

*Ванин Ю.В.,  
старший мастер 2 группы, механо-эрозионного  
участка, сборочно-сварочного цеха 222  
АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»  
Россия, г. Химки*

## **PBF – МЕТОД 3D-ПЕЧАТИ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

***Аннотация:** в статье описана разновидность аддитивного производства деталей – технология PBF, или расплавление металла в заранее сформированном слое. Актуальность технологии заключается в относительно быстром изготовлении деталей со сложной геометрией, меньшей массой и материальными затратами на производство, чем аналогичных изделий, изготовленных с применением процессов литья или фрезерования. Перечислены основные отечественные и зарубежные виды оборудования с PBF-технологией, а также упомянут 3DP-метод изготовления деталей для аэрокосмической промышленности.*

***Ключевые слова:** PBF, 3DP, аддитивное производство, ракетостроение, аэрокосмическая промышленность.*

***Annotation:** the paper covers a special kind of component additive manufacturing, namely the PBF technology, or metal melting in a pre-formed layer. The relevance of this technology lies in the faster production of parts with complex geometry, lower weight and material costs of production compared to similar parts produced by casting or milling. The main domestic and foreign types of equipment with PBF-technology are listed, and the 3DP method of manufacturing parts for the aerospace industry is also mentioned.*

***Key words:** PBF, 3DP, additive manufacturing, rocket science, aerospace.*

Для инженеров-конструкторов аэрокосмической промышленности актуальной задачей является изготовление изделий сложной геометрии из прочных высокотехнологичных материалов. Особое внимание уделяется проектированию, изготовлению и ремонту деталей ракетных двигателей, ввиду чего крайне необходимо применение гибридных лазерных технологий, которые значительно упрощают конструкторскую работу, минимизируют экономические затраты и увеличивают срок службы деталей [1, с. 90].

Одной из наиболее надёжных технологий печати металлических изделий, проверенных годами, является PBF (Power Bed Fusion), или расплавление металла в заранее сформированном слое. Широкое применение она получила в аэрокосмической отрасли, но чаще всего PBF используется в стоматологии, так как данная технология успешно применяется при зубном протезировании. Так, количество напечатанных зубных протезов и коронок, произведённых благодаря PBF, исчисляется миллионами штук [2].

Процесс PBF, включающий выборочное (селективное) лазерное плавление (SLM) и электронно-лучевую плавку (EBM), происходит за счёт термической обработки порошкообразного материала с использованием высокомоощного лазера. Под тепловым воздействием, достигаемым посредством сфокусированного источника энергии (лазерного луча или электронного пучка) для создания 3D-деталей, порошки металла / пластика спекаются либо плавятся слой за слоем, образуя распечаток. После получения одного слоя детали металлический порошок добавляется и процесс повторяется. Большинство PBF-принтеров оснащены механизмом для разглаживания тонких слоёв порошка в процессе печати. После завершения печати лишний не запёкшийся песок удаляют, и остаётся твёрдый распечаток.

Методы PBF отличаются друг от друга используемым источником энергии и видом применяемых порошков. Так, в аэрокосмической промышленности при создании изделий, которые должны выдерживать высокие температуры, например, ракетных двигателей, задействуется

широкий спектр материалов, обычно нержавеющей и инструментальной сталей, титана и его сплавов, сплавов на основе алюминия и никеля (хастеллой, инконеля) и прочих суперсплавов. Для создания протезов чаще всего применяют титан и кобальт-хром [2].

Ключевым преимуществом процесса PBF относительно других видов аддитивных технологий является то, что в процессе производства он может служить в качестве опорной конструкции для выступов и подрезов, следовательно, благодаря PBF могут быть изготовлены сложные формы с высокой геометрической точностью (до 0,05 мм), что отличает эту технологию, к примеру, от процесса прямой лазерной наплавки (DED) [3]. Технология PBF обеспечивает широкие возможности для оптимизации топологии проектирования компонентов и функциональной интеграции в аэрокосмической промышленности.

В настоящее время представлены следующие коммерческие системы с технологией PBF: EOS M400 с прямым металлическим лазерным спеканием от производителя Electro Optical Systems; GE Aviation, включающая лазерное спекание от Concept Laser и электронно-лучевую плавку от Arcam; прямое лазерное спекание от Renishaw и SLM Solutions.

Так, в линейке компании GE Aviation присутствует аппарат M LINE Factory для печати из нержавеющей стали, сплавов титана и никеля. Он подходит для создания деталей двигателей, а также для прототипирования узлов перед их испытаниями в аэротрубе.

Arcam A2X предназначен для обработки титановых сплавов, а также материалов, требующих высоких температур обработки, например, титанового алюминиды и инконеля, что делает его пригодным для производства материалов для научно-исследовательских разработок [2].

