

УДК 622.022

**Ю.Н. Тимошенко**, к.т.н., начальник производственного цеха ООО «Скайлок», Москва, **Е.И. Сизова**, к.т.н., доц., **О.В. Белянкина**, к.т.н., доц., Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

e-mail: [kaftmr@mail.ru](mailto:kaftmr@mail.ru)

## Аддитивные технологии в горнодобывающей отрасли

*Рассмотрено применение AF-технологии, 3D-проектирование, CAE- и САМ-технологии в горнодобывающей отрасли.*

*Ключевые слова:* горное оборудование, AF-технология, 3D-проектирование, CAE- и САМ-технологии

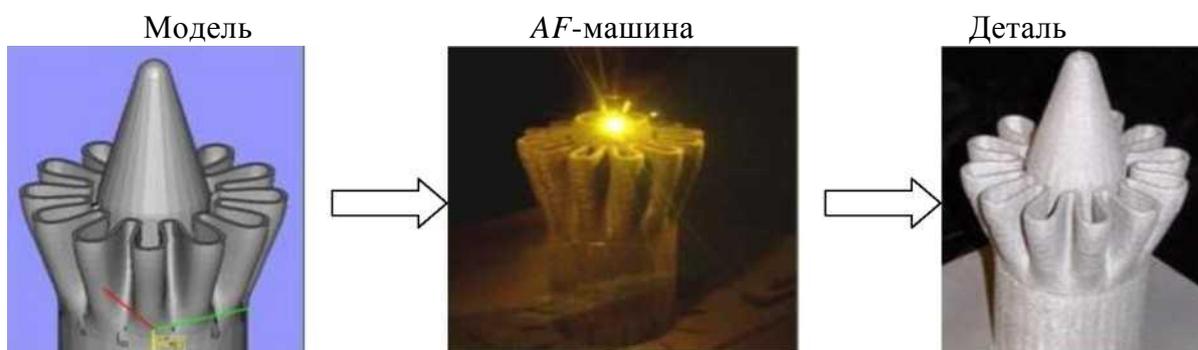
**Y. N. Tymoshenko, E.I. Sizova, O.V. Belyankina**

## Additive Technologies in the Mining Industry

*The use of AF technologies, 3D design, CAE and Cam technologies in the mining industry.*

*Keywords:* mining equipment, AF-technology, 3D design, CAE and Cam technology.

В горнодобывающей отрасли в наличие большая номенклатура оборудования, технологических и транспортных машин с большими сроками эксплуатации. Затраты на их техническое обслуживание и ремонт растут. Одним из возможных вариантов снижения себестоимости ремонта может стать применение AF-технологии (Рис.1. [1])



**Рис. 1** Процесс *Additive Fabrication* [1]

Существует множество технологий, которые можно назвать аддитивными, объединяет их одно: построение модели-детали

происходит путем добавления материала (от англ. *add* – «добавлять») в отличие от традиционных технологий, где создание детали происходит путем удаления или перераспределения «лишнего» материала.

*AF*-технологии – это не только и не столько *3D*-принтер, но важная часть *3D*-среды, в которой происходит рождение нового продукта – от замысла конструктора до материализации его идей в серийном производстве. Для полноценного использования *AF*-технологий нужно освоить и внедрить *3D*-проектирование и моделирование, *CAE*- и *CAM*-технологии, технологии оцифровки и реинжиниринга, сопутствующие технологии, включая и вполне традиционные, но переформатированные под *3D*-среду. Рынок аддитивных технологий в России развивается, внедрение *AF*-технологий могут значительно повысить скорость реагирования на потребности рынка и экономическую эффективность многих отраслей промышленности. *3D*-печать позволяет «выращивать» по слоям изделие или модель по заданным параметрам. Скорость, точность и снижение затрат на производство единичных образцов — основные преимущества *3D*-печати

Методы построения моделей, т.е. *AF*-технологии, могут быть разными и зависят от способов формирования слоя и его соединения (склеивания, спекания, сваривания) с общим массивом модели или изделия.

