Аддитивные технологии и изделия из металла

Довбыш В. М., Забеднов П. В., Зленко М. А.

Вячеслав Довбыш, директор Центра Технологий ФГУП «НАМИ», Москва

Павел Забеднов, директор ФГУП «Внештехника», Москва

Михаил Зленко, д.т.н., директор НИИМашТех (СПбГПУ, Санкт-Петербург), зам. директора Центра Быстрого Прототипирования ФГУП «НАМИ», Москва

Михаил Зленко: «Когда десять лет назад в одной европейской лаборатории я впервые увидел машину для выращивания деталей из металлического порошка, и я это хорошо помню, у меня возникло чувство зависти к следующему поколению. Конечно, было и чувство восхищения перед создателями этой техники, но я никак не мог предположить, что присутствую при рождении технологии, которая станет рутинным производственным процессом еще до моего выхода на пенсию. Я увидел через маленькое окошко, что лазерный луч бегает последовательно от левого верхнего края рабочей зоны к нижнему правому, довольно долго, как мне показалось. Достаточно долго, чтобы в верхнем левом углу металл остыл, прежде чем луч туда снова вернется для сплавления следующего слоя. Как в таких условиях будет «припекаться» каждый последующиз слой к предыдущему, как влияют на геометрию неизбежные термические нагрузки, какова внутренняя структура материала, спекаются или сплавляются частички металла, было не понятно. И, конечно, я тут же задал кучу вопросов улыбчивому англичанину по фамилии Симонс, на которые он односложно ответил: «Не знаю». Англичанин говорил правду, тогда он действительно не знал, что получилось. Чтобы узнать, потребовались годы, сотни и сотни экспериментов, металлографических исследований, испытаний..., сотни и сотни моллионов фунтов, долларов и евро инвестиций. И огромное желание узнать!

Вместо введения. Технология «трехмерной печати» появилась в конце 80-х годов прошлого века. Пионером в этой области является компания **3D Systems**, которая разработала первую коммерческую стереолитографическую машину – **SLA** – **Stereolithography Apparatus** (1986 г). До середины 90-х годов она использовалась главным образом в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, связанной с оборонной промышленностью. Первые лазерные машины – сначала стереолитографические (**SLA**-машины), затем порошковые (**SLS**-машины), были чрезмерно дороги, выбор модельных материалов весьма скромный. Широкое распространение цифровых технологий в области проектирования (**CAD**), моделирования и расчетов (**CAE**) и механообработки (**CAM**) стимулировало взрывной характер развития технологий **3D**-печати, и в настоящее время крайне сложно указать область материального производства, где в той или иной степени не использовались бы **3D**-принтеры.

Металл – это всегда была заветная мечта всех разработчиков аддитивных машин. Если не напрямую, то косвено, но непременно к металлу! И это понятно. Именно металлическая деталь – это «настоящий» товар, не просто модель, не макет, не «прототип» в разной степени приближения к «боевому» изделию, это конечное изделие с максимальной добавленной стоимостью. Это самое дорогое, самое «вкусное» для производителя изделие, но и самое хлопотное....

А вопросов много. Как обеспечить построение детали именно из того матерала, который нужен вам – Заказчику? Где его взять? Вам требуется изготовить 10 деталей массой 5,0 кг из стали, условно, **X15Y20Z50**. Где вы возьмете порошок именно этой стали именнно в этом количестве? Вам, в лучшем случае, предложат под заказ изготовить несколько сот килограмм этого порошка, а лучше - вагон. И с предоплатой. В худшем скажут, что «порошки такой стали наш завод не выпускает». Просто потому, что оборудование для производства порошков имеет определенные технологические ограничения – нельзя изготовить меньше определенного количества, нельзя изготовить порошок именно этого химсостава именно на этом оборудовании и пр. и пр. И что делать? Вам не нужен вагон, вам нужно всего 50 кг, но именно этой стали. Проблема!

Конечно, вам могут предложить аналоги, близкие по химсоставу. Но тогда вам придется ввязываться в длительную процедуру согласования с Заказчиком вопросов с заменой стали **X15Y20Z50** на сталь **X16Y21Z49**. И чем закончится эта процедура не известно. В лучшем случае вам предложат (за ваш счет) провести серию испытаний, подтверждающих возможность такой замены.

Допустим, что у вас есть нужный металлопорошок или что Заказчик принял замену материала. Но он, Заказчик, вправе спросить у вас: «А будет ли прочность вашей детали сопоставимой с прочностью детали, получаемой традиционными методами?». Что вы ему ответите?

Ответ нашего знакомого англичанина: «Не знаю!», в данном случае не пройдет, это не НИР, в котором допустимо практически все, а бизнес, где недопустимо ничего, кроме того, что прописано в ТЗ. Вам нужно доказать, что «выращенная» деталь не только не хуже, а лучше традиционно изготовленной (иначе зачем весь сыр-бор?). Или по крайней мере доказать, что ваша деталь при аналогичных функциональных качествах дешевле, чем традиционно изготовленнная. Большая проблема!

Положим, что прочность не самое главное. Допустим, что к детали предъявляются другие требования, например, герметичность, плотность структуры, что характерно, например, для атомной индустрии, где водород и гелий – чрезвычайно текучие вещества, обычное рабочее тело. Тут впечалтяющие картины вживую строящейся детали с искрами от таинственного лазера будут не вполне убедительны. Заказчик вправе спросить: «А как насчет плотности материала?». И будет прав. Ибо послойный синтез предполагает проведение построения в среде инертного газа, естествено, с охлаждением каких-то зон, с местной усадкой металла, с захватом молекул газа окружающей среды (азота или аргона), со случайными «пропусками» в работе лазера, с дефектами, связанными с неоднородностью самого строительного материала – порошка, поскольку он тоже представляет собой неоднородную среду с определенной вариацией дисперсности (обычно от 10 до 100 мкм). И появление микропористости вполне возможно. Какова ее степень? Критично это для вашего изделия или нет? Как ответить на эти вопросы? Очень большая проблема!

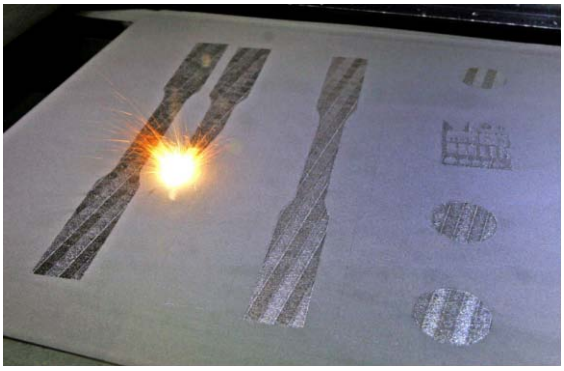


Рис. 1. Процесс послойного лазерного сплавления

Стоимость – тоже проблема. Заказчик во многих случаях может пойти на увеличение стоимости в обмен на сокращение сроков. Время – деньги, это жесткая взаимосвязь, особенно в сфере инноваций. Но он, Заказчик, вряд ли пойдет на сокращение сроков в обмен на качество продукта. Вы обязаны подтвердить качество, предлагая Заказчику

более привлекательные сроки изготовления детали за счет применения новой технологии.

Таким образом, путь аддитивных технологий в сферу индустриального производства тернист, проблем много, проблемы серьезные. И, тем не менее, прогресс не просто очевиден, он – фантастический, если иметь в виду, что первые аддитивные машины появились на рынке всего 20 лет назад. Но уже производится синтезированная металлическая технологическая оснастка, изготавливаются инструменты, детали авиалайнеров, спутников, ракет, подводных лодок, уже есть десятки тысяч протезов и имплантов, ювелирных изделий и многое другое, что невозможно было себе представить несколько лет назад. И есть все основания полагать, что аддитивные технологии уже в самое ближайшее время приобретут статус стратегически важных, приоритетных технологий машиностроения.

Во всяком случае в США это уже произошло. Летом 2012 года в городе Янгстоун (**Youngstown, Ohio**) был открыт **National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII)** – первый из 15 институтов чисто технологической направленности, создаваемых по инициативе Президента Обамы с целью, по заявлению Департамента торговли, «ускорить инновационное развитие и усилить конкурентоспособность США». Всего на создание 15-ти институтов выделено около $1 млрд. Машинный парк института уже включает 10 аддитивных машин, причем три из них **Renishaw AM 250**, **ExOne M-Lab** и **POM Synergy 5** – это самые современные машины для синтеза деталей из металла.

В в проффесиональном языке авиастроителей есть фразеологизм **“buy-to-fly” ratio**, который можно перевести как «отношение того, что купил, к тому, что полетело», т. е. сколько материала было куплено и сколько реально «полетело» в качестве детали в составе самолета. По разным данным это отношение составляет 15:1 или даже 20:1 для сложных деталей. Использование аддитивных технологий позволяет свести этот показатель до 1,5-2,0:1 [1].

Машины, строящие детали из металла - поистине верх инженерного искусства. Здесь сконцентрированы самые передовые знания по металлургии, лазерной технике, оптике, электроники, системам управления, измерительным устройствам, механике, вакуумной технике и т. д. В этой статье приведены данные по наиболее продвинутым и успешным на рынке машинам для послойного синтеза изделий из металла.

1. Терминология и Классификация.

Что такое аддитивные технологии? Как их определять и, соответственно, толковать? В отечественной нормативной документации эти определения пока не даны. Ответ на этот вопрос не так прост и потребует от русскоязычного научного сообщества определенных усилий для выработки лаконичного и точного определения на родном языке. (Будем считать эту тему отрытой для обсуждения). Пока же воспользуемся зарубежным опытом.

Вопрос терминологии отдельно рассматривался в рамках деятельности организации **ASTM International** (**American Society for Testing and Materials**), которая занимается разработкой технических стандартов для широкого спектра материалов, изделий, систем и услуг. **ASTM** (в своем стандарте **ASTM F2792.1549323-1**) так определяет аддитивные технологии: «***The process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to*** **subtractive** ***manufacturing technologies»,*** или по-русски: «Процесс объединения материала с целью создания объекта из данных **3D**-модели, как правило, слой за слоем, в отличие от "**вычитающих**" производственных технологий».

Под "**вычитающими**" технологиями подразумевается механообработка - удаление («вычитание») материала из массива заготовки. Таким образом, даже авторитетное сообщество американских инженеров вынуждено было прибегнуть к антониму –

противоположному понятию (**subtractive**) «вычитание», чтобы определить новое понятие (**additive**) «добавление», т. е. в самом определении аддитивные технологии трактуются от противного, как противоположность технологиям механообработки. Но не всякие технологии соединения материала, а только те, которые создают объект по данным **3D**-модели или из **CAD**-данных, т. е. на основе трехмерной компьютерной модели. Это второе ключевое слово – **CAD**. Третье ключевое слово здесь - «послойно». Хотя отметим осторожность американцев в определении: они написали все-таки «***usually»***, т. е. «как правило», «обычно», видимо, допуская, по меньшей мере, теоретическую возможность и не послойного построения.

Рекомендованы два основных термина - ***Additive Fabrication (AF), Additive Manufacturing (AM)***, и мы будем далее говорить **AM**-технологии*, а также «легитимные» синонимы* - ***additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing*** и ***freeform fabrication***. Все они в русскоязычном варианте могут быть корректно переведены как «аддитивные технологии». Их также можно называть технологиями послойного синтеза. Тем не менее, в интернет-сообществе, в образовательном процессе, в популярной научно-технической литературе и разговорной речи профессионалов можно услышать и прочитать: «выращивание», «**3D**-печать», «**3D**-принтер», «**3D**-принтинг». Де-факто эти термины узаконили себя без санкции **ASTM**, и их также следует принять в качестве легальных синонимов.

Термин **Rapid Prototyping** или *Быстрое прототипирование* рекомендовано изъять из обращения, как безнадежно утративший смысл современных аддитивных технологий. Прототипирование – это лишь часть, и теперь уже не доминирующая, аддитивных технологий.

В международном сообществе, так же, как и в России, устоявшейся классификации аддитивных технологий пока не принято. Различные авторы подразделяют их:

- по применяемым строительным или модельным материалам (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и т. д.);
- по наличию или отсутствию лазера;
- по методам подвода энергии для фиксации слоя построения (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым светом, посредством связующего состава и т. д.);
- по методам формирования слоя.

Последнее, пожалуй, единственное, что принципиально отличает два вида аддитивных технологий. Первый вид: сначала формируют слой, например, насыпают на рабочую платформу дозу порошкового материала и разравнивают порошок с помощью ролика или «ножа», создавая таким образом ровный слой материала определенной толщины; затем выборочно (селективно) обрабатывают порошок в сформированном слое лазером или иным способом, скрепляя частички порошка (сплавляя или склеивая) в соответствии с текущим сечением исходной **CAD**-модели. Эта технология в англоязычной традиции называется «**Bed Deposition**», т. е. предполагается, что есть некая платформа – **Bed** (англ. - постель), на которой сначала формируют слой, а затем в этом слое выборочно отверждают строительный материал. Положение плоскости построения неизменно. При этом часть строительного материала (в данном случае - порошка) остается в созданном слое нетронутой. Этой технологии достаточно точно соответствует термин «селективный синтез» или «селективное лазерное спекание» (по-английски **SLS – Selective Laser Sintering**), если «отверждающим» инструментом является лазер, который здесь, в отличие от лазерной стереолитографии (**SLA**-технологии), является источником тепла, а не ультрафиолетового излучения.

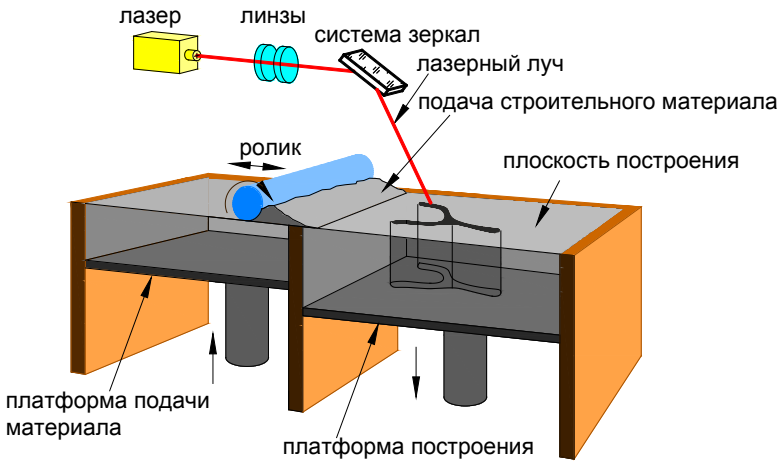


Рис. 2 **Bed Deposition**

Второй вид аддитивных технологий – «**Direct Deposition**», по-русски не очень точно, но более-менее понятно, можно перевести, как «прямое или непосредственное осаждение (материала)», т. е. непосредственно в точку, куда подводится энергия и где происходит в данный момент построение фрагмента детали.

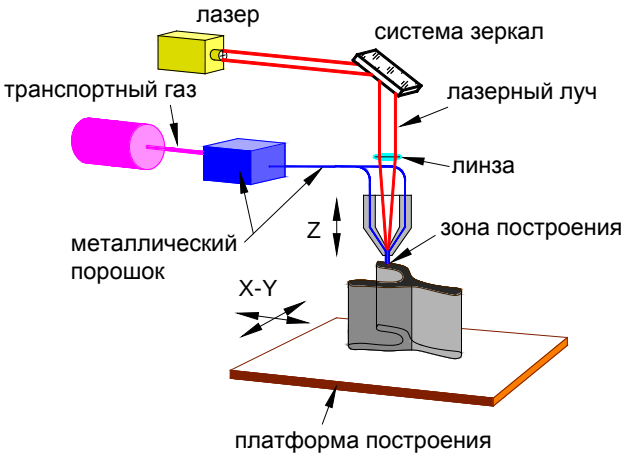


Рис. 3 **Direct Deposition** *(источник www.ipmd.net)*

Иными словами, в отличие от первого вида, здесь не формируется слой строительного материала, а материал подается в конкретное место, куда в данный момент времени подводится энергия и где идет процесс формирования детали. Подобно тому, как сварщик вводит материал (электрода) в то место, где за счет электрической дуги формируется зона расплава.

Кроме упомянутых **SLS-** и **SLA**-технологий, к первому виду можно отнести такие известные технологии как:

- **SLM – Selective Laser Melting** (компания **SLM Solutions**, Германия);
- **DMLS - Direct metal laser sintering** (**EOS,** Германия);
- **EBM – Electron Beam Melting** (**Arcam,** Швеция);
- **LaserCusing** (**Concept Laser,** Германия);
- **SPLS** - **Solid Phase Laser Sintering** (**Phenix Systems,** Франция);
- **Ink-Jet** или **Binder jetting** (**ExOne, 3D Systems**, США) и ряд других.

Ко второму виду можно отнести следующие технологии:

- **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.

Упомянутая **ASTM** несколько раз возвращалась к вопросу терминологии, определений и классификации и в последней, 2012 года версии классифицирует аддитивные технологии следующим образом, разделяя их на 7 категорий:

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»;

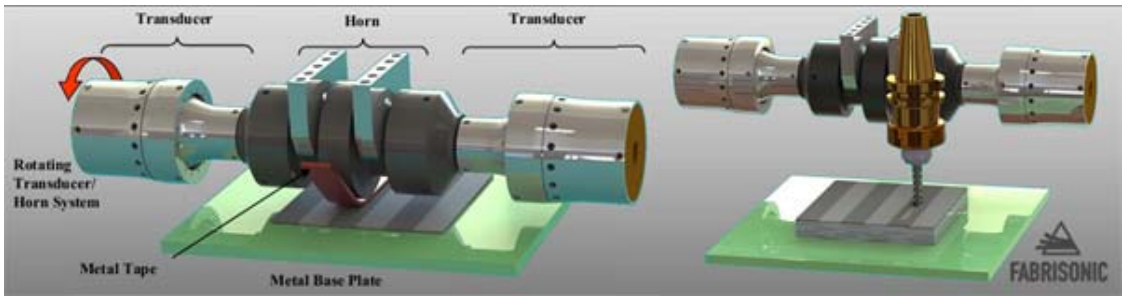
(Здесь дан авторский перевод, не претендующий на лаконичность и точность, но по возможности коротко характеризующий основную черту каждой технологии).

К первой категории относится, например, вышеуказанная технологий **MJS**, в соответствии с которой в место построения модели через подогреваемый экструдер выдавливается пастообразный строительный материал – смесь металлического порошка и связующего-пластификатора. Построенную таким образом грин-модель («**green**» - в смысле «зеленая», не зрелая, сырая) помещают в печь для удаления связующего и дальнейшего спекания [2], как это делается в традиционных **MIM**-технологиях (**Metal Injection Molding**).

Примером следующей технологии может быть технология **Polyjet**, согласно которой модельный материал – обычно фотополимер или воск, подается в зону построения через многоструйную головку. В технической литературе эту технологию иногда именуют как **Multi jetting Material.**

К третьей категории относятся так же струйные технологии или **Ink-Jet**-технологии, где в отличие от технологии **Material jetting,** в зону построения впрыскивается не модельный материал, а связующий реагент (например, технология **ExOne**),

К четвертой категории относят технологии, предполагающие использование в качестве строительного материала листовой материал в виде, полимерной пленки, металлической фольги, листов бумаги и т. д. Примером, здесь может быть технология **UAM** (**Ultrasonic additive manufacturing**, **Fabrisonic**), в соответствии с которой тонкие металлические пластины сваривают с помощью ультразвука и затем «лишний» металл удаляют фрезерованием. Это, конечно, не вполне аддитивная технология, скорее, комбинация аддитивной и «вычитающей» технологии.



*(источник **www.fabrisonic.com**)*

Рис. 4 **UAM** –технология

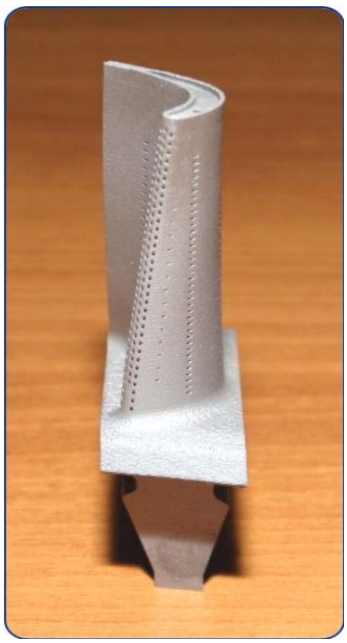
К пятой категории относят технологии, предполагающие использование жидких модельных материалов – фотополимерных смол, в частности **SLA**-технология (**3D Systems**) и **DLP**-технология (**Digital Light Procession, Envisiontec**). Это не «металлические» технологии, и в данной работе они не рассматриваются.

В шестую категорию входит многочисленная группа **SLS**-технологий, в которых применяется лазер в качестве источника тепла, а также ряд других, не лазерных технологий, например, **Arcam**, где используется электронный луч, или **SHS** (**Selective Heat Sintering** (**Blueprinter**), в которой источником тепла являются ТЭНы.

В последнюю, седьмую категорию входят технологии, согласно которым строительный материал и энергия для его сплавления подводятся одновременно в место построения изделия. Эти технологии предполагают применение машин, рабочий орган которых – головка, оснащена системами подвода строительного материала и энергии, обычно в виде сфокусированного лазерного излучения (**Optomec**, **POM**) или электронного луча (**Sciaky**). В ряде случаев головку устанавливают на роботизированной «руке».

2. Сферы применения «металлических» АМ-технологий.

Обычно, когда говорят о серийном производстве, подразумевают количество, измеряемое тысячами или сотнями тысяч единиц. Однако существует и другое серийное производство, измеряемое десятками или сотнями изделий. Таких изделий, зачастую сложной геометрии, из специальных материалов достаточно много в авиационной промышленности, космической индустрии, энергетическом машиностроении и ряде других отраслей. И именно там возник интерес к **АМ**-технологиям, «непосредственному выращиванию» металлических изделий, в качестве альтернативы традиционным технологическим методам для производства не прототипов или опытных образцов, а вполне товарной продукции. Причем мотивацией здесь является не возможность создать что-то уникальное, с необычными свойствами, а экономическая целесообразность. В ряде случаев при объективных расчетах реальных затрат аддитивные технологии оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные.



Лопатка турбины из никелевого сплава *(Предоставлено ОАО «НИАТ НТК»)*

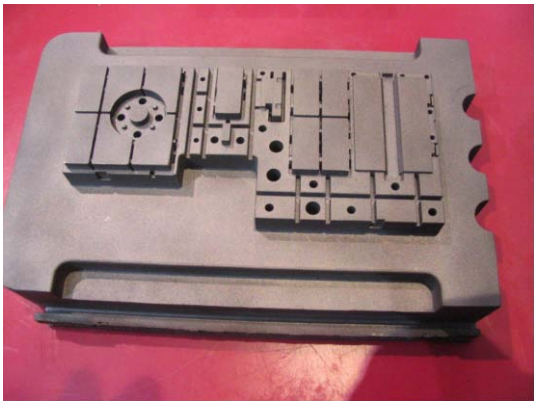
Датали системы топливоподачи, материал Ti64 *(Предоставлено ОАО «АБ Универсал»)*

Рис. 5 Детали авиационных двигателей

Развитию **AM**-технологий в этом секторе промышленности, безусловно, способствовало существенное расширение номенклатуры металлопорошковых материалов. Если в начале нулевых годов это был перечень не более 5-6 наименований, то сегодня предлагаются десятки видов разнообразных композиций от обычных конструкционных сталей до жаропрочных сплавов и драгметаллов. И этот перечень стремительно расширяется.

