologiey-elektronno-luchevogo-plavleniya-ebm-na-moskovskom-cifrovom-zavode/?ysclid=mgkczyr0u9696156946> (дата обращения: 10.10.2025).

УДК 666.223.9

М.В. Дяденко, И.А. Левицкий, А.Ч. Гордейко
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Республика Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ СТЕКОЛ И ИЗДЕЛИЙ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