Отдельным направлением является послойное лазерное спекание (сплавление) металлопорошковых композиций. Развитие этого направления *AF*-технологий стимулировало и развитие технологий получения порошков металлов. На сегодняшний день номенклатура металлических композиций имеет широкий спектр материалов на основе *Ni* и *Co* (*CoCrMo*, *Inconel*, *NiCrMo*), на основе *Fe* (инструментальные стали: *18Ni300*, *H13*; нержавеющая сталь: *316L*), на основе *Ti* (*Ti6-4*, *CpTigr1*), на основе *Al* (*AlSi10Mg*, *AlSi12*). Производятся порошки бронз, специальных сплавов, а также драгметаллов – главным образом для нужд дентальной медицины. Из металлических порошков «выращивают» заготовки пресс-форм, специальные инструменты, оригинальные детали сложной конфигурации, которые затруднительно или невозможно получить литьем или механообработкой. Уже сейчас при штучном и мелкосерийном производстве зачастую становится экономически выгодным «вырастить» небольшую партию деталей на *SLS*-машине, чем изготавливать литейную или штамповую оснастку. В сочетании с *HIP* (*Hot Isostatic Pressing* – горячее изостатическое прессование) и соответствующей термообработкой такие детали не только не уступают литым или кованным изделиям, но и превосходят их по прочности на 20–30% [1].

Наиболее распространенный метод создания цельнометаллических трехмерных моделей подразумевает использование лазерных установок

для спекания частиц металлического порошка [1]. Данная технология именуется «выборочным лазерным спеканием» или *SLS*. Стоит отметить, что *SLS* используется не только для работы с металлами, но и с термопластиками в порошковом виде. Разновидностью технологии *SLS* является метод прямого лазерного спекания металлов (*DMLS*) (рис.2[1]), ориентированный, как понятно из названия, на работу с чистыми металлическими порошками. Данные установки зачастую оснащаются герметичными рабочими камерами, наполняемыми инертным газом для работы с металлами, подверженными окислации – например, с титаном.

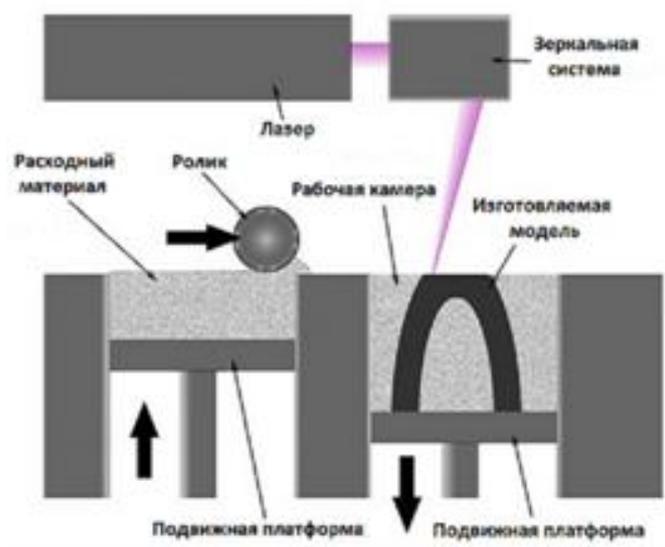


Рис. 2. Схема работы *SLS*, *DMLS* и *SLM* установок [1]

Кроме того, *DMLS*-принтеры в обязательном порядке применяют подогрев расходного материала до точки чуть ниже температуры плавления, что позволяет экономить на мощности лазерных установок и ускорять процесс печати.

Процесс лазерного спекания начинается с нанесения тонкого слоя подогретого порошка на рабочую платформу. Толщина наносимых слоев соответствует толщине одного слоя цифровой модели. Затем производится спекание частиц между собой и с предыдущим слоем. Изменение траектории движения лазерного луча производится с помощью электромеханической системы зеркал.

По завершении вычерчивания слоя лишний материал не удаляется, а служит опорой для последующих слоев, что позволяет создавать модели сложной формы, включая навесные элементы, без необходимости построения дополнительных опорных структур. Такой подход вкупе с высокой точностью и разрешением позволяет получать детали, практически не требующие механической обработки, а также цельные детали уровня геометрической сложности, недостижимого традиционными производственными методами, включая литье.