Одним из перспективных направлений применения **AM**-технологий является изготовление технологической оснастки – приспособлений и инструментов для серийного производства. В частности, изготовление вставок для термопласт-автоматов (ТПА). Современное пост-индустриальное производство характеризуется относительно быстрой сменой продуктов, причем часто меняется не основные компоненты, определяющие функциональные качества продукта, а дизайн – корпусные детали, элементы декора, обычно изготавливаемые литьем, в частности и на термопласт-автоматах. По этой причине в ряде случаев отпадает необходимость в дорогостоящей инструментальной оснастке, выдерживающей десятки и сотни тысяч циклов. Посредством **AM**-технологий можно сделать матрицу или пресс-форму из легкого сплава с меньшим ресурсом.

Но и для традиционного литейного производства технологий **AM**-технологии дают новые возможности. Например, пресс-форма может быть выращена вместе с каналами охлаждения произвольной конфигурации, что невозможно сделать при обычных методах механообработки. **AM**-машины **POM**, **Omtomec** и **Fabrisonic** успешно используют для изготовления пресс-форм с медными охлаждающими сердечниками, а также с так называемой конформной системой охлаждения, конфигурация которой соответствует геометрии формуемой детали. Иными словами каналы охлаждения прокладываются в массиве формы так, как необходимо, а не так, как позволяют традиционные технологии. Применение литейных форм с равномерным или регулируемым охлаждением позволяет сократить время пребывания отливки в форме до 30%. В данном случае **AM**-технологии это не противопоставление традиционной ЧПУ-обработке, а предложение новых возможностей для оптимизации затрат и повышения эффективности производства.

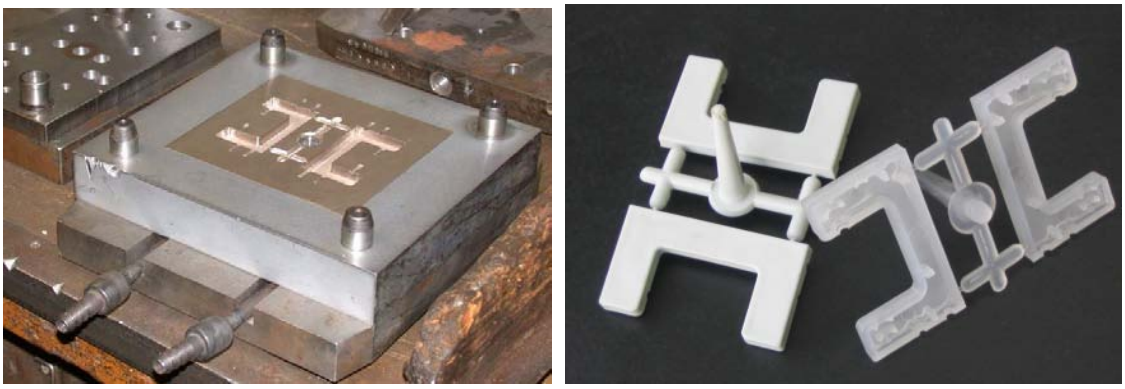


*(Предоставлено **3D Systems**)*

Рис. 6. Выращенная пресс-форма

Обслуживание серийного производства также связано с необходимостью изготовления специальных приспособлений, шаблонов, кондукторов и т. д., и здесь применение **AM**-технологий может быть экономически эффективно. Многие компании сталкиваются с проблемой оценки реального объема производства какого-либо изделия. От этого зависят затраты на технологическую подготовку. И все чаще возникает вопрос, какую стратегию принять: вырастить партию деталей на **AM**-машине, или делать «нормальную» оснастку, но с риском, что через короткое время потребуется внесение изменений и оснастку придется переделывать, или, что продукт «не пойдет» на рынке по каким-либо причинам?

Direct Manufacturing или «прямое производство» - изготовление металлических деталей в качестве коммерческих изделий, серийной продукции также является одной из целей **AM**-технологий. Это направление стремительно развивается по мере того как растет перечень строительных материалов, но говорить о серьезной конкуренции «вычитающим» технологиям пока преждевременно. Однако в ряде отраслей –



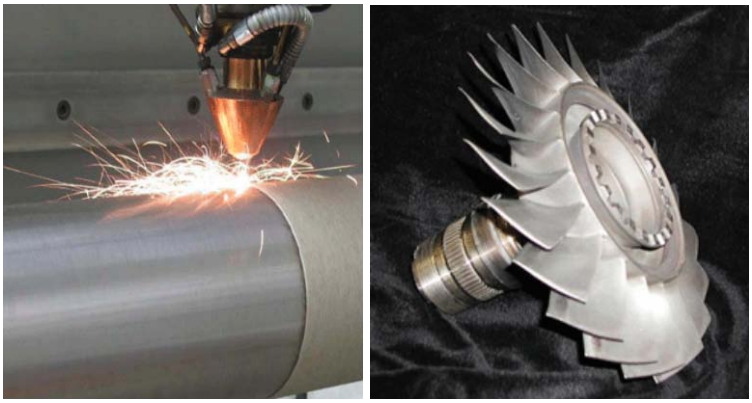
(Предоставолено ФГУП «НАМИ»)

Рис. 7. Вставка для ТПА и отливки из **ABS**-пластика

(Предоставлено ОАО «НИАТ НТК»)

Рис. 8 Сварная и «выращенная» топливная

авиационной промышленности, в судостроении, энергетическом машиностроении, а также дентальной медицине и восстановительной хирургии внедрение аддитивных технологий наиболее заметно. Например, российская компания ОАО «НИАТ НТК» успешно провела работы по замене сварных топливных форсунок авиационного двигателя на «выращенные» из никелевого сплава **CL 100NB**, рис. 8. Результат – значительно снижен процент брака, масса изделия уменьшена на 17%. Имеется также положительный опыт использования **AM**-технологий для ремонта дорогостоящих изделий, например, рабочих органов турбин ГТД, валов (рис. 9) и т. д., а также для нанесения защитных и износостойких покрытий (технологии **DMD**, **LENS**) [3]. И, безусловно, аддитивные технологии имею огромное преимущество перед традиционными за счет сокращении времени и стоимости при проведении НИОКР. Здесь **AM-**технологии уже получили постоянную прописку. Проведение вариантных исследований, быстрое изготовление опытных образцов позволило на порядок (без преувеличений!) сократить время проведения НИОК и, как следствие, значительно сжать сроки выхода новой продукции на рынок. Послойный метод построения детали сам по себе дал новые возможности, открыл для конструктора новые горизонты творчества, снял многие технологические ограничения. Стало возможным то, что было в принципе невозможным ранее. Можно вырастить «деталь в детали», можно вырастить деталь с переменными по толщине свойствами материала (так называемые градиентные



(Источники www.optomec.com, www.ipmd.net)

Рис. 9 Восстановление деталей авиационного двигателя

материалы), можно выращивать сетчатые конструкции, которые невозможно получить ни литьем, ни механообработкой. И т. д. и т.п.

Это фундаментальное преимущество аддитивных технологий и определяет их роль в современном материальном производстве. И будем помнить, то, что мы видим сейчас, это всего лишь бледные контуры будущего.

3. Машины и оборудование для выращивания изделий из металла

Машины, как и технологии, можно разделить на две основные группы.

3.1 Первая группа - Bed Deposition

SLS-машины представлены на рынке наиболее многочисленной по производителям и разнообразной по моделям группой. Большая часть компаний-производителей использует в своих машинах лазер в качестве источнике энергии для соединения частиц металлопорошковых композиций. К ним относятся:

- **Arcam** (Швеция);
- **Concept Laser** (Германия);
- **EOS** (Германия);
- **Phenix Systems** (Франция);
- **Realizes** (Германия);
- **Renishaw** (Великобритания);
- **SLM Solutions** (Германия);
- **3D Systems** (США).

(В машинах **Arcam** используется **EBM**-технология).

Почти все компании, использующие лазер, по-разному называют свои технологии, вероятно, чтобы таким образом как-то отличит себя на рынке от конкурентов, однако по технической сути все они являются технологиями селективного лазерного сплавления – **SLM**-технологиями, но именно это название негласно закреплено за компанией **SLM Solutions**.

Общей особенностью технологий, использующих лучевой источник тепла, является необходимость применения специальных поддержек – своеобразных якорей, которые удерживают строящуюся деталь от термических деформаций. При построении деталей из полимерных порошков в этом нет необходимости, деталь при построении находится в массиве порошка, и неспеченный порошок сам выполняет функцию поддержек. При сплавлении металлических порошков концентрация тепловой энергии в рабочей камере чрезвычайно высока, и без удерживающих «якорей» деталь может «уплыть», покоробиться и даже повредить элементы дозирующей системы машины. Соответсвующее программное обеспечениее **AM**-машины предлагает оператору конфигурацию поддрежек, но многое зависит и от оператора, от его опыта и мастерства – часто приходится редактировать предлагаемое машиной решение. Кроме того, удаление поддержек – это достаточно ответственный процесс. Необходимо, во-первых, снять остаточные напряжения. Для этого нужно иметь соответствующее термическое оборудование. Во-вторых, необходимо иметь подходящий инструмент для аккуратного отделения построенной детали от платформы и последующего удаления поддерживающих структур. В-третьих, необходимо оборудование для пост-обработки построенных деталей. Кроме того, **AM**-машины – это целый комплекс, включающий в себя устройства для просеивания и смешения порошков, загрузки, разгрузки и очистки машины, системы фильтрации и охлаждения, системы хранения порошков, системы генерации и подачи инертных газов и др. Все это необходимо иметь ввиду при решении

вопроса о приобретении такой машины для рационального обустройства места инсталляции.

Компания **Concept Laser** входит в группу **Hofmann** и производит **AM**-машины с 2002 года. Название технологии – **LaserCUSING** (в слове «**Fusing**» – сплавление, первая буква заменена на «**C**» от **Concept**). В машинах используется волоконные лазеры с иттербиевым легированием (**Yb**-лазер). Построение деталей производится в среде защитного газа (**N_2**, **Ar**). Модельный ряд содержит пять машины. Самая маленькая - **M-lab**, выпущена в 2011 г, разработана специально для исследовательских целей, медицинского и ювелирного рынков, имеет диаметр пятна лазера 25 мкм, что обеспечивает высокое качество поверхности. Самая большая - **X line 1000R,** с размерами зоны построения 630x400x500 мм разработана совместно с Фраунхоферским институтом лазерных технологий (**FILT**) при участии **Daimler AG** и выходит на рынок в 2013 году. Первая машина уже установлена на **Daimler AG** для выращивания автомобильных компонентов из алюминия. Отметим, что эта работа была выполнена при поддержке Министерства образования и исследований Германии (в рамках реализации проекта "**Alu generative research and development project**") и является примером продуктивного государственного «вмешательства» в рыночные отношения. Машина **X line 1000R** с момента разработки позиционировалась как «индустриальная машина», т. е. для серийного производства.

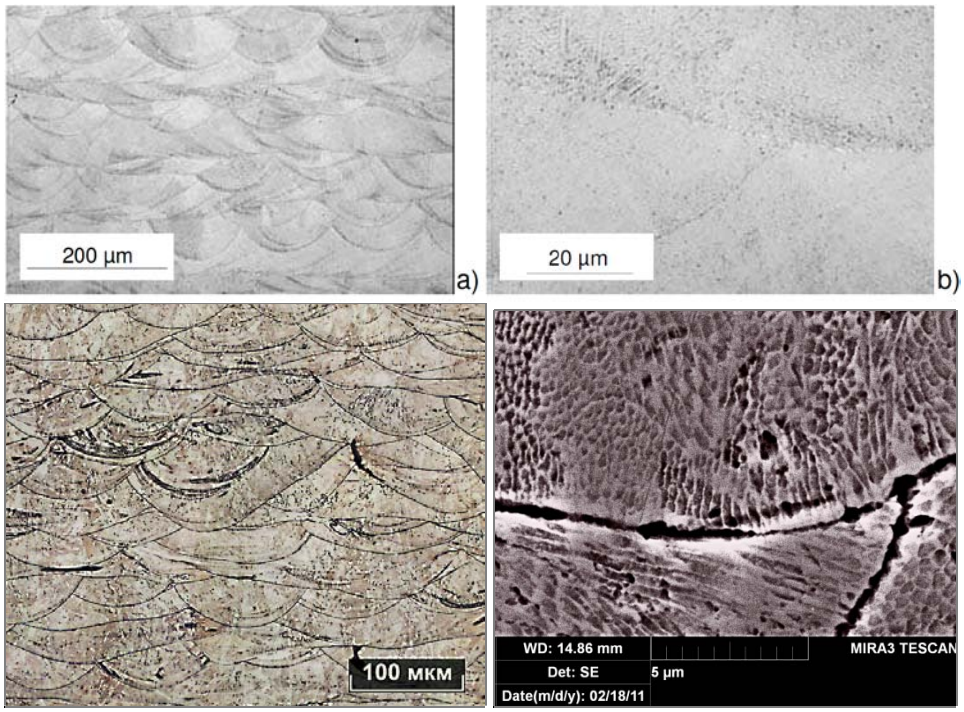
Рис. 10 Машина **M-lab** и презентация машины **X line 1000R** на выставке **Euromold 2012**

Компания **EOS** – одна из наиболее известных и успешных на рынке **AM**-технологогий, в последие два года продает более 100 машин, из них треть приходится на «металлические» машины. EOS одна из немногих европейских компаний, занявшая твердые позиции на рынке США. Например, американская компания **Morris Technology** (сейчас входит в **GE Aviation**) имеет в своем парке двадцать «металлических» **AM**-машин от **EOS**.

Рис. 11 Машины **EOSINT 280 и PRECIOUS M 080**

Свою технологию компания называет как **DMLS -Direct Metal Laser Sintering**, хотя

металлографические исследования [4, 5] показывают, что здесь происходит все-таки сплавление металла **(melting**), а не спекание (**sintering),** см. рис. 12. В настоящее время **EOS** выпускает машину **EOSINT 280**, улучшенную версию предыдущей модели **EOSINT 270**. Машина имеет встроенный генератор азота, который используется при построении деталей из металлопорошковых композиций на основе железа. Для титановых, никелевых и алюминиевых композиций используется аргон. Машина выпускается в двух модификациях – с лазером 200 Вт и 400 Вт для работы с увеличенным шагом построения. С 2013 года планируется выпуск новой машины **PRECIOUS M 080**, имеющий возможность работы с драгметаллами.



(*Предоставлено СПбГПУ).*

c) d)

Рис. 12 Структура образца из мартенситно-твердеющей стали 1.2709, полученного по технологии **DMLS**.
a, b – данным **S. L. Campanelli** [4]; c, d – по данным проф. Колбасникова Н. Г. [5]

EOS также интенсивно ведет работы по созданию **MLS**-машин (**Micro Laser Sintering**) с высоким разрешением, в частности, для применения в изготовлении медицинских инструментов (для эндоскопических операций), микроэлектроники и др. Опытный образец машины с размерами рабочей зоны Ø50, высота 30 мм позволяет строить детали с шагом 1-5 мкм и шероховатостью **Ra** около 2 мкм.

Отличительной чертой машин **Phenix Systems** (Франция) является оригинальный способ формирования слоя строительного материала, который позволяет обеспечить шаг построения 20 мкм. В качестве модельных метериалов используются металлопорошки со средним размером частиц d_{50}= 6-9 мкм. На этих машинах также возможно изготовление деталей из керамических композиций, которые после построения требуют спекания в высокотемпературной печи. В частности, могут быть изготовлены керамические стержни для специальных видов литья. Около 50 машин **PXS Dental** установлено в различных лабораторих для изготовления дентальных изделий из сплавов **Co-Cr**. Машины **PXS** также могут быть эффективно использованы для проведения НИР с целью исследований

особенностей рабочих процеесов лазерного синтеза и отработки **SLM**-технологий для различных порошковых композиций.

PXL **PXM** **PXS**

Рис. 13 Машины **Phenix Systems**

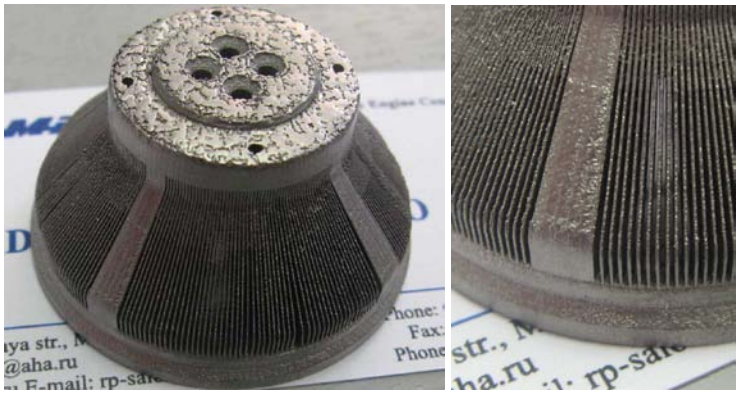
Компания **SLM Solution** (Германия) – один из мировых лидеров в области технологий лазерного синтеза. **SLM Solution**, как и многие другие, активно сотрудничает с **FILT**, и в результате этого сотрудничесва появилась, пожалуй, наиболее продвинутая на сегодняшний день машина **SLM 280**. В качестве опции, не дешевой – около 250 тыс. евро, в машину может быть интегрирован второй лазер 1000 Вт. Внешний контур детали и тонкие стенки «прорабатывает» первый лазер 400 Вт, а основное тело детали – второй, мощный лазер.

SLM 280 **SLM 500**

Рис. 14 Машины **SLM Solutions**

Вообще при построении сложных деталей регулирование мощности лазера является крайне желательным, но весьма сложным в реализации делом. Чем больше мощность лазера, тем быстрее происходит расплавление металла и тем быстрее строится деталь. Но с другой стороны, при этом в точку расплава подволится большое количество энергии, процесс идет очень интенсивно, со взрывным характером расплавления частиц металла, металл кипит, происходит его разбрызгивание и часть строительного материала выбрасывается из пятна расплава. Это может привести к повышенной пористости, значительному ухудшению качества поверхности. В таких условиях построение сложных тонкостенных элементов детали становится весьма затруднительным – частицы металла просто разлетается в стороны, а не сплавляются. Для формирования этих элементов нужен более деликатный инструмент – лазер меньшей мощности, но при этом и с уменьшенной производительностью. Сочетание двух лазеров разной мощности в машине

SLM 280 – это удачный компромисс. На машине могут быть построены детали с толщиной отдельных фрагментов до 0,3 мм. Это придает машине существенные преимущества: во-первых, значительно - до 5 раз, увеличивается скорость построения детали, и, во-вторых, улучшается внутренняя структура материала и чистота внешней поверхности (**Ra** 5-10). С 2013 года планируется выпуск еще одной новой машины **SLS 500** с размерами зоны построения 500x280x335 мм, в которой двухлазерная система будет уже базовой.



(толщ. рёбер 0,35 мм, *Предоставлено ФГУП «НАМИ»*)
Рис. 15. Деталь электротехнического устройства, построенная на машине **SLM 280**

Компания **Realiser** (Германия) не так давно, с 2010 года, самостоятельно вышла на рынок и раньше работала как фирма-партнер с **SLM Solutions.** Поэтому унаследовала и много общего от машин своего бывшего партнера. Особеностью машин является оригинальная оптическая система, уменьшающая диаметр пятна лазера и позволяющая строить детали с повышенной точностью, но на уменьшенной зоне построения. Из линейки машин **Realiser** следует выделить модель **SLM 50** класса **Desktop**, наименьшую из всех «металлических» машин и хорошо подходящую как для проведения НИР, так и для изготовления ювелирных и дентальных изделий. В качестве опции в машину может быть интегрирован стереомикроскоп. Машина может быть также использована в качестве агрегата для лазерной сварки.

SLM 50 **SLM 100**
Рис. 16. Машины **Realiser**

Машина **SLM 100** предназначена для изготовления малых серий деталей относительно небольшого размера с высокой точностью. Размеры зоны посроения 125x125x100 мм. Оригинальная оптическая система фокусирует пятно лазерного луча до размера 20 мкм, это позволяет строить фрагменты детали с толщиной стенки до 60 мкм.

В машине **SLM 250** опционально предусмотрена дополнительная оптическая система, позволяющая уменьшить диаметр пятна лазера с 40 мкм до 20 мкм, а новая система подачи материала позволяет сформировать слой для построения всего за 4 секунды.

Компания **Renishaw** - одна из ведущих мировых компаний в области измерительной техники, в 2010 г. включила в свой бизнес аддитивные технологии, приобретя фирму **MTT Technology**, которая незадолго до этого «развелась» с упомянутой ранее **SLM Solutions,** но сохранила независимое производство **SLM-машин**. В США эти машины продаются под брэндом **3D Systems**. При разработке новых АМ-технологий компания **Renishaw** к своим

Рис. 17 Машина **SLM 125**

приоритетам относит решение проблемы охраны окружающей среды, снижение энергозатрат, дорогостоящих расходных материалов и т. д. В настоящее время производятся две машины – **AM 125** и **AM 250**, конструкции которых во многом аналогичны машинам **SLM Solutions**. К достоинствам машин следует отнести высокую степень герметизации рабочей каемры. Это позволяет производить глубокую откачку воздуха перед началом построения, и после заполнения камеры аргоном (или азотом для не реактивных металлов) обеспечивать рабочий процесс при концентрации кислорода в камере ниже 50 **ppm** с весьма умеренным расходом инертного газа.

Компания **Arcam** одна из немногих, которая использует в своих машинах **EBM**-технологию. Особенности технологии, во всяком случае, сейчас ограничивают размер пятна электронного пучка в зоне расплава диаметром 0,2 - 1,0 мм, тогда как при использовании лазера эта величина на порядок меньше. Поэтому в плане чистоты поверхности и точности **EBM-**технологии уступают лазерным **SLM**-технологиям. Однако существует множество приложений, когда деталь «обречена» на финишную обработку на ЧПУ, будь она получена литьем или с помощью **AM**-технологий. В этих случаях чистота поверхности построенной детали не имеет значения, более важным является плотность и однородность материала. И здесь технология **Arcam** имеет преимущество. Ряд независимых авторов отмечает, что при сравнительно низкой частоте поверхности плотность материала деталей от **Arcam** выше, и его структура лучше, чем при использовании лазерных технологий. И если принять во внимание высокую производительность **EBM**-машин – 55-80 см^3/ч против 2-20 см^3/ч у аналогичных по размерам лазерных машин, то станет понятно, почему эти машины занимают доминирующее положение в сфере производства титановых протезов, иплантов и др. более-менее серийной продукции медицинского назначения. Компания продала более 100 систем в десять стран мира. Особенностью технологии **Arcam** является то, что процесс посроения детали происходит в камере, предварительно отвакуумированной до $<1x10^{-4}$ мбар. Газовая среда – воздух или иной газ, создает слишком высокое сопротивление электронному лучу, поэтому рабочую камеру вакуумируют. Но это позволяет получать качественные изделия из титана и титановых сплавов. При этом обеспечивается приемлемая точность построения – на уровне ±0,2 мм на длине 100 мм.