SLM 50 фирмы Realizer (DMG Mori) способен печатать разными металлами и сплавами: алюминиевые сплавы, никелевый сплав, кобальт-хромовые сплавы, титановый сплав, металлические порошки. Аппарат

применяется в таких сферах, как аэрокосмическая, оборонная и автомобильная промышленность, образование, производство.

Melt Master<sup>3D</sup>-550 (рисунок 1) – первый российский промышленный 3D-принтер для металлических изделий, который был представлен в Екатеринбурге госкорпорацией «Росатом» на промышленной выставке «Иннопром – 2016». И устройство, и программное обеспечение для 3D-принтера являются полностью отечественной разработкой. Головной образец с размерами рабочей камеры 550×550 создан специалистами Государственного научного центра Российской Федерации АО «ЦНИИТМАШ» (входит в Машиностроительный дивизион «Росатома» – АО «Атомэнергомаш») совместно с Научным дивизионом «Росатома» (АО «Наука и Инновации») [2]. Устройство оснащено лазером мощностью 1000 Вт и трёхосевой сканирующей оптической системой, прогнозируемая скорость печати отечественной разработки – от 15 до 70 см<sup>3</sup>/ч.



*Рисунок 1. Российский 3D-принтер Melt Master<sup>3D</sup>-550*

Отметим ещё одну распространённую разновидность аддитивного процесса – 3DP, или «трёхмерную печать», заключающуюся в том, что изделие строится с использованием слоёв порошка на подложке. Для отверждения слоя в процессе изготовления используется жидкое связующее с селективным распылением, материалом может быть песок, металл или стекло. Для аэрокосмической промышленности 3DP представляет интерес тем, что предлагает самый большой доступный размер сборки, позволяющий печатать детали размером 1800×1000×700 мм. При этом используются стандартные материалы для литейной промышленности, что позволяет легко интегрировать данный процесс в существующие производственные и литейно-прессовые процедуры. Сочетание большого объёма и высокой скорости сборки делают возможным производство прототипов на основе металла без шаблонов, мелкосерийное производство с использованием алюминиевых и медных сплавов, серого и ковкого чугуна и магния. Области применения включают сложные коробки передач, заглушки, топливные баки, корпуса трансмиссий, лёгкие детали двигателя и конструктивные шарниры.

В целом, процесс PBF позволяет инженерам использовать более простую конструкцию, которая сокращает количество паек и сварных швов, уменьшить количество деталей, используемых, к примеру, для изготовления сопла ракеты, ввиду чего масса изделий, произведённых по технологии PBF, от 25% легче аналогов, изготовленных с использованием процессов литья или фрезерования.

Новые конструктивные особенности позволяют получать трудновыполнимые механически усовершенствования для охлаждения деталей, прочные опорные соединения, что обеспечивает больший срок службы относительно аналогов, изготовленных традиционными методами. К примеру, соединитель кронштейна в Airbus A350 XWB, изготовленный по технологии PBF, имеет пористую структуру, похожую на кость, что

значительно снижает массу изделия. Ранее это была фрезерованная деталь из алюминия, а теперь – из титана, имеющая меньшую массу.

Минимизация массы приводит к снижению расхода топлива и потенциальному увеличению грузоподъемности летательного аппарата. С экономической точки зрения, бесконтактное изготовление деталей по данной технологии сокращает время разработки до 75%: ранее изготовление одной детали могло занимать до 6 месяцев, теперь срок сократился до 1 месяца.

Таким образом, PBF используется для изготовления функциональных изделий, эксплуатируемых при высоких нагрузках, экстремальных температурах и в агрессивных средах. Технология получила широкое распространение в ракетостроении благодаря возможностям для производства полностью плотных компонентов с высоким разрешением и сложной геометрией, с малыми и средними объемами сборки [4, с. 24]. Отметим, что значительная часть аддитивного производства компонентов силовой установки сосредоточена на наплавлении порошкового слоя [5, с. 47], и перспективным направлением является модернизация отечественных 3D-принтеров для совершенствования данной технологии.

#### **Использованные источники:**

1. Бруев В.Н. Применение гибридных технологий в аэрокосмической промышленности // LXII МНПК «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». – Пенза, 15 декабря 2022. – С. 90.
2. Филатов А. Что такое PBF? // Первый автосервисный журнал. – 2017. – № 10.
3. Ding D. et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – № 1e17.

4. Гришин А.Н. Технология аддитивного производства металлов в аэрокосмической промышленности // XVI ВНК «Наука и Просвещение: результаты современных научных разработок». – Пенза, 30 января 2022. – С. 24.
5. Палачёв П.М., Ефимов М.В. Конструкционные решения в производстве сопел для жидкостных ракетных двигателей // LXVIII МНК «World science: problems and innovations». – Пенза, 30 сентября 2022 г. – С. 47.