Лазерное спекание позволяет работать с широким ассортиментом металлов, включая сталь, титан, никелевые сплавы, драгоценные материалы и др. Единственным недостатком технологии можно считать пористость получаемых моделей, что ограничивает механические свойства и не позволяет добиться прочности на уровне литых аналогов.

Одним решением этой проблемы стало преобразование технологии прямого лазерного спекания металлов (*DMLS*) в технологию аддитивного производства методом лазерной плавки (*SLM*). Фактически, единственным принципиальным различием этих методов является степень термической обработки металлического порошка: технология *SLM* основана на полной плавке для получения однородных моделей, практически неотличимых по физическим и механическим свойствам от литых аналогов.

Параллельным методом, достигшим прекрасных результатов, стала электронно-лучевая плавка (*EBM*). На данный момент существует лишь один производитель, создающий *EBM*-принтеры – шведская компания *Arcam*.

*EBM* позволяет достигать точности и разрешения, сравнимых с лазерной плавкой, но обладает определенными преимуществами. Так, использование электронных пушек позволяет избавиться от деликатных электромеханических зеркальных систем, используемых в лазерных установках. Кроме того, манипулирование электронными пучками с помощью электромагнитных полей возможно на скоростях, несравнимых более высокими по сравнению с электромеханическими системами, что в совокупности с увеличением мощности позволяет добиться повышенной производительности без существенного усложнения конструкции. В остальном же, конструкция *SLM* и *EBM*-принтеров схожа с установками для лазерного спекания металлов.

Возможность работы с широким диапазоном металлов и сплавов позволяет создавать мелкие партии специализированных металлических деталей, практически не уступающих образцам, получаемым с помощью традиционных методов производства. При этом отсутствует необходимость создания дополнительных инструментов и инфраструктуры – таких как, литейные формы и печи. Соответственно, возможна значительная экономия при прототипировании или мелкосерийном производстве.

Установки для лазерной и электронно-лучевой плавки успешно используются для производства таких предметов, как ортопедические титановые протезы, лопатки газовых турбин и форсунки реактивных двигателей (рис.3[1]).



Рис. 3. Пример титанового имплантата, полученного с помощью технологии электронно-лучевой плавки (EBM)[1]

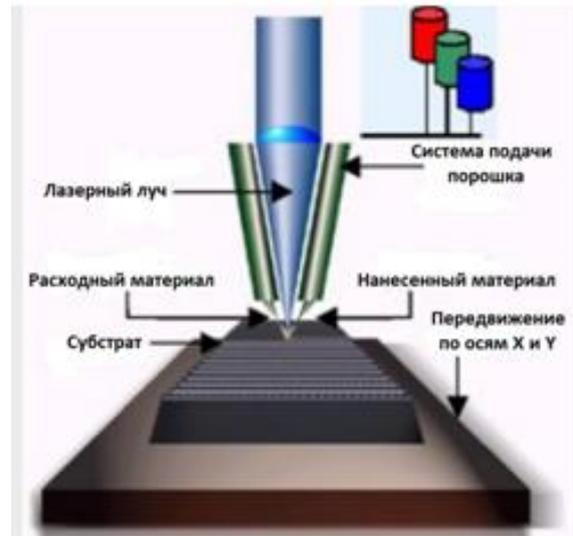


Рис. 4. Прямое лазерное аддитивное построение (CLAD)[1]

В основе *CLAD* лежит напыление металлического порошка на поврежденные детали с немедленной наплавкой с помощью лазера. Не столько технология *3D*-печати, сколько технология «*3D*-ремонта». Технология применяется исключительно на промышленном уровне ввиду сложности и относительно узкой специализации.

Позиционирование «печатной головки» осуществляется по пяти осям: вдобавок к перемещению в трех плоскостях, головка обладает способностью изменять угол наклона и поворачиваться вокруг вертикальной оси, что позволяет работать под любым углом.