Рис. 18 Машина **Arcam**

Практически все перечисленные машины либо в базовой версии, либо опционально могут работать с наиболее востребованными на индустриальном рынке металлопорошковыми композициями: инструментальные стали (типа **H13**), мартенситностареющие стали (типа **18%NiMaraging 300**), алюминиевые сплавы (**AlSi10Mg, AlSi12**), чистый титан и его сплавы (типа **Ti6Al4V** и особо чистый **Ti6Al4V ELI**), сплавы **Co-Cr**, жаропрочные стали (**Inconel** и др.).

Еще один вид технологий послойного синтеза представлен машинами **3D Systems** и **ExOne** [6]. Особенностью технологий является то, что сначала в **AM-**машине выращивают так называемую «**green**-модель» (полуфабрикат). Процесс выращивания заключается в послойном скреплении матричного материала – стального порошка. **3D Systems** использует для этого плакированный металлический порошок (порошок в специальном миксере предварительно смешивается со связующим так, что связующее тонким слоем обволакивает частички порошка). При построении в машине лазер расплавляет связующее и связывает таким образом частички порошка между собой. Затем грин-модель помещают в печь и удаляют связующее. После этого производят иак называемую инфильтрацию – пропитку модели расплавленной бронзой. Схема процесса условно показана на рис. 19. В машинах **ExOne** (США) грин-модель получают посредством технологии **Ink-Jet** (или **Binder Jet** по классификации **ASTM**): связующий реагент впрыскивается в процессе построения на заранее сформированный слой матричного материала. И в том, и в другом случаях грин-модель извлекают из машины, тщательно очищают от свободного порошка и помещают в печь с защитной средой (обычно $\mathbf{N_2}$), где при температуре 1000-1100°С производят пропитку грин-модели расплавленной бронзой.

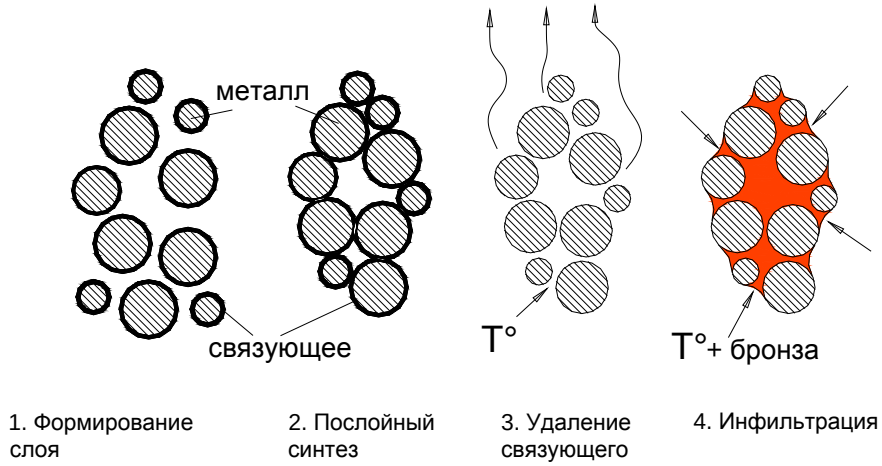


Рис. 19 Получение изделий из сталебронзовых композиций

На рис. 20 показана выращенная грин-модель непосредственно перед закладкой в печь. По периферии модели встык расположены питатели, на которых установлены бронзовые бруски. В печи бронза расплавляется и через питатели за счет капилярного эффекта приникает в тело грин-модели. Таким образом получают изделие из материала, представляющего собой некий конгломерат стали – 60% и бронзы-40%, название которому пока не придумано. Чистота поверхности деталей достаточно хорошая – **Ra** 5-10, минимальная толщина стенки около 1 мм. Однако прочностные свойства невысокие: предел прочности при растяжении 610 МПа; твердость также невысока – **HRC**= 10-20. Эти технологии часто используют для быстрого изготовления оснастки для литья пластмасс (пресс-формы выдерживают до 200-500 тыс. циклов), а также для серийного производства деталей, работающих в условиях трения – зубчатые передачи, валы, втулки и т. д. Например, машины **M-Print** компании **ExOne** используются для серийного производства зубчатых колес и рабочих органов насосов. Эти машины строят грин-модели со скоростью до 6 мм/ч по высоте, что при размерах рабочей зоны (**XY**) 780х400 мм равнозначно производительности 1780 см^3 в час, это на порядок выше, чем при использовании лазерных технологий. В машине **M-Lab** можно также выращивать детали из порошкового силикатного стекла (с последующим спеканием).

(*Предоставлено ФГУП «НАМИ»*)

Рис. 20. Грин-модель вставки ТПА, технология **3D Systems**

M-Flex **M-Print**

Рис. 21 Машины **ExOne .** Извлечение грин-модели из машины [5].

К перспективным **Ink-Jet-**технологиям можно также отнести технологию **fcubic**, недавно приобретенную компанией **Höganäs AB** (Швеция) вместе с одноименной фирмой-прародительнецей этой технологии. Суть ее состоит в том, что вместо связующего, как у **ExOne**, при построении грин-модели впрыскивают специальный состав, ускоряющий поглащение теплового излучения. После построения грин-модель не извлекают из массива материала, а вместе с ним помещают в печь, где происходит спекание обработанной указанным составом модели, тогда как не обработатанная часть материала остается не спеченной. Это принципиальное отличие от упомянутых выше технологий **ExOne** и **3D Systems**: грин-модель не инфильтруют бронзой или иным сплавом, а именно спекают, обеспечивая однородность химического состава материала.

Строительные материалы: титановые сплавы, нержавеющие и инструментальные стали. Данная технология накладывает определенные ограничения на размеры деталей – в пределах 10….20 мм. Фирма не продает оборудование, но работает как сервис-бюро, изготавливая по заказам детали из нержавеющих сталей, цветных металлов. Заявляемые преимущества – высокая производительность, умеренная цена.

Существует и другая, родственная **fcubic** технология, так называемая **SIS**-технология - **Selective Inhibition Sintering** [7], в соответствии с которой на неотверждаемую часть материала наносят ингибитор – раствор соли металла. После построения, так же как и в технологии **fcubic**, весь бункер с материалом помещают в печь, где необработанная часть материала спекается, а обработанная ингибитором остается неспеченной. Однако эта технология пока не вышла из стадии НИР и перспективы ее коммерческой реализации остаются не ясными.

Рис. 22 Машина **LUMEX Avance-25**

Компания **Matsuura Machinery** предлагает гибридную технологию – сочетание **SLM**-технологии и механообработки [8]. В рабочей камере машины **LUMEX Avance-25** ведется послойное построение детали, как и в других **AM**-машинах. Через каждые 10 слоев производится чистовое фрезерование выращенной части детали (шпиндель 43000 мин$^{-1}$). Размеры зоны построения (обработки) 250x250x100 мм. На рис. 22 представлен пример изготовления прессформы для литья корпуса фотокамеры. Время послойного синтеза для деталей **A** и **B**, соответственно, 68 час 21 мин и 36 час 00 мин; время механообработки – 29 ч 08 мин и 53 ч 30 мин. Машина предназначена главным образом для изготовления литейной оснастки с конформной системой охлаждения. **LUMEX Avance-25** специально разработана для рынков Китая, Тайваня, Индонезии и других стран Ю-В Азии, которые стали мировыми центрами производства пластмассовых изделий. Базовая цена машины около € 800 тыс.

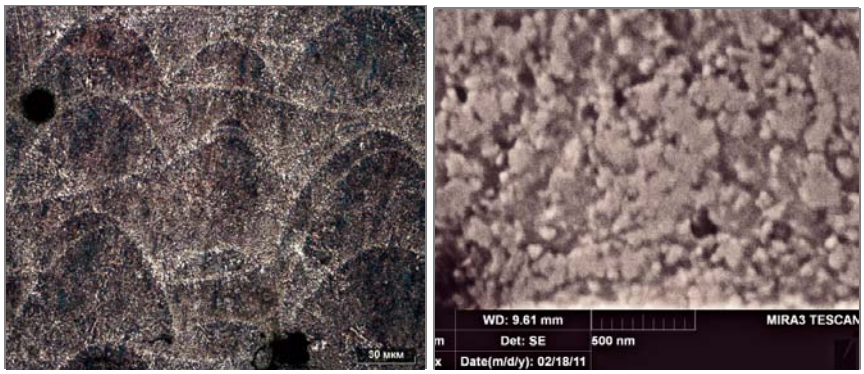
A B

Рис. 23 Пресс-форма для литья корпуса цифровой

Разнообразие моделей машин позволяет сделать оптимальный выбор оборудования под конкретные задачи производства. Разработчики машин, как правило, тесно сотрудничают с университетским научным сообществом для решения фундаментальных металлургических проблем, совершенствования лазерной техники, программного обеспечения и т. д. Общей проблемой **SLM-**технологий является проблема обеспечения надлежащей микроструктуры синтезированного материала, устранения пористости, в той или иной мере характерной для всех видов **AM**-технологий. В ряде исследований, в частности [4, 5, 9], показано, что пористость зависит как от материала, так и от параметров режима сплавления. Например, для алюминиевых сплавов (рис. 24) пористость может достигать 4-5%, для сплавов **Ti** – до 2%, тогда как для сталей – менее 0,2%.

Для устранения внутренней пористости для особо ответственных деталей применяют специальные методы термической обработки и обработки давлением, включая **HIP** (**Hot Isostatic Pressure**) – горячее изостатическое прессование.

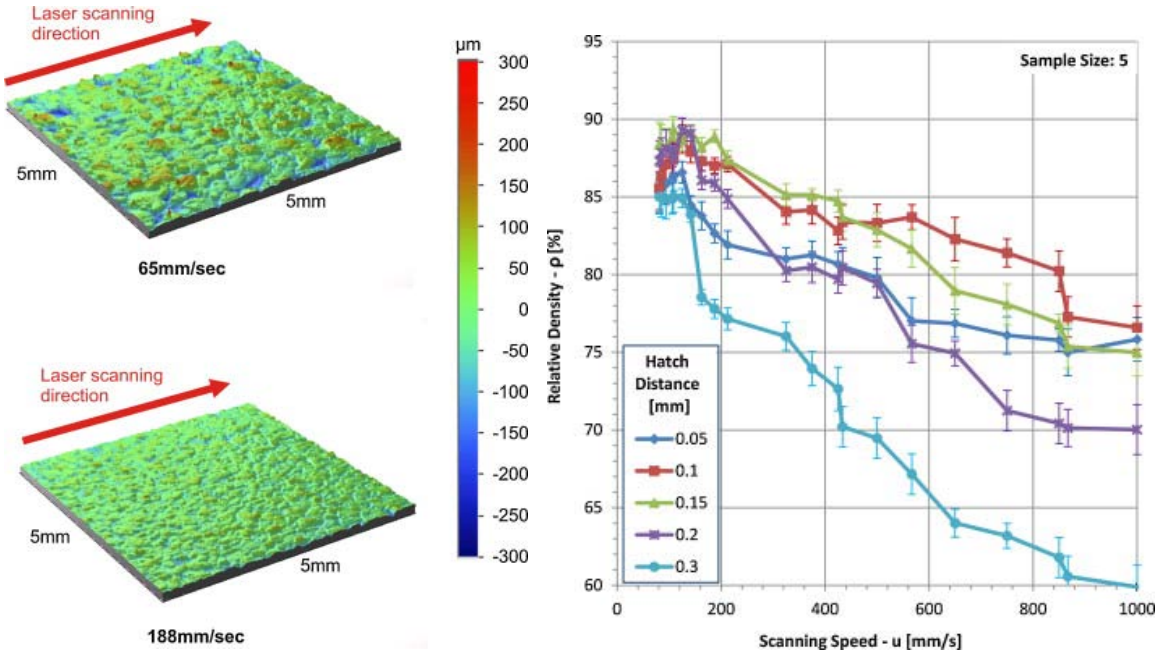
Обычно каждая компания-производитель **AM**-машин предлагает определенный набор строительных материалов и подробную инструкцию для настройки параметров машины под каждый из материалов. Включению в список материалов предшествует длительная работа по определению оптимальных режимов построения. Зачастую эта работа проводится совместно с университетами, обладающими необходимым исследовательским оборудованием. В ходе этой работы определяются оптимальная



(Предоставлено СПбГПУ)

Рис. 24 Микроструктура сплава **AlSi9Mg** [5]

взаимосвязь таких параметров как мощность лазера, фракционный и химсостав порошка, шаг «штриховки» лазера (или шаг сканирования) в плоскости **X-Y**, шаг построения, скорость сканирования лазера (скорость лазерного луча), температура плавления материала. Чем выше скорость сканирования, тем выше производительность машины и тем меньше шероховатость поверхности, рис. 25а [9]. Однако и тем выше вероятность образования пористости, рис. 25б. Для приведенного на рис. 25 варианта наилучшая плотность структуры обеспечивается при скорости сканирования 120-130 мм/с. Особое значение имеет согласование шага сканирования, свойств материала и других параметров с целью минимизации пористости и оксидных включений во внутренней структуре стоящейся детали, рис. 26.



а) б)

Рис. 25 Влияние скорости сканирования на шероховатость поверхности (а) и относительную плотность (б) образца, **SLM**-технология [9]
Al-сплав 6061, мощность лазера 50 Вт, шаг сканирования 0,15 мм.

Интересный способ минимизации пористости предложен **Yasa E**. и **Kruth J**. (Католический университет г. Лёвен, [10, 11]), согласно которому производят повторное сплавление слоя, т. е. каждый слой «обрабатывается» лазером дважды. В результате пористость снижается на порядок (рис. 27), однако при этом почти вдвое увеличивается время построения детали.

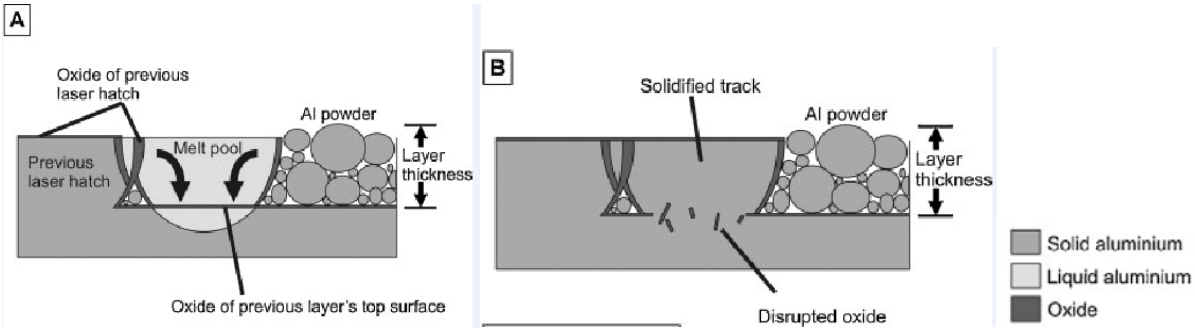
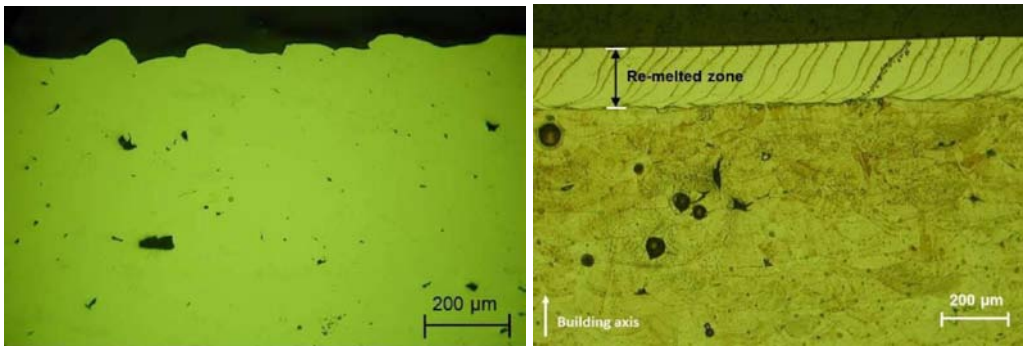


Рис. 26 Механизм образования пористости и оксидных включений [9]



а) б)

Рис. 27 Микроструктура образца из нержавеющей стали 316L [10]
а) без вторичного сплавления; б) с вторичным сплавлением

Элитный клуб компаний-производителей машин для выращивания деталей из металла постоянно расширяется. В 2012 году в него вошли китайские компании **Beijing Long Yuan Automated Fabrication Systems** и **Trump Precision Machinery**.

Основные параметры машин для послойного синтеза из металлопорошковых композиций

Табл. 1. Часть 1

Модель	Рабочая зона, мм	Шаг построе-ния, мкм	Мощ-ность, Вт	Производи-тельность, см^3/ч	Модельные материалы*
Concept Laser					
Mlab	50x50x80 70x70x80 90x90x80	20-80	50 100	1-5	Н. с. 316L и 17-4PH, и. с. H13, Al, Co-Cr, Ti, Inconel, Cu, Au, Pt, Ag
M1 (для не реактивных металлов)	250x250x250	20-80	200	2-10	Н. с. 316L и 17-4PH, и. с. H13, Ni, Co-Cr, Au, Pt, Cu, Ag.
M2 (для реактивных металлов)	250x250x280	20-80	200 400	2-20	Н. с. 316L и 17-4PH, и. с. H13, Ti, Al, Co-Cr, Inconel, Cu, Au, Pt, Ag.
M3 linear (с лазерной маркировкой)	300x350x300	20-80	200 400	2-20	Н. с. 316L и 17-4PH, и. с. H13, Cr, Ni, V, Co, Au, Pt, Cu, Ag.
X line 1000R	630x400x500	30-200	1000	10-100	Н. с. 316L и 17-4PH, и. с. H13, Ti, Al, Co-Cr, Inconel 718 и 625, Cu,

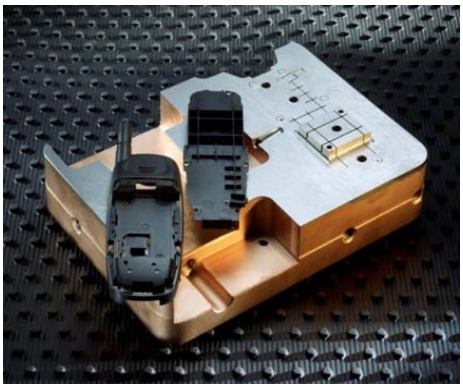
					Au, Pt, Ag.
EOS					
EOSINT 280	250x250x325	20-60	200 400	10-20	Н. с. 316L, Al, Fe, Co-Cr, Ni, Ti, Inconel
Phenix Systems					
PXS	100x100x80		50	1-5	Н. с., м. с., Inconel, керамика
PXM	140x140x100		300	5-10	
PXL	250x250x300		500	10-15	
SLM Solution					
SLM 125	125x125x75	20-75	100 200	10-15	Н. с. 316L, и. с. H13, Ti, Al, Co-Cr, Inconel, Au.
SLM 250	250x250x350	20-75	200 400	10-15	
SLM 280	280x280x350	20-200	400+1000	20-35	
SLM 500	500x280x325	20-200	400+1000	60-70	Н. с. 316L; и. с. H13; Ti; Al; Co-Cr; Inconel.
Realiser					
SLM 50	Ø70x40	20-50	20-120	5-10	Н. с. 316L, Ti, и. с. H13; Ti6Al4V, Co-Cr, Au.
SLM 100	125x125x100	20-100	20-200	10-15	
SLM 250	250x250x300	20-100	400 600	10-15	н. с. 316L, и. с. H13, Ti, Al, Co-Cr, Inconel.
Renishaw					
AM 125	125x125x125	20-100	100 200	5-10	Н. с. 316L и 17-4PH, и. с. H13, Ti, Al, Co-Cr, Inconel.
AM 250	250x250x300; 250x250x360	20-100	200 400	5-20	
Arcam					
A1	200x200x180	50-100	50–3500	55-80	Ti, Co-Cr, Inconel.
A2	200x200x350; Ø300x200	50-100	50–3500	55-80	
3D Systems					
sPro 60	380x330x457	100-200	50-100	10-15	Н.с.316L+бронза
sPro 140	550x550x460	100-200	100-200	15-20	
sPro 230	550x550x750	100-200	100-200	15-20	
ExOne					
M-Lab	40x60x35	min. 50	100-150	н/д	Н.с.316L+бронза; н.с.420L+бронза; стекло.
M-Flex	400x250x250	min. 100	100-150	н/д	
M-Print	780x400x400	мин. 100	100-150	1780	
Matsuura					
Lumex Avance-25	250x250x185	20	400	н/д	и. с. H13.
* н.с. – нержавеющая сталь; м.с. – мартенситностареющая сталь; и. с. – инструментальная сталь; **Inconel** – жаропрочные сплавы Инконель 625 и 718; н/д – нет данных					

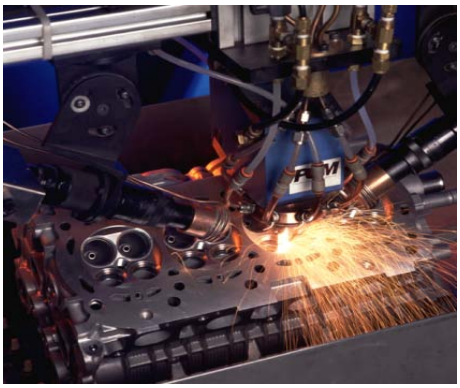
3.2 Вторая группа машин - Direct Deposition

К этой группе относятся машины компаний **POM Group*** , **Optomec**, **Sciaky** (все США), **Irepa Laser** (Франция), **InssTek** (Ю. Корея).

(*Компания **POM Group** в декабре 2012 года приобретена другой американской компанией **DM3D)**.

POM (Precision Optical Manufacturing)* является разработчиком **DMD**-технологии и держателем патентов на оригинальные технические решения по лазерным системам и системам управления с обратной связью с одновременным регулированием в режиме реального времени основных параметров постоения детали – величины подачи материала, скорости перемещения головки и мощности лазера, которые обеспечивают стабильность и качество рабочего процесса. Технология позволяет производить параллальную или последовательную подачу двух видов материала с различными физико-химическими свойствами, и, таким образом, создавать би-металлические компоненты, например, формы для литья пластмасс: тело формы из меди, рабочая часть из инструментальной стали (рис. 28), или же наносить специальные покрытия, например, на гильзы цилиндров, поршневые кольца, кулачковые валы, седла клапанов (рис. 29).





(Источник www.dm3dtech.com)

Рис. 28 Комбинированная вставка ТПА. Рис. 29 Нанесение износостойкого покрытия на седла клапанов ДВС.