Подобные устройства зачастую используются для ремонта крупногабаритных изделий, включая производственный брак. Например, установки французской компании *VeAM* используются для ремонта авиационных двигателей и других сложных механизмов (рис.4[1]).

Полноценные установки *CLAD* предусматривают использование герметичной рабочей камеры с инертной атмосферой для работы с титаном и другими металлами и сплавами, поддающимися оксидации.

Перспективный вид *AF*-технологии- «*Direct Deposition*», «прямое или непосредственное осаждение (материала)», т. е. непосредственно в точку, куда подводится энергия и где происходит в данный момент построение фрагмента детали (рис.5[2]).

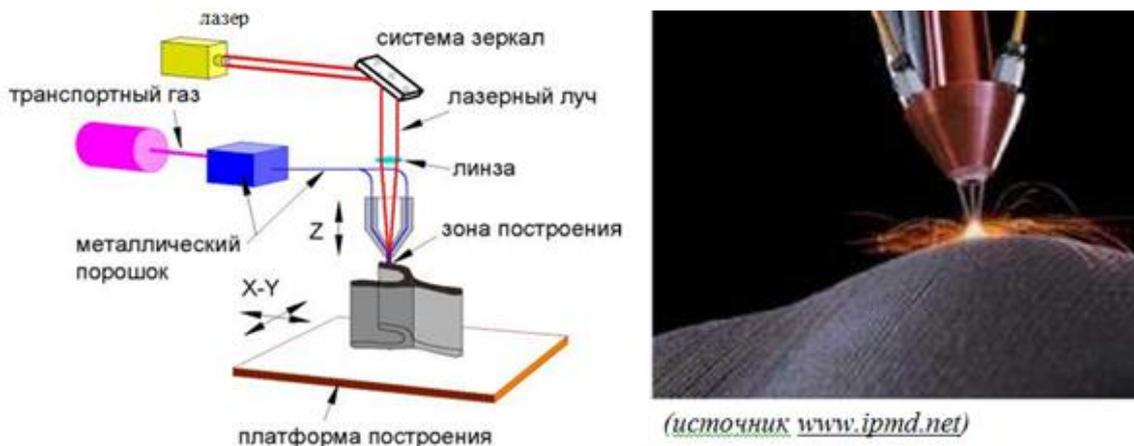


Рис. 5. Технология *Direct Deposition* [2]

Материал подается в конкретное место, куда в данный момент времени подводится энергия и где идет процесс формирования детали. К этим технологиям относятся: *DMD - Direct Metal Deposition* (компания *POM*, США); *LENS - Laser Engineered Net Shape* (*Optomec*, США); *DM - Direct Manufacturing* (*Sciaky*, США), *MJS - Multiphase Jet Solidification* (*Fraunhofer IFAM*, Германия; *FDM*, США) и др

*ASTM F2792.1549323-1 (США)* классифицирует аддитивные технологии следующим образом, разделяя их на 7 категорий [2]:

1. *Material extrusion* - «выдавливание материала»;
2. *Material Jetting* - «разбрызгивание материала» «струйные технологии»;
3. *Binder jetting* - «разбрызгивание связующего»;
4. *Sheet lamination* - «соединение листовых материалов»;
5. *Vat photopolymerization* - «фотополимеризация в ванне»;
6. *Powder bed fusion* - «расплавление материала в заранее сформированном слое»;
7. *Directed energy deposition* - «прямой подвод энергии непосредственно в место построения».

*AF*-технологии относят к технологиям XXI-го века. Кроме очевидных преимуществ в скорости и, зачастую, в стоимости изготовления изделий, эти технологии имеют важное достоинство с точки зрения охраны окружающей среды и, в частности, эмиссии парниковых газов и «теплового» загрязнения. Аддитивные технологии имеют огромный потенциал в деле снижения энергетических затрат на создание самых разнообразных видов продукции.

#### Список литературы

1. Быстрое прототипирование. Доступ: <http://mlbp.narod.ru/examples.htm>
2. Аддитивные технологии и изделия из металла. Довбыш В. М., Забеднов П. В., Зленко М. А. Режим доступа: [www.ipmd.net](http://www.ipmd.net)