POM Group работает в тесной кооперации с компанией **Trumpf** (Германия) и предлагает несколько моделей **AM**-машин, предназначенных для ремонта инструментальной оснастки (штампы, матрицы, кокили и т. д), нанесения защитных покрытий, а также для изготовления литейных форм с конформной системой охлаждения, внутренними теплоотводными элементами и др. Возможности машин позволяют также производить детали из композитных материалов, используя две или несколько систем подачи разнородных порошков. Есть опыт создания так называемых градиентных материалов путем послойного нанесения и сплавления двух или нескольких материалов с различными физико-химическими свойствами. Новые модели и **44R** и **66R**, **IC106** используют 6-ти осевые роботы. Машины **DMD 105D** и **505D** [13] выполнены в традиционной компоновке на базе 5-ти осевых обрабатывающих центров. Мощные лазеры (по выбору - от 1 до 5 кВт), обеспечивают высокую производительность – скорость синтеза составляет 24-160 см^3/ч. Оригинальная система управления позволяет регулировать размер пятна расплава в зависимости от конфигурации элементов строящейся детали: уменьшая размер пятна и, соответственно, подачу материала в зону расплава при проработке тонкостенных элементов и увеличивая - при построении массивных элементов.

Рис. 30 Машина **DMD IC106**

Машины **DMD 105D** и **IC106** имеют герметичное исполнение рабочих камер для работы с реактивными материалами, причем модель **IC106** оснащена также специальной системой мониторинга зоны расплава «ин ситу» для контроля и управления процессом создания градиентных структур. Материалы: инструментальные сплавы, стеллиты, Инконели, титановые сплавы.

Стоимость машин достаточно высокая – более $500 тыс., так же как и стоимость работ. Например, российская компания ФГУП «Производственное объединение «ОКТЯБРЬ» предлагает услуги по восстановлению технологической оснастки на машине **DMD 5000** из расчета $1,5-3,0 за 1 см^3 материала. Учитывая стоимость подготовительных операций: доставку детали, создание 3D-модели, управляющей программы, и стоимость финишной механообработки, экономическая целесообразность такой работы становится не очевидной.

Optomec – один из мировых лидеров технологий **Direct Deposition**. Последние годы компания стабильно продает 3-4 установки в год. В настоящее время производятся три модели: **LENS 750**, **LENS MR-7**, в основном для научно-исследовательских целей, и машина **LENS 850**, предназначенная для промышленного использования. Опционально машины могут быть оборудованы двумя или более бункерами для подачи разных материалов в зону расплава. Процесс построения деталей производится в среде аргона. Преимуществом машин **Optomec** является быстрая смена материалов - практически за минуты. Высокая скорость охлаждения, более 1000°C , дает возможность регулирования и управления микроструктурой строящейся детали.

LENS MR-7 **LENS 850-R**

Рис. 31 Машины **Optomec**

Модели **LENS 750, LENS MR-7** в базовой версии имеют 3 оси управления, в качестве опции дополнительно может быть установлен поворотный стол, обеспечивающий 4-ю и 5-ю оси управления. Точность позиционирования 0,25 мм, производительность до 100 г/ч. **LENS 850-R** в базовой версии имеют пять осей управления и оснащены двумя бункерами по 14 кг. В машинах используются порошки с фракционным составом 36 - 150 мкм.

Технология, разработанная компанией **Irepa Laser** (Франция) именована, как **EasyCLAD** (где **CLAD** - **Construction Laser Additive Directe**). Коммерческую реализацию этой технологии осуществляет французская компания **BeAM** (**Be Additive Manufacturing**). **BeAM** предлагает четыре типа машин с возможностью выбора размеров рабочей зоны, мощности лазера, системы подвода порошкового материала в зону расплава – одно- или двухсопловую. В зависимости от применяемого сопла ширина наносимого слоя может варьировать от 0,6 до 5,0 мм. В рабочей камере поддерживается инертная атмосфера с содержанием **O_2**<40 **ppm** и **H_2O**< 50 **ppm**.

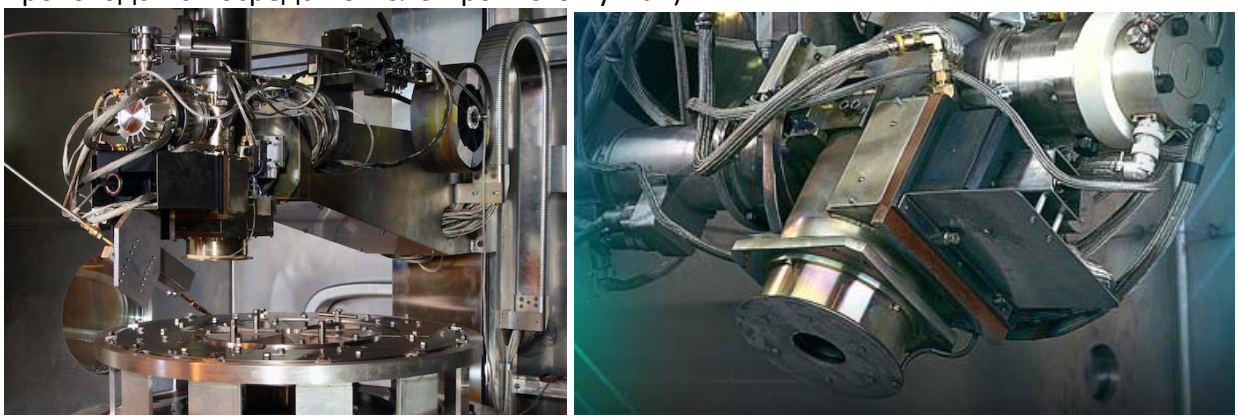
Машины разработаны в рамках национального проекта по созданию технологий для производства деталей аэрокосмического назначения, ремонта деталей авиационных двигателей и технологической оснастки. В качестве строительного материала применяются обычные (для аддитивных технологий) металлопорошковые композиции дисперсностью в пределах 45-75 мкм и 50-150 мкм. Система подачи материала коаксиальная. Однако, судя по общему количеству инсталляций (четыре) работы компании **Irepa Laser** в области **AM**-технологий все еще находятся на стадии ОКР. Последняя модель - **MAGIC LF6000,** с рабочей зоной построения 1500x800x800 мм оснащена двумя сопплами для подачи строительного материала и объявлена готовой к коммерческой реализации в 2012 году. Базовая цена машины около € 750 тыс.

Рис. 32 Машина **MAGIC LF6000**

Южно-Корейская компания **InssTek** разработала машину **MX-3**, во многом схожую с машинами **Optomec** и **POM**. Машина имеет **CO_2**-лазер от **Trumpf**, пять осей управления и оснащена многоканальной системой подачи материала.

Рис. 33 Машина **MX-3**

Оригинальную аддитивную технологию применяет компания **Sciaky** (США). Компания специализируется на разработке технологий и оборудования для сварки и свои «сварочные» компетенции использовала для создания **AM**-машины, в которой построение детали производится методом послойного наваривания материала в расплаве, сформированном не электрической дугой, а электронным лучом. Технология называется **EBDM** - **Electron beam Direct Manufacturing** («прямое производство посредством электронного пучка»).



(Источник www.sciaky.com)

Рис. 34 **EBDM** –машина компании **Sciaky**

Sciaky рассматриавает технологию **EBDM** как наиболее перспективную для промышленного применения, подчеркивая основное преимущество этой технологии – высокую производительность – 7…18 кг/ч, что позволяет выращивать крупные детали, расмеры которых исчисляются метрами, и что невозможно или чрезмерно дорого обеспечить, используя другие **AM**-технологии. Безусловно, сам принцип формирования

детали обусловливает низкое качество поверхности синтезированной детали. Однако, сочетание **EBDM**-технологии с традиционными технологиями механообработки позволяет получить результат с приемлемыми затратами. Модельным материалом здесь является фидсток в виде металлического прутка или проволоки. Это также является преимуществом технологии, поскольку в таком виде доступны материалы весьма широкого спектра: никелевые сплавы, нержавеющие и инструментальные стали, сплавы **Co-Cr** и многие другие, стоимость которых существенно ниже, чем стоимость в порошковом состоянии.

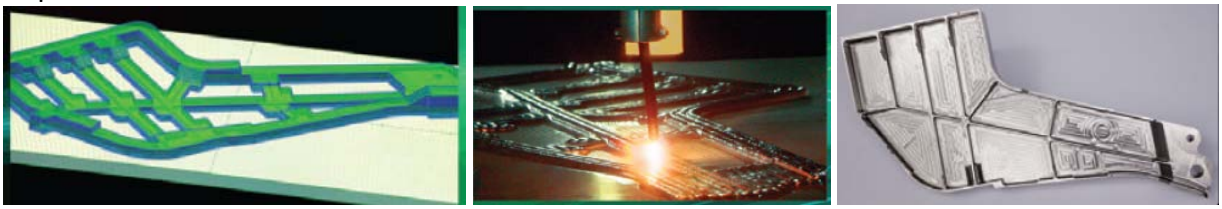


Рис. 35 Изготовление детали по технологии **Sciaky**

В настоящее время компания отказалась от типоразмерного ряда машин и производит только одну базовую модель **Sciaky's DM** с размерами зоны построения 5700x1200x1200 мм и все модификации создает непосредственно под требования заказчика. Машина позволяет в автоматическом режиме последовательно строить до 10 различных деталей в течение одного цикла вакуумизации рабочей камеры. Стоимость машины болеее $2,0 млн.

Относительно новый процесс **IFF** (**Ion fusion formation)** в 2004 г запатентовала компания **Honeywell Aerospace** [14]. Технология относится к группе **Direct Deposition** и аналогична технологии **Sciaky**, но в качестве источника энергии для плавления предполагает использование плазматрона 102, ионизирующего инертный газ и генерирующего поток плазмы 170 (рис. 36). Температура плазмы достигает 5000-30000К.

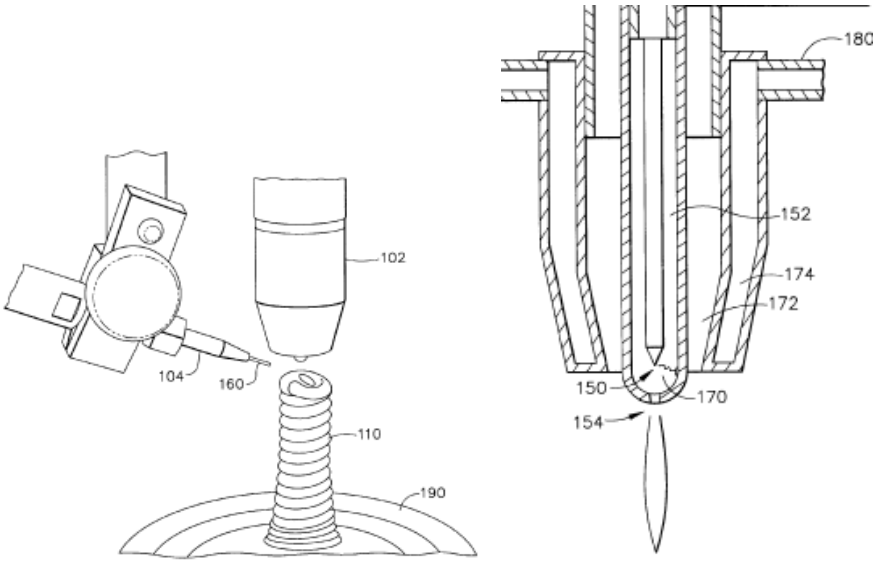
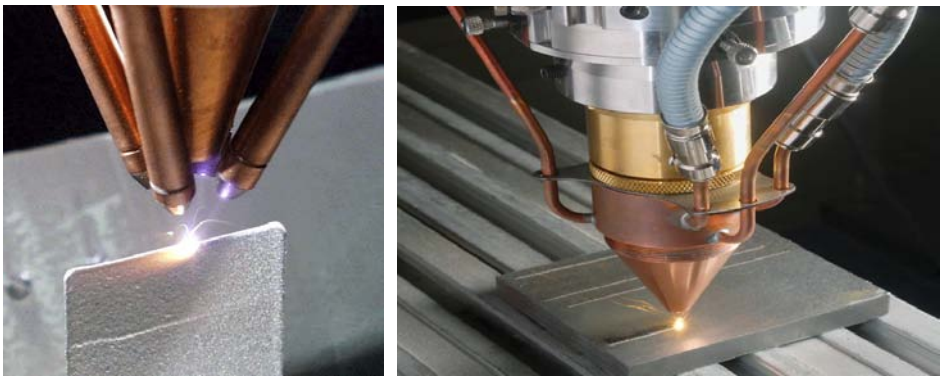


Рис. 36 Фрагмент из описания пат. США 6,680,456 B2 [14]
102 – плазматрон; 110 – деталь; 104 -механизм подачи материала; 160 –фидсток в виде прутка; 150 – генератор плазмы; 152 – аргон; 154 – сопло; 172 – гелий; 174 – водяная рубашка охлаждения;

В качестве фидстока используется металлический пруток. Материалы: алюминиевые и титановые сплавы, инконели, конструкционные стали и др. Опытная машина имеет

размеры зоны построения 1200x1200x1800 мм. К достоинствам этой технологии авторы относят относительно невысокую стоимость по сравнению с лазерными системами.

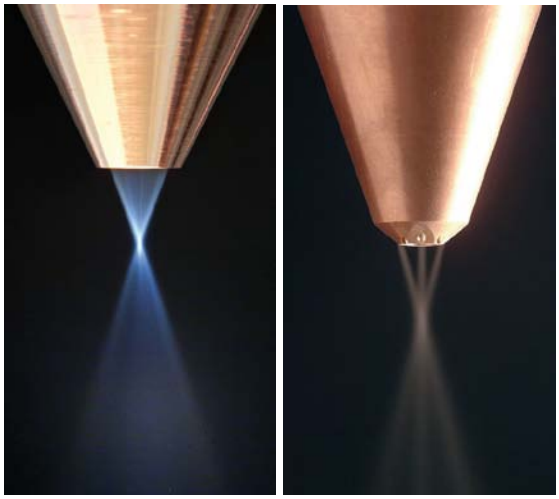
Основной рабочий орган машин – это лазерная головка, представляющая собой чрезвычайно сложный агрегат, в котором расположены система фокусировки лазера, система охлаждения, система подачи материала, а также элементы системы управления (датчики, видеокамеры и т. д.). В процессе построения детали необходимо согласовать несколько параметров: мощность лазера, размер пятна расплава, интенсивность подачи материала, дисперсность порошкового материала, скорость движения головки, обеспечив при этом точную фокусировку подачи металлопорошковой композиции в зону расплава. В зависимости от сочетания параметров построения коэффициент использования материала может варьировать от 0,2 до 0,9, т. е. от 20 до 90% материала, поступившего через сопловые отверстия системы подачи, фактически формируют деталь.



а) б)

(Источники www.optomec.com, www.ilt.fraunhofer.de)

Рис. 37 Системы **Optomec** (а), **Fraunhofer ILT** (б)



(Источник www.ilt.fraunhofer.de)

Рис. 38 Коаксиальная и многоканальная системы подачи материала

Разные компании используют различные системы подачи материала: одноканальные, многоканальные (например, **Optomec**), коаксиальные (например, **POM**, **Fraunhofer ILT**), рис. 37, 38. Те и другие имеют свои достоинства и недостатки. Совершенствование систем подачи материалов ведется очень высокими темпами. В опытных образцах с мощными – 4-10 кВт лазерами, достигнута производительность (или темп осаждения материала) до 9-15 кг/ч [13].

AM-процесс из группы **Sheet lamination** (соединение листовых материалов), применительно к металлу нашел практическое воплощение только в оборудовании компании **Fabrisonic** (США). Саму технологию в 90-х годах разработала компания **Solidic**a. Суть технологии, ее называют **UAM** (**Ultrasonic additive manufacturing**), заключается в следующем, рис. 41 (см. также выше рис. 4). Металлическую фольгу накатывают роликом, к которому при этом прикладывают нормальную силу. С помощью ультразвукового генератора создают микро-перемещения в направлении, поперечном направлению движения ролика. В результате этого в месте контакта двух листов фольги происходит разрушение оксидной пленки,

возникает пластическая деформация и тепловыделение, которого достаточно для диффузионного проникновения молекул одного металла в другой. Происходит своего рода сварка слоев фольги. Затем сформированный слой фольги обрабатывают фрезерованием, удаляя «лишний» металл. Таким способом могут быть получение композитных изделий из в принципе не свариваемых материалов, например композиция сталь-титан-медь. Данную технологию применяют как для создания композиционных материалов, так и для изготовления изделий: технологической оснастки, пресс-форм с конформной системой охлаждения, матриц для термовакуумной формовки и т. д.

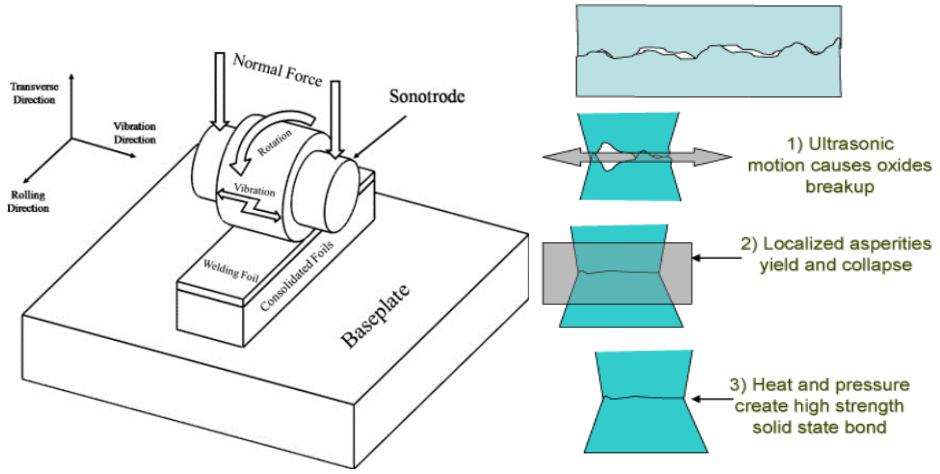
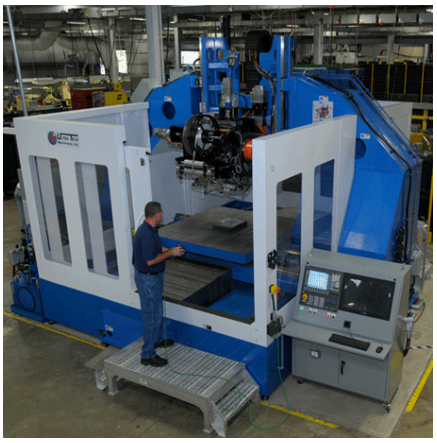


Схема процесса **UAM**



Форма для литья под давлением *(источник Wohlers Report 2012)*

Рис. 41 Машина **SonicLayer 7200**

Компания выпускает три различные машины: **SonicLayer R200** с рабочей зоной 508x305x524 мм, специально разработанную для университетов, научно-исследовательских организаций и малого бизнеса; и две индустриальные **SonicLayer 4000** и **SonicLayer 7200** с рабочей зоной, соответственно, 1016x1016x610 мм и 1829x 1829x914 мм. В обе последние машины интегрирован 3-х координатный обрабатывающий центр. Производительность машины **SonicLayer 7200** составляет около 60 дюйм^3/ч (983 см^3/ч).

Основные параметры машин для послойного синтеза из металлопорошковых композиций **Табл. 1. Часть 2**

	Размеры зоны построения, мм	Источник энергии, мощность, Вт.	Толщ. слоя, мм	Производи-тельность, см^3/ч	
Optomec					
LENS 750	300x300x300	500; 1000; 2000	0,3-1,0	30-100	CP Ti, Ti-64
LENS MR-7	300x300x300	500	0,3-1,0	30-100	6264; и.с.: H13, A2, S7; н.с.: 304, 316, 420, 17-4 PH; Инконель 625, 718; Хастеллой X; Cu, Al, Стеллит 21
LENS 850-R	1500x900x900	1000; 2000; 3000; 4000	0,3-1,0	30-150	
POM (Trumpf)					
DMD505D	863 x 863 x 609	1000-5000	0,2-1,2	20-150	и.с. H13, S7; 420SS, 316SS; CPM1V, CPM10V; Cermets, C250, C276; Inconel 625, 718; Waspalloy; Invar; стеллиты - 6, 21, 31; Ti, Ti-6Al-4V
DMD103/105D	300 x 300 x 300	1000-5000	0,2-1,2	20-150	
DMD 44R (Robotic DMD)	1950 x 2140 x 330°	1000-5000	0,2-1,2	20-150	
DMD 66R (Robotic DMD)	3200 x 3665 x 360°	1000-5000	0,2-1,2	20-150	
DMD IC106 (Robotic Inert chamber m/c)	800 (31.5) reach, 6-axis robot	1000-5000	0,2-1,2	20-150	
Irepa Laser (BeAM)					
VC LF200 (LF300, LF500)	400x350x200	300-500	0,1-0,3	0,5-4,0	н. с. 316L, 410; CpTi, Ti-Al-V,INCO 718, 625; Stellite 6-12-21-25, и.с. H13, D7, T15, CPM 10V,M2, Waspalloy, 440, Hatfield steel,Cu.
VI LF4000 - MesoCLAD - MacroCLAD	950 x 900 x 500	300-500 1000-4000	0,1-0,3 0,5-1,2	0,5-4,0 8,0-85,0	
VH LF4000 - MesoCLAD - MacroCLAD	650x700x500	300-500 1000-4000	0,1-0,3 0,5-1,2	0,5-4,0 8,0-85,0	
MAGIC LF6000	1500x800x800	750-4000	0,2-0,8	8-50- мм3/ч	
InssTek (3)					
MX-3	1000x800x650	500-1000	н/д	н/д	P20, P21, H13, D2, 304, 316, and 420 steels; CP Ti, Ti-6-4,; Инконель 600, 625, 690, 713, 718, 738; Hastelloy X; Ni, Co-Cr, слеттиты 6, 21.
MX-4	450 x 450 x 350		н/д	н/д	
Sciaky					
Sciaky's DM	5700x1200x1200	(электрон-ный луч)	н/д	7-18 кг/ч	н. с.; сплавы Ti, Ni, Al.
Honeywell Aerospace	1200x1200x1800	(плазма)	н/д	н/д	Ti, Al, Inconel, 316L.
* н.с – нержавеющая сталь; и. с. – инструментальная сталь; Inc. – Inconel (Инконель); CpTi – чистый титан; Ni-Base – сплавы на основе никеля;					

4. Материалы для «металлических» АМ-машин

4.1 Общие положения

Под порошками понимают сыпучие материалы с характерным размером частиц до 1,0 мм. Порошки весьма условно классифицируют по размером частиц (по условному диаметру **d**), подразделяя их на нанодисперсные с **d**<0,001 мкм, ультрадисперсные - **d** =0,01-0,1 мкм, высокодисперсные **d**=0,1–10 мкм, мелкие - **d**= 10–40 мкм, средние - **d**=40–250 мкм и крупные - **d**=250–1 000 мкм [15].

В настоящее время не существует общих требований к металлопорошковым композициям, применяемым в **АМ**-технологиях. Разные компании-производители **АМ**-машин предписывают работу с определенным перечнем материалов, обычно поставляемых самой этой компанией. В разных машинах используются порошки различного фракционного состава. Одним из параметров, характеризующих порошок, является величина $\mathbf{d_{50}}$ – «средний диаметр частиц». Например, $\mathbf{d_{50}}$ = 40 мкм означает, что у 50% частиц порошка размер частиц меньше или равен 40 мкм. Так, в машинах **Phenix Systems** используется порошок с $\mathbf{d_{50}}$=10 мкм; для машин **Conzept Laser** дисперсность порошка лежит в переделах 25…52 мкм при $\mathbf{d_{50}}$=26,9 мкм; для **Arcam** размер частиц составляет 45-100 мкм, для машин **SLM Solutions** $\mathbf{d_{50}}$=10-30 и т. д. Существует определенное недоверие к порошкам разных производителей. Нет никакой гарантии, что купив материал у одного производителя и дополнительное количество у другого, вы получите изделия одинакового качества. Все это диктует необходимость стандартизации материалов для **АМ**-технологий. Здесь тоже необходима большая исследовательская работа, поскольку современные методы, применяемые для оценки свойств материалов для традиционных технологий, не могут быть применены к аддитивным технологиям в силу наличия анизотропии, неизбежной при послойном принципе создания изделия.

За рубежом вопросы стандартизации по материалам для аддитивных технологий находятся в компетенции **NIST** - **National Institute of Standards and Technology** (США); Международной организация по стандартизации **ISO** (комитет **TC261** по аддитивным технологиям), и **ASTM** (международный комитет **F42** по аддитивным технологиям). В настоящее время разработан только один стандарт (**ASTM F2924**) на материал **Ti-6-Al-4-V** для применения в технологиях **Powder Bed Fusion**.

Особенностью процесса лазерного синтеза, например, по технологии **SLM** является то, что при построении детали лазерный луч не только сплавляет частицы порошка, формируя тело детали, но и «портит» материал, непосредственно прилегающий к поверхности строящейся детали. Поэтому в практике работы с **SLS**-машинами применяют методы просеивания отработанного материала с целью удаления «бракованной» части с дальнейшем перемешиванием «работавшего» порошка со свежим. В какой пропорции – каждая компания решает по-своему. Таким образом, идентичность образцов, построенных на одной машине, из одного и того же порошка, но с учетом этих нюансов, также не гарантирована.

Общим требованием к порошкам для **АМ**-машин является сферическая форма частиц. Это связано, во-первых, с тем, что такие частицы более компактно укладываются в определенный объем. И, во-вторых, необходимо обеспечить «текучесть» порошковой композиции в системах подачи материала с минимальным сопротивлением. Это как раз достигается при сферической форме частиц.

Общим требованием к машинам, работающим с пироформными материалами, такими как алюминий, титан, является наличие противопожарной системы и системы предупреждения о возгорании. При работе с мелкодисперсными порошками (особенно при $\mathbf{d_{50}}$ <10) в силу их летучести необходимо также соблюдать правила техники безопасности. С одной стороны, чем меньше величина $\mathbf{d_{50}}$, тем меньше шаг построения

может быть задан, тем более рельефно могут быть проработаны мелкие элементы детали и тем более гладкую поверхность можно получить у построенной детали. С другой стороны, как мы уже отмечали, в процессе построения в зону пятна лазера моментально вводится большое количество энергии, процесс плавления идет очень бурно, металл вскипает, происходит разбрызгивание расплава и часть металла (строительного материала) вылетает из зоны построения. Визуально это заметно по интенсивному искрообразованию. Если порошок имеет слишком малый размер частиц, то в процессе построения легкие частицы будут «вылетать» из зоны расплава, что приведет к обратному результату – повышенной шероховатости детали, микропористости. Еще один нюанс: для того, чтобы вылетающие из зоны расплава частицы на попадали на соседние уже сплавленные участки поверхность строящегося слоя, внутри рабочей камеры создают направленный «ветер», который сдувает вылетевшие частицы в сторону. Это также может привести к слишком интенсивному выносу строительного материала из зоны построения. В силу этих нюансов при работе с мелкодисперсными порошками с $\mathbf{d_{50}}$ <10 применяют маломощные лазеры, следовательно, малопроизводительные. Такие порошки (с соответствующими настройками машины) применяют в основном для изготовления микро-деталей, которые иным способом изготовить не представляется возможным.

Определенные трудности при работе с мелкодисперсными порошками возникают в связи с их повышенной склонностью к комкованию. Это накладывает особые требования к условиям хранения материалов и эксплуатации **АМ**-машин.

4.2 Методы получения металлопорошковых материалов для целей аддитивных технологий

Существует множество методов получения металлопорошков, условно их разделяют на физико-химические и механические. К физико-химическим относят технологии, связанные с физико-химическими превращениями исходного сырья. При этом химический состав и структура конечного продукта – порошка, существенно отличается от исходного материала. Механические методы обеспечивают производство порошка из сырья без существенного изменения химического состава. К механическим методам относятся, например, многочисленные варианты размола в мельницах, а также диспергирование расплавов посредством струи газа или жидкости. Этот процесс называют также атомизацией.

Частицы порошков, получаемых механическими методами путем размола, имеют осколочную, неправильную форму. В изготовленном порошке содержится относительно большое количество примесей – продуктов износа размольных тел и футеровки мельницы. Поэтому эти методы не применяют для получения порошков, используемых в аддитивных технологиях.

Диспергирование расплава – наиболее производительный, экономичный и эффективный способ получения мелких и средних порошков металлов. 60-70% объема всех промышленных порошков получают именно этим методом [15]. Распыление (атомизацию) широко применяют при производстве порошков многокомпонентных сплавов, в частности, с аморфной структурой, которая позволяет достичь равномерного химического состава композиции, даже при содержании легирующих компонентов выше их предела растворимости в основном компоненте сплава. Кроме того, порошки, полученные с использованием методов диспергирования расплавов, имеют форму частиц, близкую к сферической.

Более 90% всех порошков, применяемых в аддитивных технологиях получают методами диспергирования расплава. Основными технологиями получения порошков для **АМ**-машин являются:

- газовая атомизация;
- вакуумная атомизация;
- центробежная атомизация.

<u>Газовая атомизация.</u> Согласно этой технологии металл расплавляют в плавильной камере (обычно в вакууме или инертной среде) и затем сливают в управляемом режиме через специальное устройство – распылитель, где производится разрушение потока жидкого металла струей инертного газа под давлением. Для получения мелких порошков **d**=10–40 мкм, наиболее часто применяемых в аддитивных технологиях, используют так называемые **VIM**-атомайзеры (**Vacuum Induction Melting**), в которых плавильную камеру вакуумируют для минимизации контакта расплава с кислородом и азотом. А саму технологию получения порошков с использование машин для вакуумного плавления называют **VIGA** - **Vacuum Induction Melt Inert Gas Atomization**., т. е. «технология газового распыления металла, раплавленного в вакуумной камере путем индукционного нагрева». Применяют как поворотные тигли, так и тигли с донным сливом. Для плавки можно использовать керамические или графитовые тигли. В зависимости от материала тигля, температура плавления может достигать 1900°С. Расплавленный металл сливают в специальный приемник, к которому подводят инертный газ под давлением (обычно аргон, иногда азот). Процесс распыления металла имеет три фазы – начальную, рабочую и заключительную. В начальной фазе система выходит на рабочий режим: открывается клапан для слива металла (необходимо некоторое время для стабилизации потока), включается подача распылительного газа, причем в точно определенном соотношении между количеством металла и распыливающего газа. Эта фаза длится несколько секунд.

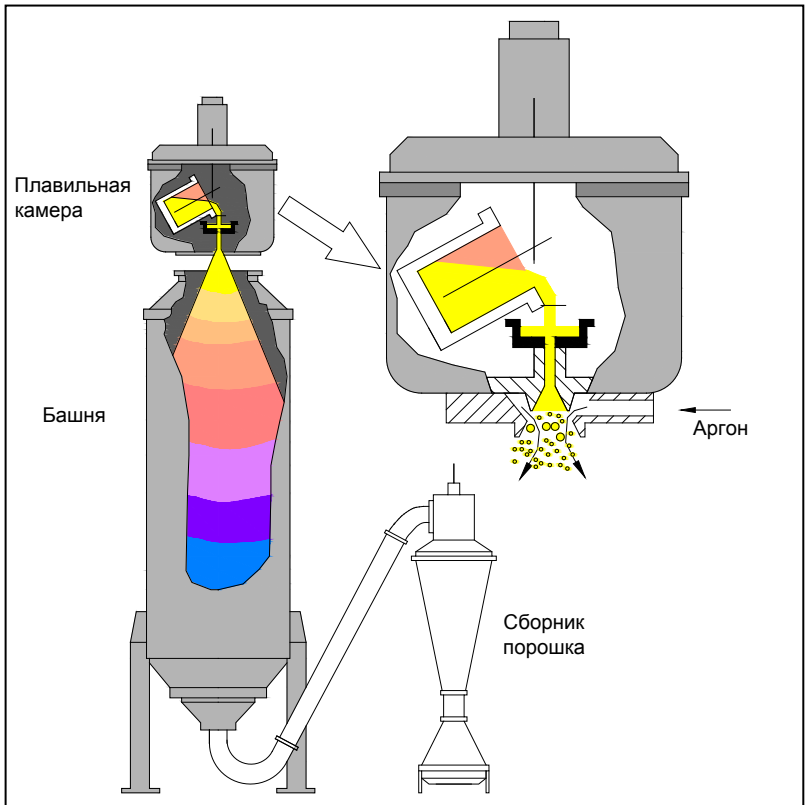


Рис. 42 Схема атомайзера **VIGA**

Далее начинается рабочая фаза, в которой процесс слива металла стабилизируется и достигается требуемое соотношение расхода металла и аргона в распылителе. В конце рабочего процесса скорость выхода металла из тигля снижается, параметры потока

изменяются, и нарушается баланс между отношением массы металла и газа. Этот процесс также длится несколько секунд. В первой и заключительной фазах порошок получается некондиционный. Поэтому для повышения производительности и эффективности системы необходимо увеличивать долю рабочей фазы в общем балансе времени цикла атомизации. Узел атомизации – там, где происходит собственно процесс распыливания металла, это весьма сложное устройство, которое по конструктивным и технологическим соображением не может быть выполненным с размерами, меньше определенных. Для качественного распыления должно быть выдержано определенное соотношение между расходом металла и расходом газа. Минимальный расход металла составляет примерно 8 кг/мин или около 1,0 л/мин (по стали). Поэтому, если атомайзер имеет тигель объемом 1,0..3,0 л, использовать его для коммерческого получения порошков нецелесообразно. Весь процесс будет слишком кратковременным для стабилизации распыливания в рабочей фазе, и выход кондиционного порошка будет невелик. Это приемлемо для исследовательских целей, но не целесообразно для коммерческого использования. Для производства порошков технически рациональной нижней границей объема тигля считается 5,0 л (около 40 кг по стали). В этом случае время распыления составит примерно 5 минут, и длительность рабочей фазы составит около 4,5 минуты. Фракционный состав порошка может быть расширен путем увеличения расхода металла через сливной канал, рис. 43.

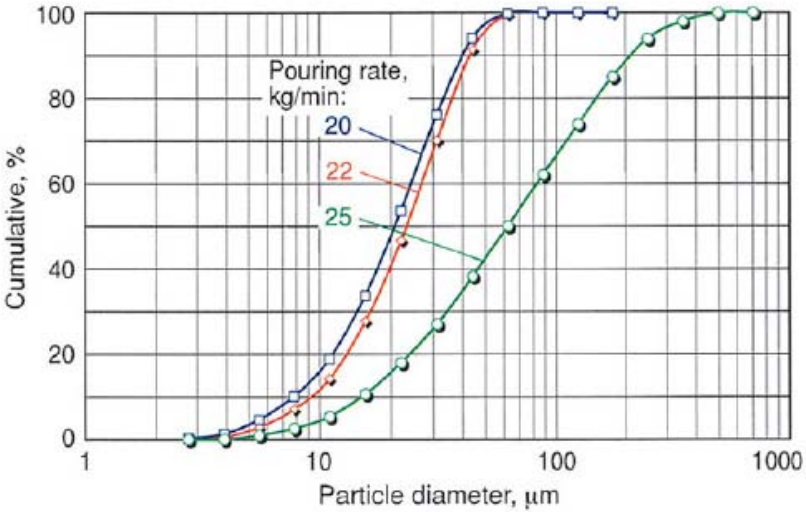


Рис. 43 Фракционный состав порошка в зависимости от расхода металла) через сливной канал (20, 22 и 25 кг/мин) [16]

Атомайзеры типа **VIGA** применяется, в частности, для получения следующих порошков:

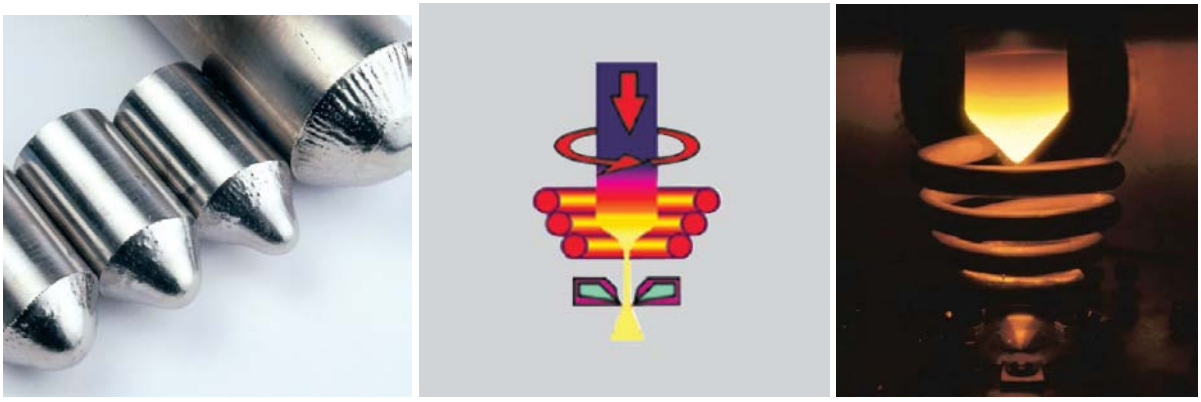
- *никелевые жаропрочные сплавы* (напр. **Inconel 718, Rene 88**, и т.д.) для деталей авиационных и стационарных турбин;
- *сплавы на основе кобальта* для использования в медицине, стоматологии и производстве мишеней ионного распыления;
- *порошки для плазменного напыления* (напр. **NiCrAlY**, **CoCrAlY**, и т.д.) для плазменного напыления защитных покрытий на детали из жаропрочных сплавов;
- *порошки для гранульной металлургии* (напр. **17-4 PH**, **316L**) для автомобильных деталей массового производства;
- *композиции для спекание в порошковом слое* (напр. кобальтовые сплавы, драгоценные металлы) для применения в **AM**-машинах;

- *высоколегированные стали* (напр. инструментальная сталь, быстрорезы) с очень высоким содержанием карбидов;
- *цветные металлы* напр. медные или оловянные сплавы для различного применения.

Технология EIGA (Electrode induction guide inert gas atomization - индукционная плавка электрода с распылением газом) является еще одним видом газовой атомизации и разработана специально для получения порошков реактивных металлов - **Ti**, **Zr**, **Hf, V**, **Pt**, **Ir**, **Nb**, **Mo**, и т. д., поскольку плавка этих металлов в керамических тиглях затруднена даже в условиях вакуума.

EIGA-атомайзер применяется для получения металлических порошков методом распыления в струе аргона. В конструкции атомайзера может быть предусмотрена возможность слива металла в изложницы, т. е. он может быть использован в качестве плавильной установки.

Согласно технологии **EIGA** прутки (так называемый **feed stock** – сырье, исходный материал, рис. 44а) после предварительной выплавки в форме электродов проходят индукционную плавку и распыляются без использования плавильного тигля. Плавление производится опусканием медленно вращающегося электрода в кольцевой индуктор, рис. 44б. Капли металла скапывают с электрода в систему форсунок и распыляются инертным газом. Типичными материалами, получаемыми по технологии без использования керамики, являются тугоплавкие и активные материалы, например **TiAl**, **FeGd**, **FeTb**, **Zr** и **Cr**. Она может также использоваться для многих других конструкционных материалов на основе **Fe**, **Ni**, **Co.**



а) б) *(Предоставлено ALD)*

Рис. 44 Исходный материал (**feed stock**) для получения порошка, схема процесса и сам процесс **EIGA**

Машины **EIGA** имеют невысокую скорость распыливания - около 0,5 кг/с, однако позволяют распыливать достаточно большой объем материала в течение одной плавки – от единиц до десятков килограммов.

Разновидностью газовой атомизации является технология **Plasma Atomization**, в которой плавление металла производят с помощью плазмы [17]. Например, атомайзер компании **Raymor** (Канада) содержит три плазматрона - генератора потока ионизированного газа, сфокусированных в точку, куда подводят металл в виде прутка, рис. 45 [18]. Недостаток технологии в необходимости наличия специального производства фидстока – прутка Ø1…5 мм, одна ко таким образом можно получать

высококачественный особо чистый порошок молибденовых, титановых сплавов и сплавов ниобия, тантала, **Co-Cr** в широком и управляемом диапазоне фракционного состава.

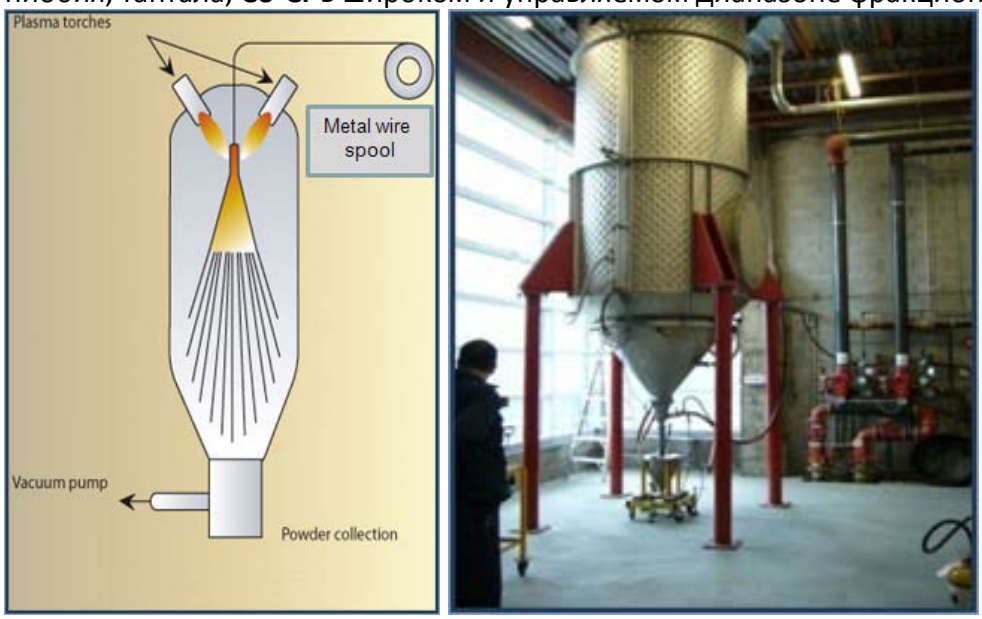


Рис. 45 Схема процесса плазменной атомизации и атомайзер **Raymor** [18].

<u>Вакуумная атомизация.</u> Процесс вакуумной атомизации в зарубежной литературе часто называют **soluble gas atomization** [19, 20], т. е атомизация за счет растворенного в расплаве газа. Суть его состоит в следующем. Атомайзер состоит из двух камер – плавильной, на рис. 50 внизу, и распылительной – вверху. В плавильной камере создают избыточное давление газа (водород, гелий, азот), который растворяется в расплаве. Во время атомизации металл, под действием давления в плавильной камере поступает вверх к сопловому аппарату, выходящему в распылительную камеру, где создают вакуум. Возникающий перепад давлений побуждает растворенный газ к выходу на поверхность капель расплава и «взрывает» капли изнутри, обеспечивая при этом сферическую форму и мелкодисперсную структуру порошка.

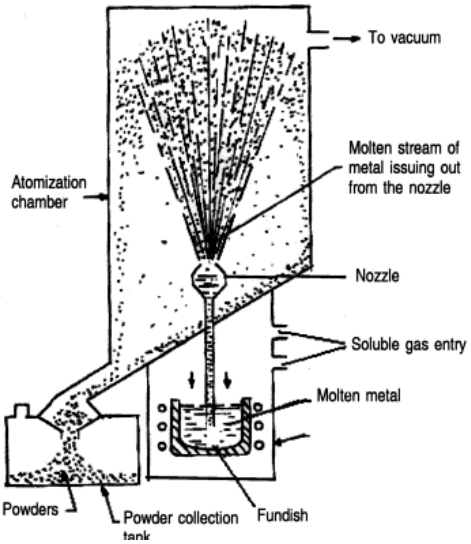


Рис. 46 Схема процесса **soluble gas atomization** [19]

<u>Технологии ценробежной</u> атомизации весьма разнообразны [19, 20], но наибольший интерес представляют те, которые позволяют получать порошки наиболее ценных для аддитивных технологий сплавов – реактивных и тугоплавких металлов. Технология **REP** – **Rotating Electrode Process** предполагает распыливание расплава, создаваемого электрической дугой между прутком материала (обычно Ø15 -75 мм) и вольфрамовым электродом (рис. 47). Главным достоинством

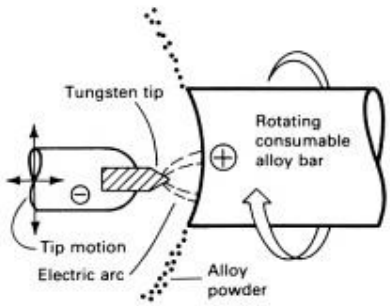


Рис. 47 Схема процесса **REP** [19]

этого метода является полное исключение контакта расплава с тиглем, разливочными устройствами, что имеет место, например в технологии **VIM** или при центробежном распылении на вращающемся диске.

Вариантом этой технологии является процесс **PREP** - **Plasma Rotating Electrode Process** [19, 20], в соответствии с которым плавление металлического прутка производят посредством высокоскоростного потока ионизированного инертного раза. Технологии **REP** и **PREP**, так же как и упомянутая выше технология плазменной атомизации применяется для получения особо чистых мелкодисперсных порошков сферической формы. На рис. 48 показано сравнение структуры порошков **Ti-6Al-4V**, полученных разными методами: а – атомизация инертным газом, б – центробежная плазменная атомизация (**PREP**) [21, 22]. Видно, что частицы порошка, полученного методом **PREP** отличаются правильной сферической формой, без «сателлитов» - пылевидных частиц, налипающих на более крупные в результате соударения в процессе газовой атомизации.

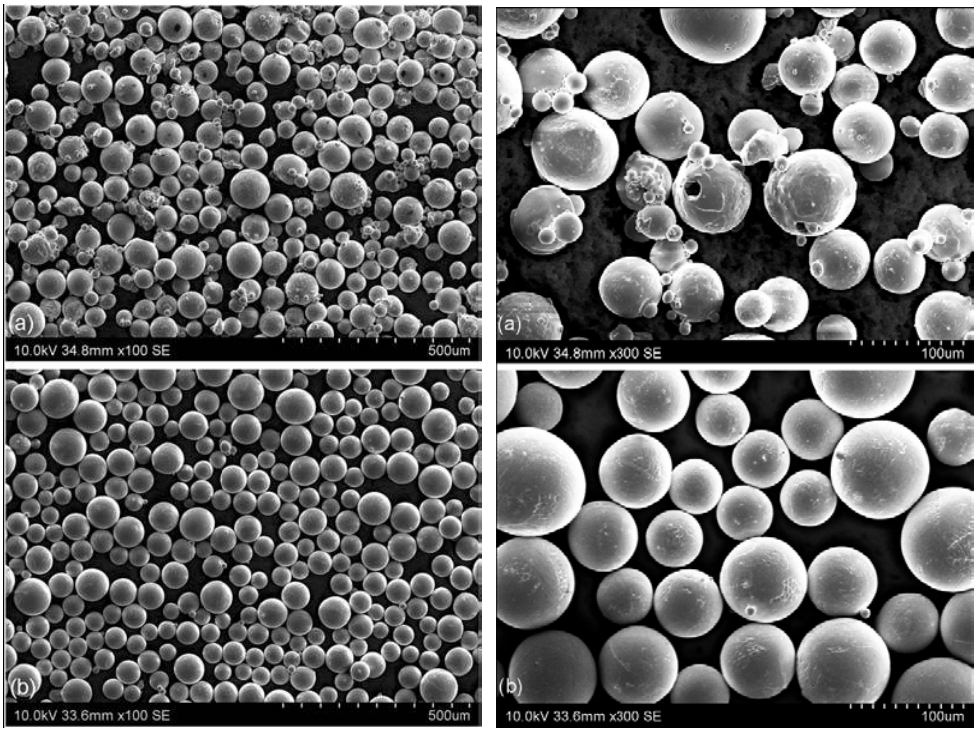


Рис. 48 Морфология порошков **Ti-6Al-4V**, полученных разными методами: а – атомизация инертным газом, b – центробежная плазменная атомизация (**PREP**) [21, 22]

В России также имеется опыт получения порошковых материалов методом центробежного распыления с торца прутковой заготовки (фидстока), оплавляемой плазменной дугой. Метод был разработан в 70-х годах в ВИЛС (Всесоюзный институт легких сплавов) под руководством академика А. Ф. Белова и получил дальнейшее развитие в работах ООО «Сферамет» [32]. Исходным материалом для получения гранул на установке «УЦР-6» служат литые цилиндрические заготовки диаметром 76-80 мм и длиной 700 мм. Практически на установке были получены гранулы дисперсностью 50 мкм.

Аналогичный метод разработан также в институте проблем материаловеденья им. И.Н.Францевича НАН Украины (установка ВГУ-3М), в частности, для получения порошков карбида вольфрама [33] для последующего нанесения на рабочие органы породоразрушающих машин.

Здесь фидстоком является предварительно подготовленный электрод сплава карбидов вольфрама диаметром 25мм и длиной 180-200мм.

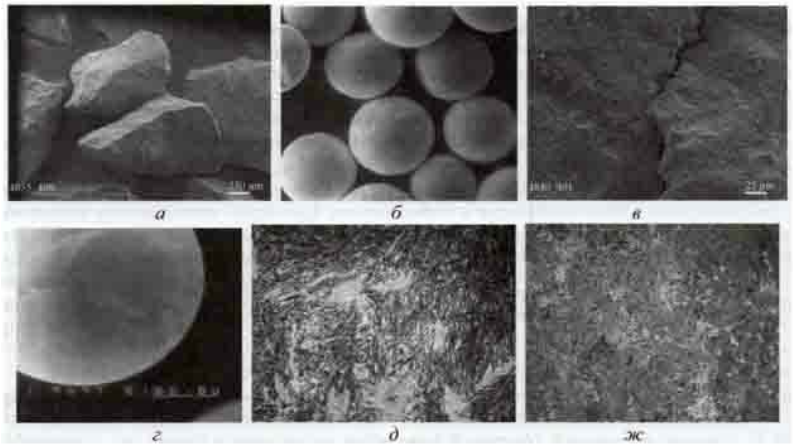


Рис. 49. Общий вид порошков карбида вольфрама, полученных по различным технологиям: а, в, д, – дробление после литья; б, г, ж – после распыления (а, б – внешний вид; в, г – поверхность; д, ж – микроструктура), [33]

Определенный интерес представляет еще одна разновидность газовой атомизации с использованием энергии плазмы. Она предназначена для изменения морфологии порошков, полученных другими методами - не диспергированием расплава, либо «исправления» геометрии некондиционных порошков. Суть процесса, см. рис. 50 [23], состоит в том, что исходный «неправильный» порошок дообрабатывают в струе плазмы, в результате чего частицы порошка приобретают правильную сферическую форму. На рис. 50 стрелками **Powder** и **Plasma gas** показано направление подачи, соответственно, исходного порошка и газа, ионизируемого в плазматроне, а на рис. 51 – сравнение морфологии исходного порошка и порошка, прошедшего плазменную обработку.

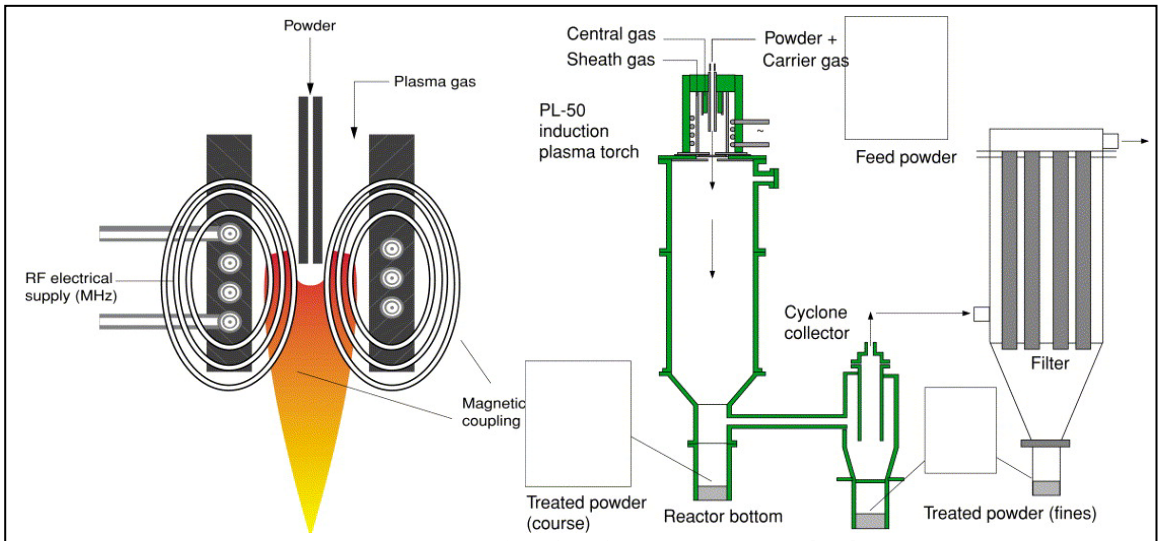
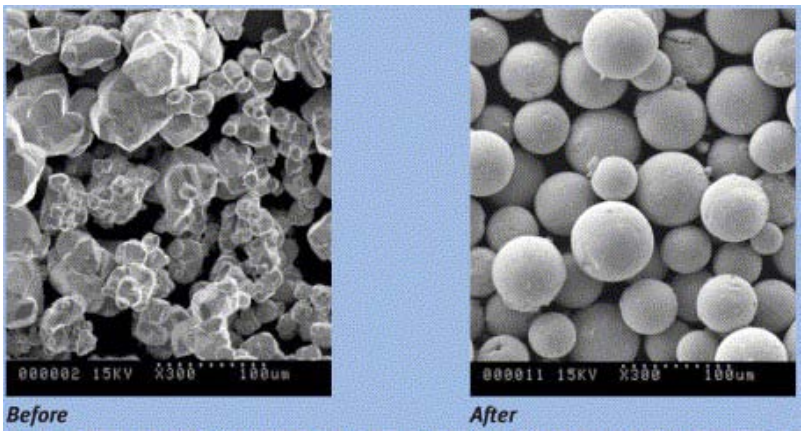
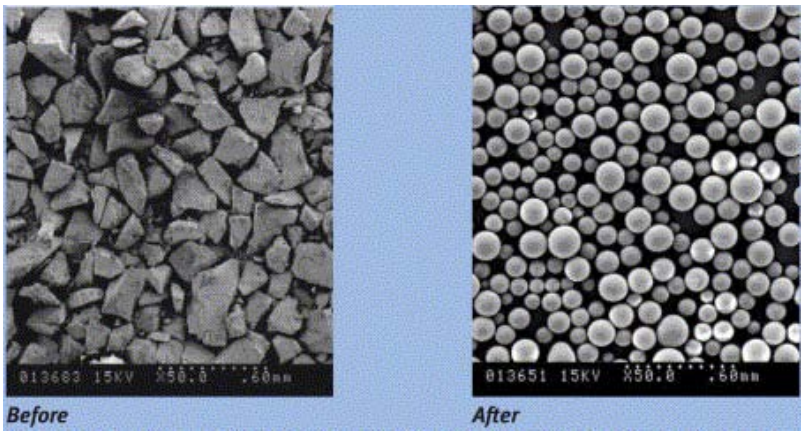


Рис. 50 Схема процесса плазменной обработки порошка [23]



Вольфрам: до обработки после обработки, d_{50} =50 мкм



SiO_2: до обработки после обработки

Рис. 51 Сравнение морфологии исходного порошка и порошка, прошедшего плазменную обработку [23].

4.2 Производители атомайзеров и поставщики металлопорошковых композиций для использования в АМ-машинах

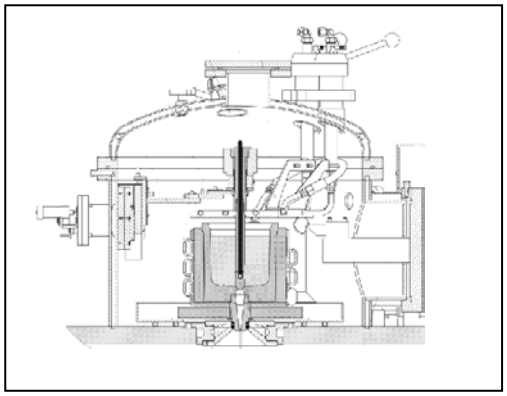
Нужно отметить, что в мире существует несколько десятков крупных компаний-производителей металлопорошков по технологиям газовой, вакуумной или центробежной атомизации (США, Франция, Германия, Швеция, Япония, Китай и др.) Часть компаний приобретала атомайзеры у других компаний, часть – разрабатывала свои собственные конструкции. Но большинство последних не продает свои технологию, даже в качестве лицензий, акцентируя свой бизнес только на производстве порошка. Редким исключением является шведская компания **Sandwik Osprey**, которая в 80-х годах продала лицензию на технологии атомизации немецкой компании **ALD Vacuum Technologies**. Сама же **Sandwik Osprey**, имея оборудование собственной конструкции и «ноу-хау», не продает более ни оборудование, ни технологии, но превратилась в одного их лидеров мирового рынка по производству металлических порошков. Сами технологии атомизации, безусловно, относятся к топ-уровню и являются средоточием последних научных достижений в металлургии, гидро- и газодинамики, физики плазмы, электротехники и др.

В Европе лишь три компании – **ALD**, **PSI** (**Phoenix Scientific Industries Ltd.**) и **Atomising Systems Ltd**. (обе Великобритания) производят атомайзеры в качестве товарной продукции.

Мировой лидер в производстве оборудования для газовой атомизации – компания **ALD** (в настоящее время входит в группу **AMG Advanced Metallurgical Group N.V.**,

Голландия) имеет в своей производственной линейке атомайзеры как лабораторного (объем тигля 1,0…2,0 л), так и индустриального назначения с производительностью до 500 кг за одну плавку и более. Лабораторные атомайзеры **ALD VIGA 1-B**, **VIGA 2** (рис. 52) предназначены для получения порошков стали и спецсплавов в основном в исследовательских целях.

Машины используется для получения небольших партий порошков различных конструкционных сталей, никелевых сплавов, кобальта, меди и др. методом **VIGA**. Тигель с донным сливом объемом, соответственно 1,0 и 2,0 л. Стандартная конструкция включает печь для вакуумного индукционного плавления (**VIM**), где сплавы плавятся, очищаются и проходят дегазацию. Очищенный расплав сливается по предварительно нагретому желобу в газовую форсунку, где металл распыляется струей инертного газа под высоким давлением. Полученный металлический порошок затвердевает, свободно падая в башне, расположенной прямо под распылительной форсункой. Смесь порошка и газа транспортируется по трубопроводу в циклонную установку, где крупные и мелкие фракции порошка отделяются от распылительного газа. Металлический порошок собирается в герметичные контейнеры, расположенные под циклонной установкой. Конфигурация машины обычно согласовывается с заказчиком с учетом конкретных условий инсталляции.



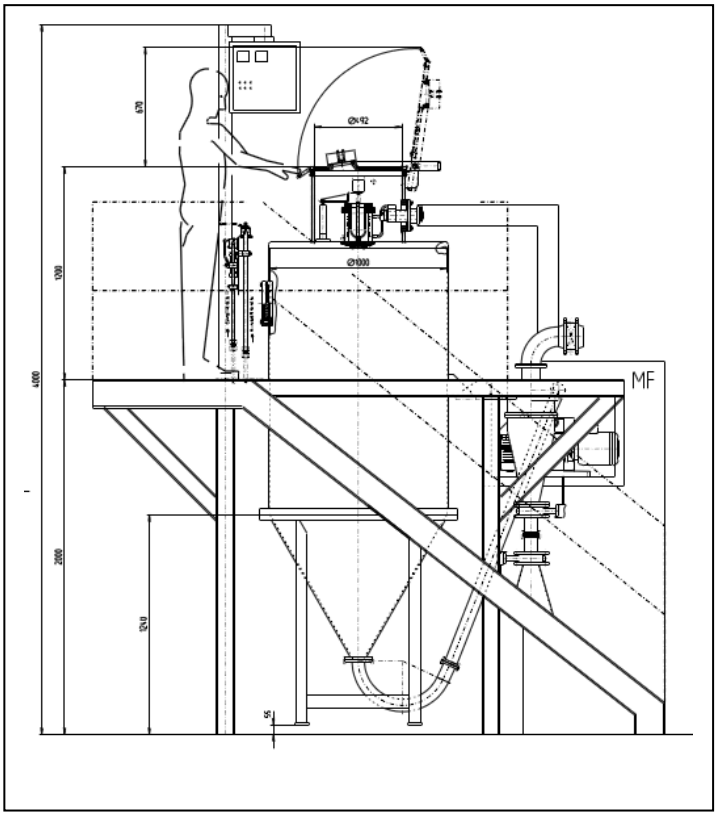


Рис. 52 Плавильная камера атомайзера **VIGA 2**

Для коммерческого получения порошков рекомендуются атомайзеры с большей производительностью, например, **VIGA-6** (около 40 кг по стали) и **VIGA-8** (50 кг). Максимальная емкость тигля для машин типа **VIGA** составляет 250-300 л. Дисперсность распыливания зависит от материала и варьирует в пределах $\mathbf{d_{50}}$= 15…60 мкм. Фракционный состав получаемого порошка может быть откорректирован путем настройки параметров газового распылителя и сливного устройства (см. выше рис. 43).

Компания **ALD** является также изготовителем атомайзеров для получения порошковых композиций по технологии **EIGA** - индукционная плавка с распылением инертным газом.

а) б) *(Предоставлено ALD)*

Рис. 53 Атомайзер **EIGA 50**. Общий вид (а), плавильная камера (б)

Базовые модели **EIGA** 50 и **EIGA** 100 отличаются размерами применяемого фидстока - прутка, соответственно, 50 и 100 мм. Машины **EIGA** (рис. 53) имеют невысокую скорость распыливания - около 0,5 кг/с, однако позволяют распыливать достаточно большой объем материала в течение одной плавки – от единиц до десятков килограммов. Машина может быть оснащена функцией **spray forming** для «выращивания» болванок диаметром до 50 мм и длиной до 500 мм.

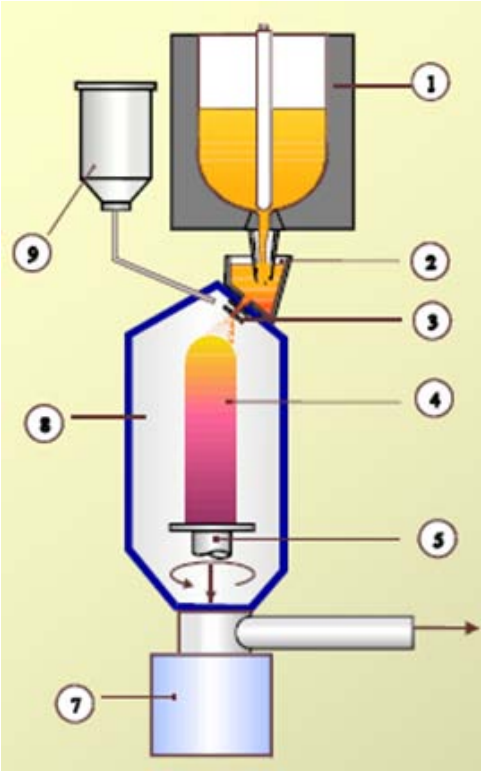


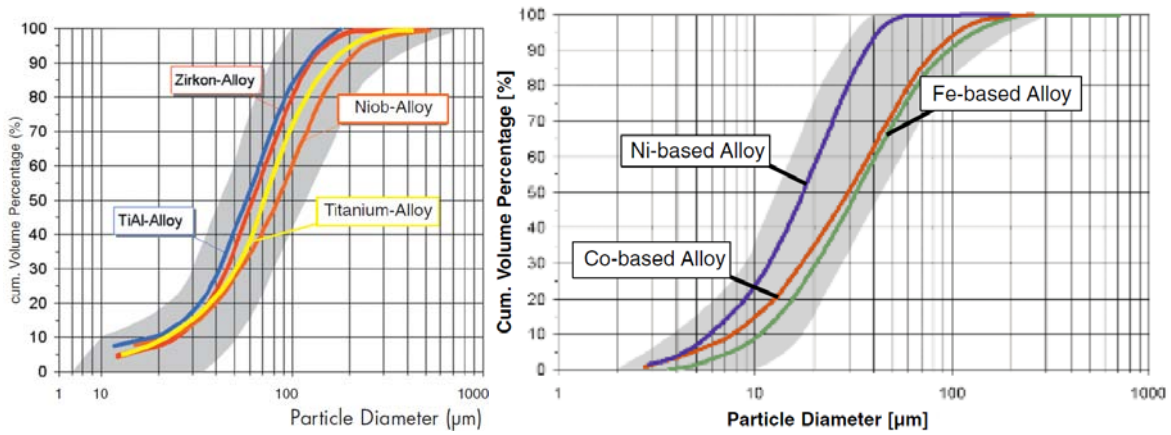
Рис. 54 Схема процесса **spray fprming.** 1- тигель, 2 - сливное устройство; 3 – подвод газа, 4 – выращиваемая болванка, 5 – вращающаяся подложка; 6 – отвод газа; 7- бункер для порошка; 9 – (возможная опция) бункер для подшихтовки дополнительного материала

Spray forming –относительно новая прогрессивная технология в металлургии, позволяющая получать болванки (заготовки для последующих переделов) путем осаждения распыливаемого металла на подложку, рис. 54).

При выборе оборудования следует иметь в виду, что технология **VIGA** позволяет получать порошки металлов (кроме титановых сплавов и реактивных металлов) с дисперсностью $\mathbf{d_{50}}$ = 30 мкм.

Технология **EIGA** весьма производительна, при 2-х сменной работе может быть получено до 500 кг порошка в день, универсальна по распыливаемым металлам, но порошки имеют б***о***льший размер частиц, $\mathbf{d_{50}}$ = 60…80 мкм в зависимости от материала, см. рис. 55.

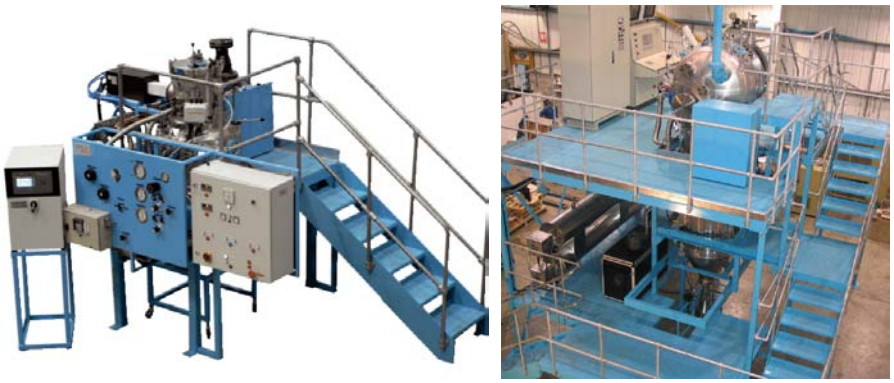
Металлопорошковые композиции, полученные на установках **VIGA** и **EIGA**, могут быть использованы и в целях традиционной порошковой металлургии, в частности в **PIM**-технологиях. Общий термин **PIM** – **Powder Injection Molding**, обозначает технологии формования порошковых материалов посредством предварительной пластификации (с помощью связующего состава) и специальной термообработки на стадии получения конечного изделия.



VIGA **EIGA**

Рис. 55 Фракционный состав порошков различных сплавов, полученных по технологиям **VIGA** и **EIGA**

Атомайзеры **Hermiga 75/3**, **Hermiga 75/5** компании **PSI** предназначены для получения порошков спецсталей и титановых сплавов. Машины отличаются объемом тигля – 3 и 5 кг (по стали) соответственно, и позволяет получать металл в слитках либо в виде порошка. Порошок со сферической геометрией частиц. Скорость охлаждения при атомизации от 10^3 до 10^6 K/sec. Дисперсность порошка варьируется от 10 до 100 мкм. Широкий спектр расплавляемых металлов, включая пирофорные сплавы и сплавы редкоземельных металлов.



*(Предоставлено **PSI**)*

Рис. 56 Атомайзер **Hermiga 75/3** и **Hermiga 100/10 VI**

При получении алюминиевых порошков с целью снижения опасности взрыва предусмотрено регулируемое пассивирование. Как опция – атомизация в воде для получения металлических гранул. Технология **wirecasting** (быстрое охлаждение путем погружения расплавленного металла во вращающуюся водяную ванну) позволяет получать металлическую нить с высокими магнитными и прочностными свойствами и диаметром от 0,1 мм. Габариты – 2100x3200x2400 мм, вес 2500 кг.

Атомайзер, **Hermiga 100/10 VI** – лабораторно-исследовательская машина с донным сливом и с газовым (аргон) распылителем для получения порошков спецсталей, титановых сплавов, редкоземельных металлов, пирофорных сплавов, а также заготовок методом **spray forming**Машина может также выполнять функцию «поставщика» расходных (строительных) материалов для аддитивных машин, для выращивания изделий (в частности, литейных форм) из металлических порошков. Модель имеет

легкосъемный тигель емкостью 10,0 кг по стали. Дисперсность порошка варьируется от 10 до 100 мкм. Габаритные размеры 5050x5950x5070 мм.

Машины **PSI** имеют в качестве отдельной специальной опции возможность атомизации титановых сплавов. Реализация данной опции требует установки дополнительного оборудования, которое существенно увеличивает габариты и стоимость системы.

В линейке оборудования фирмы **PSI** имеются также модели **Hermiga 100/25VI** (с донным сливом), **Hermiga 100/50V21, Hermiga 120/100 V21, Hermiga 100/200 V21** (все с поворотным тиглем), которые имеют емкость тигля по стали, соответственно, 25, 50, 100 и 200 кг и являются машинами для мало - и среднеосерийного производства металлических заготовок и порошков.

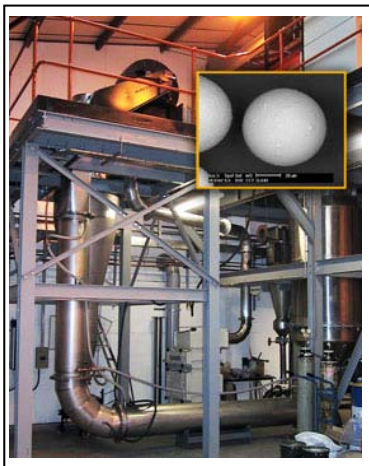


Рис. 57 Атомайзер фирмы **Atomising Systems**

Компания **Atomising Systems Ltd** специализируется на выпуске оборудования для атомизации металлических и неметаллических материалов различными технологиями:
- распыление водой;
- распыление инертным газом;
- ультразвуковое распыление;
- центробежное распыление.

Atomising Systems имеет опыт в производстве оборудования, в частности, для получения порошков легкоплавких материалов, из которых изготавливаются разного рода припои для электронной промышленности. В линейке оборудования имеются как лабораторные атомайзеры, на которых можно получать 1-5 кг порошка в день, так и индустриальные установки производительностью более 5 т/день.

В России компания работает в содружестве с «Уральской фирмой нетрадиционных методов обработки и новых материалов (НЕТРАММ)», которая согласно иформации на сайте компании [24] изготавливает и поставляет лабораторные установки для получения порошков цветных и черных металлов с регулируемой дисперсностью (10 -1000 мкм), формой частиц (от нитевидной до сферической) и скоростью охлаждения (от 10^3 до 10^7 К/с) различными методами, включая и газовую атомизацию.

Обычно фирмы-производители **АМ**-машин являются и поставщиками расходных материалов, причем сами эти фирмы не производят порошки, но участвуют в их подготовке для работы именно на их машинах. Порошок закупают на фирмах-изготовителях порошковых материалов, которые производят материал для разнообразных нужд порошковой металлургии. Закупленный порошок подвергается просеиванию и разделению на фракции, производится смешение фракций в определенных соотношениях и фасовка в герметичную тару. Таким образом, в частности, производители **АМ**-машин страхуют себя от возможных претензий к качеству порошков со стороны потребителей. Ниже в таблице 2 приведен не полный перечень порошковых композиций, предлагаемый компаниями-производителями **АМ**-машин. Нетрудно заметить, что большинство компаний предлагает практически идентичный набор строительных материалов, однако при этом нет никаких гарантий того, что порошки, например, **EOS** можно применять в машинах **SLM Solution** или **Realiser**.

Таблица 2

Порошковые композиции, поставляемые компаниями-производителями АМ-машин

Производитель АМ-машин	Фирменное обозначение	Стандарты Европы	Стандарты США
Concept Laser			
Нержавеющая сталь	CL 20ES	1.4404	316L
Инструментальная сталь (Cr>12%)	CL 90RW	1.2083	
Инструментальная сталь	CL 91RW		
Мартенситностареющая сталь	CL 50/60WS	DIN 1.2803 1.2709	18% Ni Maraging 300 AISI H13
Алюминиевый сплав AlSi12	CL 30AL	ISO AlSi12	AA 4047 ASTM A04130
Алюминиевый сплав AlSi10Mg	CL 31AL	ISO 3522	A03600
Титановый сплав Ti6Al4V ELI	CL 40TI ELI		ASTM F136
Титановый сплав Ti6Al4V	CL 40TI	ISO 5832-3	ASTM F1472, AMS 4928, AMS 4967
Никелевый сплав Inconel 718	CL 100NB	ISO 6208 UNS N07718	UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664
Сплав Co-CR (**remanium** star)	CL 111 CoCr	DIN EN ISO 9693/DIN EN ISO 22674	ASTM F75
EOS			
Алюминиевый сплав AlSi10Mg	Aluminium AlSi10Mg	ISO 3522	A03600
Сплав кобальт-хром-молибден (**CoCrMo**), биосовместимый	CobaltChrome MP1	ISO 5832-4 ISO 5832-12 UNS R 31538	ASTM F75 ASTM F1537
Сплав кобальт-хром	CobaltChrome SP1	ISO 5832-4 ISO 5832-12 UNS R 31538	ASTM F75 ASTM F1537
Мартенситностареющая сталь	MaragingSteel MS1	1.2709	18% Ni Maraging 300 AISI H13
Инконель 625	NickelAlloy IN625	UNS N06625, DIN NiCr22Mo9Nb	UNS N06625, AMS 5666F, AMS 5599G
Никелевый сплав Inconel 718	NickelAlloy IN718	ISO 6208, UNS N07718, DIN NiCr19Fe19NbMo3	UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664
Нержавеющая сталь	StainlessSteel GP1	1.4542	17-4 PH
Нержавеющая сталь	StainlessSteel PH1	DIN 1.4540	UNS S15500
Титановый сплав Ti6Al4V	Titanium Ti64	ISO 5832-3	ASTM F1472
Титановый сплав Ti6Al4V ELI (extra-low interstitials)	Titanium Ti64 ELI	ISO 5832-3, UNS R56401	ASTM F136
Phenix Systems			
Нержавеющая сталь	ST4404D	1.4404	316 L
Мартенситностареющая сталь	ST2709B	1.2709	18% Ni Maraging 300 AISI H13
Сплав Co-Cr	ST2724G	ISO 5832-4	
SLM Solution			

Коммерчески чистый титан	CP Titanium	ISO 5832-2 UNS R50400	ASTM Grade 2
Титановый сплав Ti6Al4V	Ti6Al4V	ISO 5832-3	ASTM F136 ASTM F1472
Титановый сплав TiAl6Nb7	TiAl6Nb7	ISO 5832-11	ASTM F1295
Мартенситностареющая сталь	1.2709	1.2709	18% Ni Maraging 300 AISI H13
Нержавеющая сталь	1.4404	1.4404	
Жаропрочная сталь	1.2344	1.2344	AISI H13
	1.4542	1.4542	
Алюминиевые сплавы	AlSi12	ISO AlSi12	ASTM AA 4047, ASTM A04130
	AlSi10Mg	ISO AlSi10Mg	A03600
	AlSi7Mg	ISO AlSi7Mg	ASTM Al3560
	AlSi9Cu3	ISO AlSi9Cu3	
	AlMg4,5Mn0,4	ISO 5182	
Спав кобальт-хром	Co212-f		ASTM F75
Инконель	Inconel 625	UNS N06625, DIN NiCr22Mo9Nb	UNS N06625, AMS 5666F, AMS 5599G
	Inconel 718	ISO 6208, UNS N07718, DIN NiCr19Fe19NbMo3	AMS 5662, AMS 5664
	Inconel HX	2.4665	
Realizer			
Мартенситностареющая сталь	Tool steel H13	DIN 1.2803 1.2709	18% Ni Maraging 300 AISI H13
Коммерчески чистый титан	CP Titanium	ISO 5832-2 UNS R50400	ASTM Grade 2
Титановый сплав	Titanium V4	ISO 5832-3	ASTM F136 ASTM F1472
Алиминий	н/д	н/д	н/д
Сплав Co-Cr	Cobalt chrome	ISO 5832-4 ISO 5832-12 UNS R 31538	ASTM F75 ASTM F1537
Нержавеющая сталь	316L	1.4404	316L
Никелевый сплав Inconel 718	Inconel 718	ISO 6208, UNS N07718, DIN NiCr19Fe19NbMo3	UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664
Золото, серебро, платина	н/д	н/д	н/д

Рынок аддитивных технологий стремительно изменяется. Происходит слияние и поглощение компаний-производителей машин, возникают новые центры оказания услуг в области **AM**-технологий, эти центры объединяются в европейскую, а теперь уже и в глобальную сеть оказания услуг: достаточно отослать по Интернету заявку, составленную по определенной форме (**CAD**-модель, количество изделий, материал, предпочтительная технология, шероховатость и т. д.), и в течение нескольких дней европейский или американский потребитель получит курьерской почтой свой заказ. Где, в какой компании или сервис-бюро фактически сделан заказ – не известно. Где была возможность – в Гамбурге, Лионе или Лондоне, где дешевле и удобнее было сделать, там и сделали. Заказчика, по большому счету, обычно мало волнует процесс, ему важен результат. С другой стороны происходит специализация: компании сворачивают бизнес в мало

доходной для них области, но развивают направления, где компетенции компании наиболее конкурентоспособны.

То же происходит и в сфере разработки, создания, производства и поставок модельных материалов. Ряд ведущих компаний-производителей порошков широкого спектра, например, **Sandwik Osprey**, уже выделяют отдельную технологическую «нитку» для производства порошков специально для нужд аддитивных технологий. Возникают фирмы-сателлиты, адаптирующие «серийные», массовые порошки под нужды аддитивных технологий. Ниже в таблице 3 приведены данные по материалам, которые предлагает одна из новых компаний на рынке аддитивных технологий – компания **LPW Technology** (Великобритания). Химсостав материалов приведен так, как он указан в фирменной спецификации, российский аналог можно найти в соответствующих марочниках сплавов.

Таблица 3

Номенклатура порошков компании LPW Technology для применения в АМ-машинах

	Сплав	Хим. состав	Стандарты					
Металлопорошки на основе Ni и Co			UNS	ASTM	ISO	AMS	DIN	Аналог
LPW CoCr-1LC + LPW CoCr-2LC	CoCrMo	C 0.16 max, Mn 1.0 max, Si 1.0 max, Cr 27.0-30.0, Ni 0.50 max, Mo 5.0-7.0, Fe 0.75 max, S 0.010 max, P 0.020 max, Al 0.10 max, Ti 0.10 max, W 0.20 max, B 0.010 max Co Bal	31537	F1527, F75	ISO 5832-4 ISO 5832-12			MP1
LPW 718-2	718	Al 0.30-0.70, B 0.006 max, Ca 0.01 max, C 0.02-0.08, Cr 17.0-21.0, Co 1.0 max, Na+Ta 4.75-5.50, Cu 0.30 max, Fe 15.0-21.0, Mg 0.01 max, Mn 0.35 max, Mo 2.80-3.30, Ni 50.0-55.0, P 0.015 max, Se 0.005 max, Si 0.35 max, Ti 0.75-1.15, S 0.015 max.	7718	B537 B670		AMS 5832, AMS 5596	2.4668	IN718
LPW 625-2	625	Mo 8.0-10.0, Co 1.0 max, Nb+Ta 3.15-4.15, Al 0.40 max, Ti 0.40, max C 0.10, max, Fe 3.0- 5.0, Si 0.50 max, Mg 0.50 max, P 0.015 max, Mn 0.50 Max Cr 20.0-23.0, S 0.015 max, Cu 0.50 max, Ni Bal.	6625	446 Gr1, 443 Gr1		AMS 5599, AMS 5666	2.4856	IN625
Металлопорошки на основе Fe								
LPW M300-1	18Ni300	C 0.03 max, Mn 0.15, Si 0.10 max, Ni 17.0-19.0, Mo 4.50-5.20, Co 8.50-10.0, Ti 0.80-1.20, P 0.010 max, S 0.010, Fe Bal.					1.2709	MS1
LPW 174-1	17-4ph	Cr 15.0-17.0, Ni 3.0-5.0, Cu 3.0-5.0 Mn 1.0 max, Si 1.0 max, Mo 1.0 max, Nb+Ta 0.15-0.45, C 0.10 max, Fe Bal.	17400	A708	ISO15156-3	AMS 5604 AMS 5643	1.4548	GP1
LPW 155-1	15-5ph	Cr 14.0-15.0, Ni 3.5-5.5,	S15500	A564		AMS		PH1

		Cu 2.5-4.5, Mn 1.0 max, Si 1.0 max, Mo 0.5 max, Nb 0.15-0.45, C 0.07 max, Fe Bal.		A693		5659, AMS 5862		
LPW 316-1	SS 316L	C 0.03 max, Si 0.75 max, Mn 2.0 max, P 0.025 max, S 0.01 max, Cr 17.5-18.0, Ni 12.5-13, Mo 2.25-2.50, Cu 0.50 max, Fe Bal.	S31673	F138 F745	ISO 5832-1		1.4404 1.4401	
Металлопорошки на основе Ti								
LPW Ti6-4 -2	Ti6-4	Al 5.5-6.5, V 3.5-4.5, N 0.03 max, C 0.08 max, H2 0.0125 max, Fe 0.25 max, O 0.20 max, Res Each 0.1, Res Total 0.4, Ti Bal.	R56400	F1472, B348 gr 5	ISO 5832-3	AMS 4954, AMS 4911, AMS 4928	3.7164	Ti64
LPW Ti6-4ELI-2	Ti6-4 ELI	Al 5.5-6.5, V 3.5-4.5, N 0.03 max, C 0.08 max, H2 0.0125 max, Fe 0.25 max, O 0.13 max, Res Each 0.1, Res Total 0.4, Ti Bal.	R56401	F136, B348 gr 23	ISO 5832-3	AMS 4956		
LPW CpTi1-2	CpTi gr 1	N 0.03 max, C 0.08 max, H2 0.015 max, Fe 0.20 max, O 0.18 max, Res Each 0.1,Res Total 0.4, Ti Bal.	R50250	F67, B348 gr 1	ISO 5832-2			
LPW CpTi2-2	CpTi gr 2	N 0.03 max, C 0.08 max, H2 0.015 max, Fe 0.30 max, O 0.25 max, Res Each 0.1, Res Total 0.4, Ti Bal.	R50400	F67, B348 gr 2	ISO 5832-2	AMS 4921 AMS 4902		
Металлопорошки на основе Al								
LPW AlSi10Mg-1	AlSi10 Mg	Si 9.0-11.0, Mg 0.2-0.45, Fe 0.55 max Ni 0.05 max, Cu 0.05 max, Zn 0.10 max, Mn 0.45 max Pb 0.05, Sn 0.05 max, Ti 0.15 max, Al Bal	A13600	A03600			3.2381.01	
LPW AlSi12-1	AlSi12	Si 11.0-13.0 Mg <0.10, Fe 0.55 max, Ni 0.05 max, Cu 0.05 max, Zn 0.10 max, Mn 0.45 max, Pb 0.05, Sn 0.05 max, Ti 0.15 max, Al Bal.					3.2581.01	

Обратим внимание на компанию **Raymor Industries Inc.** (Канада), которая одна из немногих использует технологию плазменной атомизации сплавов **Ti**, **Co-Cr**, а также **Mo** и **Nb**, предлагая при этом порошки очень высокого качества в широком диапазоне фракционного состава. Порошки имеют следующую градацию по фракциям: 0-25, 0-45, 45-106, 45-150, 0-250 мкм.

Из числа относительно крупных европейских производителей металлопорошковых композиций, в частности и для **AM**-машин, можно привести:

TLS Technik GmbH & Co. Spezialpulver KG (Германия):

- титан и титановые сплавы (включая **Titanium Grade 1 ASTM**, **Titanium Grade 2 ASTM**, **Titanium Grade 5 ASTM** (**Ti 6Al 4V**);
- цирконий;
- алюминий и алюминиевые сплавы;
- магний;
- никель и никелевые сплавы;
- стали;
- ванадий;
- редкоземельные металлы;
- медь;
- золото;
- платина.

Wiretec Handels - und Beratungsgesellschaft mbH (Германия) – производство мелкодисперсных кобальтовых порошков $\mathbf{d_{50}}$=2-10 мкм.

Для отечественных потребителей расходные материалы – это серьезная проблема. В связи с неразвитостью российского рынка металлопорошковые композиции для аддитивных машин в основном приходится закупать за рубежом. Для сведения. Оптовая цена порошковых материалов на внешнем рынке примерно такова: чистый титан - €230/кг, **Ti-6Al-4V** - €200/кг, сплав **Co-Cr** - €150/кг, сплавы **Al** - €70-90/кг, **Inconel** 625 - €75/кг. Российским потребителям они обходятся как минимум вдвое, как правило - втрое дороже. Ниже в таблице 4 указаны цены, извлеченные из коммерческих предложений западных фирм для российских покупателей (цены приведены за 1 кг на условиях **EXW**, т. е. без НДС, таможенных, транспортных и других затрат). При этом существует минимальный предел заказа – от 10 до 50 кг.

Таблица 4

Примерные цены на некоторые металлопорошковые композиции для российского рынка

	Ti-6Al-4V	**Co-Cr**	316L	Tool steel	AlSi12	CL 50/60 WS	CL20	**Inconel**	
								625	**718**
SLM Solutions	520	210	90	130	60			160	210
EOS	485	320		235	122				
Conzept Laser						150	95		
Raymor	$235								
Sandwik Ospray								£58.35 (€71,6)	

Вместо ЗАКЛЮЧЕНИЯ: «Эй, вы там, наверху!»…

Просто информация, без всяких размышлений.

<u>Ведущая роль в мире.</u> В 2011 году около 40% произведенных в мире **AM**-машин установлено в США, 15% - в Германии. 63% всех аддитивных машин произведено в США. [25]. Авиационная и автомобильная отрасли США и Европы – главные заказчик и потребители **AM**-технологий. На рис. 58 показано распределение инсталляций **AM**-

машин по странам мира (накопительно, за все время ведения статистики с 1988 г). Российский сектор еле заметен со своим 1,3%.

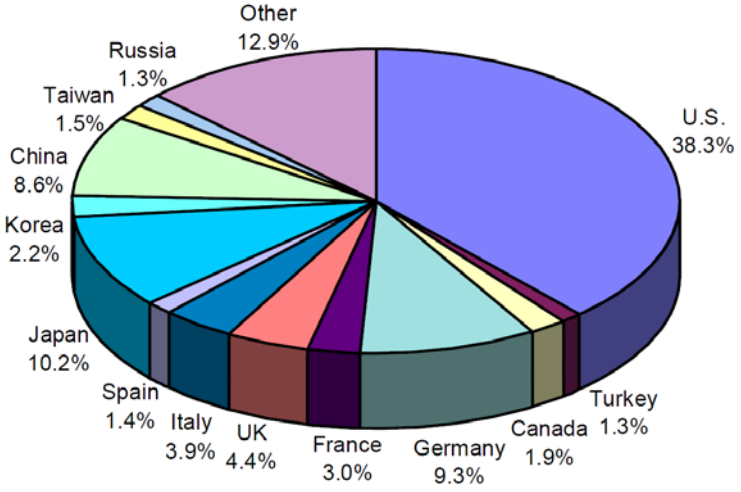


Рис. 58 Распределение инсталляций **AM**-машин по странам мира [25]

<u>Государство и AM-бизнес.</u> В 2010 году создан консорциум **AMC** (**Additive Manufacturing Consortium**), который в настоящее время включает 33 члена, среди которых **Boeing**, **General Electric**, **Lockheed Martin**, **Honeywell**, **Rolls-Royce** и ряд правительственных организаций.

В 2012 году в США по инициативе Президента Обамы создан научно-инновационный институт **NAMII** по аддитивным технологиям (**National Additive Manufacturing Innovation Institute**).

В Европе из тринадцати компаний-производителей аддитивных машин восемь выпускают машины для синтеза деталей из металла. Практически все они работают по проектам с ведущими университетами при значительной государственной поддержке.

В 2012 г Великобритания выделила 67 млн. на гранды для проведения НИОКР в области аддитивных технологий [16].

На базе университета г. Падерборн (Германия) компаниями **Boeing**, **EOS GmbH**, **Evonik Industries**, **SLM Solutions**, **Siemens**, **Stratasys**, **Stükerjürgen Aerospace Composites**, **Blue Production**, **Eisenhuth** создан Исследовательский центр **DMRC** (**Direct Manufacturing Research Center**). В 2012 году реализовано 9 проектов при поддержке правительства земли Северный Рейн-Вестфалия (бюджет €11 млн. с софинансированием 50:50).

По заявлению **Christine Furstoss** (руководитель группы производства и технологии материалов компании **General Electric**) через 10 лет примерно половина деталей энергетических турбин и авиационных двигателей будет изготавливаться с помощью **AM**-технологий. В последние годы компания **Boeing** значительно увеличила номенклатуру деталей, изготавливаемых по **AM**-технологиям. Сейчас таким образом изготавливается более 22 тысяч деталей 300 наименований для 10 типов военных и коммерческих самолетов, включая **Dreamliner**. По сообщениям представителей компании **Boeing** планирует производить новый беспилотный самолет практически полностью по **AM**-технологиям.

В августе 2012 г совершил первый полет беспилотный самолет, построенный в Саутгемптонском университете (Англия) полностью по аддитивным технологиям [27].

Число инсталляций **AM**-машин в Южной Африке к 2012 году составило 450 единиц, причем в 2011 году за счет государственных субсидий было закуплено оборудования на $5,5 млн., а общая сумма инвестиций составила $9,5 млн. [25].

Наука, образование. В 2011 году мировой лидер в области аддитивных технологий компания **3D Systems** открыла свой собственный университет для подготовки специалистов и развития лазерных технологий послойного синтеза.

Международные конференции и выставки: **Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference**, **Euromold**, **Rapid.Tech** (Германия); **The TCT Show + Personalize**, **TCT Live 2012** (Великобритания); **Additive Manufacturing Users Group**, **RAPID Conference & Exposition**, **Laser Additive Manufacturing Workshop** (США); **RM Forum 'Metal Sintering'** (Италия), **European Forum on Rapid Prototyping** (Франция); **International Conference on Additive Manufacturing** и т. д.

Специализированные журналы: **Rapid Prototyping Journal, TCT Magazine, Wohlers Report, RTejournal (Rapid Technology Electronic Journal)**, **International Journal of CAD/CAM**.

Высокопрофессиональные Интернет-ресурсы и независимые профессиональные объединения, такие как: **www.wohlersassociates.com, www.additive3d.com.; Additive Manufacturing Users Group** (США).

Лавинообразный поток публикаций, патентов. Количество выданных патентов США: 2009 г -265, 2010 г – 419, 2011 – 474; количество заявок на патент США: 2009 г – 678, 2010 г – 797, 2011 г – 827 [25].

В Китае 45 университетов и 20 исследовательских организаций работают в области лазерной техники, в частности, и для нужд аддитивных технологий. В области разработок по лазерному напылению индекс научного цитирования (**SCI**) публикации китайских специалистов в международных журналах составляют 43% [28].

В 22-х странах созданы национальные ассоциации по аддитивным технологиям, объединенные в альянс **GARPA** - **Global Alliance of Rapid Prototyping Associations**.

В России ничего подобного мы не увидим. Безусловно, нужно отметить фундаментальные работы ИПЛИТ (Институт проблем лазерных и информационных технологий, Шатура), ряд научных работ в Самарском филиале физического института им. Лебедева РАН, в Санк-Петербургском и Томском политехнических университетах, Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики, Московском инженерно-физическом институте, Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН [29], Новоуральском государственном технологическом институте [30], «ВИЛС» и «Сферамет» [32]. Однако эти работы не носят системного характера, ограничиваются лабораторными исследованиями и не имеют конечной целью создание отечественных **АМ**-машин для российской промышленности. И нужно признать, отечественное научное сообщество, специалисты-технологи не смогли донести до государственной власти важность **АМ**-технологий, раскрыть степень опасности катастрофического отставания России в этой стратегически важной отрасли. Успехи конкурентов России в космической отрасли, в авиа- и автостроении не в последнюю очередь объясняются глубоким внедрением **АМ**-технологий во все значимые для этих отраслей технологические цепочки. Проблема разработки специальной государственной Программы не только по исследованию, но и созданию отечественной индустрии производства аддитивных машин, строительных (модельных) материалов, подготовки квалифицированных кадров давно перезрела.

Существует также острая необходимость пересмотра Государственных стандартов и отраслевых нормативных документов в части требований к технической документации, методологии контроля и т. д. Все чаще в практической деятельности отечественные специалисты, работающие в сфере **АМ**-технологий, сталкиваются с проблемой «несоответствия» их методов работы формальным требованиям ГОСТов или ОСТов, в

которых нет даже упоминания о цифровых методах изготовления, контроля, испытаний и т. д. На стадии НИОКР эта проблема как-то решается. Но вот на стадии подготовки к серийному производству она встает остро: «Не положено, ГОСТом не предусмотрено. Мы не имеем права применять эти методы, они не регламентированы».

Уже сейчас ряд авторитетных зарубежных организаций с тревогой поднимают вопрос о проблеме пиратства и незаконного производства определенных видов продукции, включая оружие, и выступают за немедленное вмешательство государства в правовое обеспечение деятельности на промышленном рынке в новых условиях [31].

AM-технологии с полным основанием 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. И наконец, степень использования **AM**-технологий в материальном производстве является верным индикатором реальной индустриальной мощи государства, индикатором его инновационного развития.

Источники

1. Horn T. J., Harrysson O. L. A. Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications. Science Progress 09/22/2012. Science Reviews 2000 Ltd. ISSN: 0036-8504 [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.freepatentsonline.com/article/Science-Progress/306753585.html

2. Greul, M. Metal and ceramic prototypes using the Multiphase Jet Solidification (MJS) process Metallische und keramische Prototypen mit dem Multiphase jet Solidification (MJS) Verfahren. Fraunhofer IFAM. Conference on Rapid Tooling & Manufacturing 1997. Proceedings Aarhus, 1997.

3. Techel A. et al., Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable. Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS), интернет-издание Laser Institute of America. Доспуп свобод.: http://www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additive-manufacturing/

4. Sabina L. Campanelli et. al, Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process. Polytechnic of Bari, Department of Management and Mechanical Engineering, Viale Japigia, 182 Italy [Электронный ресурс], Режим доступа: http://cdn.intechweb.org/pdfs/12285.pdf

5. Безобразов Ю.А. и др. Анализ структуры образцов, полученных DMLS- и SLM-методами быстрого прототипирования. СПбГПУ.

6. 3-D Printing Manufacturing Process is Here.; Independent global forum for the Unmanned Aircraft Systems community, UAS Vision. [Электронный ресурс] режим доступа: http://www.uasvision.com/2012/07/16/3-d-printing-manufacturing-process-is-here/

7. Khoshnevis B. et al. Metallic part fabrication using Selective Inhibition Sintering (SIS). Department of Industrial and Systems Engineering University of South California, Los Angeles, CA 90089, USA. [Электронный ресурс],
https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:EchCrGNayJEJ:www-bcf.usc.edu/ ~yongchen/ Research/SIS-Metal-RPJ.pdf+SIS+additive+technology&hl=ru&gl=ru&pid=bl&srcid=ADGEESjQ_ v59NxxBQh5sQiUz3QgjtNeeWcqlcu-yuFb03Z5f2q8o892B463G6LPjxC0O6xWaq4NyanW-ZxujRHao-xCGsO0uscREI3KhhXFjVikdhKMPkZESqv6lZqjCIadA1GLoe82W&sig= AHIEtbSa8cUItK_aioM_ff_zJqsMSakp6A

8. 5-akselinen pystykarainen työstökeskus MATSUURA MAM72-35V on uudistunut. 18.12.2012. Доступ свобод.: http://www.makrum.fi/blog/matsuura-uudistanut-mam72-35v-pystykaraisen-tyostokeskuksen/
9. Louvis E. et. Al. Selective laser melting of aluminium components. Journal of Materials Processing Technology. Volume 211, Issue 2, 1 February 2011, Pages 275–284. Department of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, United Kingdom.
10. Yasa E. et. al, The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts", Rapid Prototyping Journal, (2011) Vol. 17 Iss: 5, pp.312 – 327
11. Yasa E. , Kruth J. Application of laser re-melting on Selective laser melting parts. Catholic University of Leuven, Dept. of Mech. Eng, Heverlee, Belgium. Advances in Production Engineering & Management 6 (2011) 4, 259-270, ISSN 1854-6250 Scientific paper [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/332611/2/APEM6-4_259-270.pdf
12. Thivillon L. et.al. **Industrial technology of laser assisted direct metal deposition.** Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne (ENISE), DIPI Laboratory, Saint-Etienne, FR [Электронный ресурс]. Режим доступа свободный: http://www.dipilab.fr/AxeRecherche/fabricationdirecte/DMD/ENISE_DMD.pdf
13. Beyer E. New Industrial Systems & Concepts for Highest Laser Cladding Efficiency. **Fraunhofer**-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik. MAY 6, 2011 in LASER CLADDING, LASER MANUFACTURING [Электронный ресурс] режим доступа http://www.lia.org/blog/2011/05/high-performance-laser-cladding/
14. Robbie Adams, ION FUSION FORMATION, Pat. US 6,680,456 B2, Jan. 20,2004.
15. Осокин Е. Н. Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : курс лекций / Е. Н. Осокин, О. А. Артемьева. – Электрон. дан. (5 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Процессы порошковой металлургии : УМКД № 63-2007/ рук. творч. коллектива Е. Н. Осокин). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования : Intel Pentium (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц; 512 Мб оперативной памяти; 5 Мб свободного дискового пространства ; привод DVD; операционная система Microsoft Windows 2000 SP 4 / XP SP 2 / Vista (32 бит) ; Adobe Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата pdf). ISBN 978-5-7638-1523-8 (комплекса). Номер гос. регистрации в ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320802739 от 01.01.0001 г. (комплекса). © Сибирский федеральный университет, 2008.
16. Hohmann M., Brooks G., Spiegelhauer C. Production methods and applications for high-quality metal powders and sprayformed products. Produktionsmethoden und Anwendungen fur qualitativ hochwertige Metallpulver und spruhkompaktierte Halbzeuge. Stahl und Eisen 125 (2005) Nr. 4.
17. Tsantrizos P. G. et. al. Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization. Pat. US № 5707419, дата выдачи: 13 янв 1998.
18. Интернет-сайт компании Raymor: www.raymor.com/apc/processes/plasma/
19. Donachie M.J. Superalloys: a technical guide/M. Donachie, Jr., S. Donachie. -2nd ed. p/cm. ISBN 0-87170-749-7. ASM International. 2002.
20. Fngelo H. C., Subramanian R. Powder Metalurge: Science, technology and application. 2008. Second printing August 2009. Pulished dy Asoke K. Ghosh, PHI Learning Privated Limited, M-97, Connaught Circus, New Dehli-110001 and Printed by Jay Print Pack Private Limited, New Dehli – 110015. ISBN-978-81-203-32-81-2.
21. Ahsan M.N. et. al. A comparison of laser additive manufacturing using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders. Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping – Bártolo et al. (eds)/© 2012 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-68418-7

22. Ahsan M.N. et. al. A comparatine study of laser direct metal deposition characteristics using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders. Materials Science and Engineering A528 (2011), p. 7648-7657
23. Boulos M. Plasma power can make better powders. Metal Powder Report. Volume 59, Issue 5, May 2004, Pages 16–21.
24. [Электорнный ресурс] Веб-сайт компании НЕТРАМ http://www.netramm.com/index.htm
25. Wohlers Report 2012. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, ISBN 0-9754429-8-8, 286 p, 2012.
26. UK Government offers investment in AM. TCT additive manufacturing and professional 3D printing. October 22, 2012 [Электронный ресурс] режим доступа: http://www.tctmagazine.com/articles/uk-government-offers-investment-in-am/
27. UAV fully fabricated by additive layer manufacturing. 27 August 2012 [Электронный ресурс] режим доступа http://www.greencarcongress.com/2012/08/sulsa-20120827.html
28. Minlin Zhong. Overview of Laser Additive Manufacturing in China. *Tsinghua* University [Электронный ресурс] http://www.lia.org/blog/2011/05/overview-of-laser-additive-manufacturing-in-china/
29. Kovaleva I.O., Kovalev O.B. Simulation of the acceleration mechanism by light-propulsion for the powder particles at laser direct material deposition. Khristianovich's Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia/ Optics and Laser Technology, Volume 44, Issue 3, p. 714-725.
30. Лагуткин С. В. "Разработка технологии и оборудования для производства металлических порошков центробежно-газодинамическим распылением расплава". Дис. Канд. Техн. Наук. 2003. [Электронный ресурс] Научная библиотека диссертаций и авторефератов disserCat http://www.dissercat.com/content/razrabotka-tekhnologii-i-oborudovaniya-dlya-proizvodstva-metallicheskikh-poroshkov-tsentrobe#ixzz2JXGeObW5.
31. Woodcock J. 3D printing, government and police. TCT Magazin, Volume 20/Ussue 6. Nov.12.2012. p.5.
32. Москвичев Ю. Л. и др. Гранульные композиты и эффективность их применения. Журнал "АС" (Actual Conference), № 1 (70) 2011, с. 44-48.
33. Глущенко Е.С. Применение распыленных порошков сплавов карбида вольфрама для армирования породоразрушающего инструмента. Донецкий национальный технический университет. [Электронный ресурс] http://www.masters.donntu.edu.ua/2011/igg/glushchenko/library/tez4.htm

Глоссарий наименований, терминов, аббревиатур и сокращений, часто встречающихся в публикациях на тему аддитивных технологий

3D Systems –компания-производитель АМ-машин (США).
Additive fabrication (AF) – стандартизированное обобщающее англоязычное название аддитивных технологий; аддитивные технологии.
Additive manufacturing (AM) – то же, что и Additive fabrication (AF)).
Additive processes – аддитивный процесс.
Additive systems – машины и оборудование, обеспечивающие аддитивный процесс изготовления изделия.
AF - аббревиатура Additive fabrication.
AM – аббревиатура Additive Manufacturing.

AMF - Additive Manufacturing File, формат компьютерных данных, альтернативный формату Stl., применяемому с 1987 года в качестве базового для передачи данных

компьютерной 3D-модели в аддитивную машину для построения физической модели. AFM базируется на языке XML (Extensible Markup Language – расширяемый язык разметки) и поддерживает размерности, цвета, текстуры, триангуляцию, сетчатые структуры, которые Stl-формат не поддерживает; более компактный, чем Stl-файл.

Arcam – название компании-производителя АМ-машин (Швеция).

ASTM International - **American Society for Testing and Materials**, организация в США, которая занимается разработкой технических стандартов для широкого спектра материалов, изделий, систем и услуг, в частности и в области аддитивных технологий.

Bed Deposition – один их основных видов аддитивных технологий; предполагает предварительное формирование слоя построения в виде равномерно распределенного по всей поверхности рабочей платформы сыпучего или жидкого строительного материала, а затем селективное отверждение фрагментов сформированного слоя в соответствии с текущим сечением CAD-модели, например, путем спекания, сплавления, склеивания или полимеризации частиц модельного материала.

Binder jetting – стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому построение изделия ведется посредством связующего состава, селективно связывающего частицы сыпучего модельного материала.

Blueprinter - название компании-производителя АМ-машин (Дания); в машинах используется технология спекания порошковый полимеров за счет инфракрасного излучения, генерируемого посредством специальных нагревательных приборов, размещенных в подвижной головке.

CAD\CAM\CAE- сочетание, подразумевающее использование всего комплекса цифровых технологий: CAD – проектирование (Computer-Aided Design), CAM - материализация на технологическом оборудовании посредством числового программного управления (Computer-Aided Manufacturing), CAE – расчет и анализ посредством специализированного программного обеспечения (Computer-Aided Engineering).

CIM-технологии - Ceramic Injection Molding, разновидность PIM-технологий, одно из направлений порошковых технологий; предполагает последовательное выполнение следующих операций: смешение керамического порошка со связующим-пластификатором (обычно полимером), формование (обычно в машине типа термопласт-автомата), получение таким образом «грин-модели» с последующим удалением связующего и спеканием в специальных печах.

Concept Laser - компания-производитель АМ-машин (Германия).

Direct Deposition – «непосредственное нанесение материала», один из основных видов аддитивных технологий; предполагает подачу строительного материала (в виде прутка, пасты, вдуваемого порошка) непосредственно в то место, где в данный момент времени происходит процесс послойного синтеза.

Directed energy deposition – стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому строительный материал и энергия для его сплавления подводятся одновременно в место построения изделия.

DLP - Digital Light Procession, название процесса, применяемого в АМ-машинах компании Envisiontec.

DM - Direct Manufacturing, одно из названий аддитивного процесса, разработанного компанией Sciaky (США).

DMD - Direct Metal Deposition, непосредственное нанесение металла, аббревиатура названия АМ-процесса и технологии.

DMF – Direct Metal Fabrication, общее название АМ-технологий, предполагающих послойный синтез изделий из металла, иногда используется в значении DMD

DMLS - Direct metal laser sintering, непосредственный лазерный синтез из металла (порошкового), наименование АМ-технологии, разработанной компанией EOS (Германия);

EIGA-технология - Electrode induction guide inert gas atomization, разновидность технологии газовой атомизации для получения порошков реактивных и жаропрочных сплавом посредством индукционной плавки и распылением инертным газом.

EOS - Electro Optical Systems GmbH, компания-производитель АМ-машин (Германия).

Euromold – крупнейшая ежегодная выставка аддитивных технологий и оборудования (Франкфурт-Майн, Германия).

EBM – Electron Beam Melting, аббревиатура название аддитивноего процесса, в котором сплавление модельного материала производят посредством электронного луча (компании Arcam, Sciaky).

Envisiontec - компания-производитель АМ-машин (Германия).

ExOne - компания-производитель АМ-машин (США).

Fabrisonic - компания-производитель АМ-машин (США), входит в компанию Solidica (США).

Fcubic – название одной из аддитивных технологий и компании, ее разработавшей; в настоящее время приобретена компанией **Höganäs AB** (Швеция); особенность технологии в том, что что вместо связующего, при построении грин-модели впрыскивают специальный состав, ускоряющий поглащение теплового излучения. После построения грин-модель не извлекают из массива материала, а вместе с ним помещают в печь, где происходит спекание обработанной указанным составом модели, тогда как не обработатанная часть материала остается не спеченной.

FDM - Fused Deposition Modeling, название АМ-технологии компании Stratasys; относится к категории Material extrusion.

HIP - Hot Isostatic Pressure, горячее изостатическое прессовани; технология, применяемая для пост-обработки синтезированных изделий, в частности, из алюминия и титановых сплавов с целью устранения внутренней микропористости.

Höganäs AB - компания-производитель АМ-машин (Швеция); использует технологию fcubic.

Jetting – «струйные технологии», стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому строительный материал или связующий состав подводятся в зону построения изделия (обычно) посредством многосопловых устройств в виде подвижных в плоскости X-Y рабочих головок.

Ink-Jet – то же, что и Binder jetting.

LaserCusing – фирменное название аддитивного процесса(компания Concept Laser, Германия).

Kira - компания-производитель АМ-машин (Япония), работающих по технологии Sheet Lamination.

LENS - Laser Engineered Net Shape, фирменное название аддитивного процесса, разработанного компанией Optomec (США);

Lithoz – компания-разработчик АМ-технологии LCM- Lithography-based Ceramic Manufacturing (Австрия); технология предполагает фотосинтез грин-модели изделия из жидкого фотополимера с высоким содержанием керамической компоненты с последующим спеканием грин-модели в печи.

Material extrusion – стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому построение изделия ведется посредством экструзии пластифицированного тем или иным способом строительного материала.

Matsuura - компания-производитель АМ-машин (Япония) работающих по технологии Multi-functional.

Mcor Technology - компания-производитель АМ-машин (Ирландия), работающих по технологии Sheet Lamination.

MJS - Multiphase Jet Solidification, название одной из АМ-технологий, в соответствии с которой модельный материал в виде пластифицированного с помощью полимерной пасты металлического порошка подают через экструдер в зону построения.

MIM-технология - Metal Injection Molding, разновидность PIM-технологий, одно из направлений порошковых технологий; предполагает последовательное выполнение следующих операций: смешение металлопорошковой композиции со связующим-пластификатором (обычно полимером), формование (обычно в машине типа термопласт-автомата), получение таким образом «грин-модели» с последующим удалением связующего и спеканием в специальных печах.

MLS - Micro Laser Sintering, общее название технологий лазерного синтеза изделий с малыми размерами, обычно менее 5 мм.

MLS – MicroLightSwitch, микро-механические затворы (работающие по принципу «да-нет»), через которые производится выборочное облучение фотоотверждаемой смолы.

MTT Technologies - компания-производитель АМ-машин (Великобритания), в настоящее время входит в состав компании Renishaw.

Multi-functional – «многофункциональные технологии», стандартизованное название одного их основных видов аддитивных технологий, предполагающих использование в процессе построения не только аддитивных процессов, например, фрезерования.

NIST - National Institute of Standards and Technology, Национальный институт стандартов и технологий, США.

Objet Geometry - компания-производитель АМ-машин (Израиль), работающих по технологии PolyJet.

Optomec - компания-производитель АМ-машин (США), работающих по технологии LENS.

Phenix Systems - компания-производитель АМ-машин (Франция) для синтеза изделий из металлопорошковых и керамических композиций.

PIM-технологии - Powder Injection Molding, общее название порошковых технологий, предполагающих получение изделий из порошковых материалов методами, похожими на литье пластмасс в термопласт-автоматах. Подразделяются на CIM-технологии (Ceramic Injection Molding и MIM-технологии (Metal Injection Molding).

PolyJet – название АМ-технологии, в соответствии с которой жидкий модельный материал, как правило, фотополимер, подают в зону построения с помощью многоструйной головки.

Powder bed fusion – стандартизованное название аддитивной технологии, согласно которой в процессе построения на рабочей платформе предварительно формируют слой строительного материала и затем часть материала в соответствии с данными текущего сечения CAD-модели связывают (сплавляют, склеивают) тем или иным способом.

ProMetal - компания-производитель АМ-машин (Германия), работающих по технологии Ink-Jet, в настоящее время входит с состав компании ExOne (США).

Rapid Prototyping, RP-технологии – устаревшее, но еще употребляющееся название аддитивных технологий.

Sciaky - компания-производитель АМ-машин (США), использующая технологию Directed energy deposition (наварка металла посредством EBM).

Realizer - компания-производитель АМ-машин (Германия) для синтеза изделий из металлопорошковых композиций по технологии SLM.
Renishaw – многопрофильная компания, производитель АМ-машин (Великобритания), работающих по технологии SLM.

REP – **Rotating Electrode Process**

RP-технологии – то же, что и Rapid Prototyping.

Sciaky – компания-производитель АМ-машин, работающих по DMD-технологии (США).
Sheet lamination – стандартизованное название одного из видом АМ-технологий; предполагает построение изделия из листовых модельных материалов.

SHS -Selective Heat Sintering, название аддитивной технологии, разработанной компанией Blueprinter (Дания).

SIS - Selective Inhibition Sintering, технология в соответствии с которой на неотверждаемую в АМ-процессе часть материала наносят ингибитор – раствор соли металла.

SLA – от Steriolithography Apparatus, общее название технологии и машин, работающих по технологии лазерного послойного отверждения фотополимерных смол.

SLM – Selective Laser Melting (селективное лазерное сплавление), название **АМ**-процесса;

SLM Solutions – компания-разработчик SLM-технологии и производитель АМ-машин (Германия).

SLS - Selective Laser Sintering, селективное лазерное спекание, обобщенное название одного из видов АМ-технологий.

SMS - Selective Mask Sintering, название АМ-процесса, в котором спекание сыпучего модельного материала производят за счет теплового воздействия специальными нагревательными приборами, формирующими «маску» (образ, контур) сечения строящегося изделия.

Solidimension Ltd. - компания-производитель АМ-машин, работающих по технологии Sheet lamination, в настоящее время вне бизнеса, (Израиль).

Solidica - компания-производитель АМ-машин (США); использует технологию ультразвуковой сварки листовых материалов с последующим фрезерованием каждого слоя.

Solidscape – компания-производитель АМ-машин (США).

SPLS - Solid Phase Laser Sintering, фирменное название аддитивного процесса, разработанного компанией Phenix Systems (Франция);

Spray forming – прогрессивная технология в металлургии, позволяющая получать «выращенные» болванки (заготовки для последующих переделов) путем газовой атомизации расплава и осаждения распыливаемого металла на подложку.

Steriolithography – слереолитография (лазерная), название процесса, в соответствии с которым модельный материал в виде жидкого фотополимера отверждают послойно посредством лазерного луча.

Stl-(формат) – сокращение от Steriolithography, формат файлов, применяемый с 1987 года в качестве базового для передачи данных компьютерной 3D-модели в аддитивную машину для построения физической модели.

Stratasys - компания-производитель АМ-машин (США), работающих по технологии Material Extrusion.

UAM - Ultrasonic additive manufacturing, название технологии компании Fabrisonic (США), в соответствии с которой тонкие металлические пластины сваривают с помощью ультразвука и затем «лишний» металл удаляют фрезерованием.

Vat photopolymerization – один из основных АМ-процессов, предполагающий полимеризацию жидкого фотополимера, находящегося в открытой ванне в рабочей камере АМ-машины, посредством светового воздействия, например, лазером.

VIGA - Vacuum Induction Melt Inert Gas Atomization, технологический процесс и установки для получения порошков металлов методом газовой атомизации; компания ALD (Германия).

VIM – Vacuum Induction Melting, вакуумная индукционная плавка, процесс, используемый для вакуумного литья жаропрочных и реактивных металлов, а также для получения металлопорошковых композиций путем газовой атомизации.

Voxeljet - Voxeljet Technology GmbH, компания-производитель АМ-машин (Германия).

ZCorp – Z Corporation, компания-производитель АМ-машин (США), в настоящее время входит в состав 3D Systems.