

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ (обзор)

Применение аддитивных технологий является перспективным направлением в развитии различных отраслей промышленности, особенно таких как высокоточное машиностроение и авиадвигателестроение, позволяющим получать как готовые изделия, так и изготавливать необходимую в промышленности технологически сложную оснастку. Применение АМ-технологий позволяет объединить в себе главные преимущества таких методов получения изделий как порошковая металлургия и литейное производство.

Ключевые слова: порошок, форма, фракционный состав, слой, энергия, спекание, построение, свойства.

На сегодняшний день все чаще можно услышать о перспективах внедрения аддитивных технологий в той или иной сфере деятельности, что, безусловно, связано с преимуществами, предоставляемыми их применением.

Но что же из себя представляют аддитивные технологии (от английского *Additive Fabrication* или *Additive Manufacturing AM*) – эти технологии предполагают изготовление изделия по данным цифровой модели (или САД-файла) методом послойного добавления материала [1].

Таким образом, формирование изделия происходит послойно, шаг за шагом путем добавления (тем или иным способом) слоя определенного материала, отверждения или фиксации этого слоя в соответствии с конфигурацией сечения САД-модели и соединения каждого последующего слоя с предыдущим [2]. Взамен существующей технологии обработки металлов резаньем, когда материал как бы «отнимается».

К основным преимуществам аддитивных технологий можно отнести следующие:

1. Возможность изготовления деталей сложной геометрии, необходим только САД модели..
2. Возможность оперативно менять геометрию деталей.
3. Высокий коэффициент использования материала.

Организация ASTM International (American Society for Testing and Materials), которая занимается разработкой технических стандартов для широкого спектра материалов, изделий, систем и услуг классифицирует аддитивные технологии следующим образом, разделяя их на 7 категорий:

1. **Material extrusion** – «выдавливание материала»
2. **Material etting** – «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».

В международном сообществе, устоявшейся классификации аддитивных технологий пока не принято [1]. Различные авторы подразделяют их:

- по применяемым строительным или модельным материалам (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и т. д.);
- по источнику энергии (лазер или электронный луч);
- 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.

Говоря об аддитивных технологиях подразумеваются, конечно же, технологии «трехмерной печати» (3-D printing), которые с каждым годом набирают все большую популярность. Технология «трехмерной печати» появилась в конце 80-х гг. XX в. Пионером в этой области являлась компания 3D Systems, которая разработала первую коммерческую стереолитографическую машину – SLA – Stereolithography Apparatus (1986 г). До середины 90-х гг. она использовалась главным образом в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, связанной с оборонной промышленностью [2].

SLA - технология трехмерной печати использует сырье в виде жидкого фотополимера, который затвердевает под воздействием светового излучения лазера, образуя твердую поверхность в точке проекции лазера.

Основные плюсы этой технологии:

- отличная точность позиционирования, гладкость поверхности;
- изготовление моделей любой сложности (тонкостенные и мелкие детали);
- довольно высокая, по сравнению с другими техно-

логиями, скорость создания объекта;

- отсутствие каких-либо технологических проблем с печатью (перегрев, расслаивание, обрушение под весом, сбой маршрута головки, плохое прилипание, отклеивание углов)

К недостаткам можно отнести:

- невысокую физическую прочность изготовленных объектов;

- ограничения в выборе материалов (возможность задействовать только специальные типы фотополимеров);

- необходимость в ультрафиолетовой засветке объекта после печати, для окончательного затвердевания.

На сегодняшний же день самой распространенной является FDM — технология, заключающаяся в послойном наплавлении пластика, который непрерывно подается на контур будущей детали через тонкое формовочное сопло.

Достоинства данного метода состоят в следующем:

- недорогое и широко распространенное сырье для печати (полимеры и пластик);

- простая в изготовлении и ремонте механическая часть устройства;

- возможность использования обширной палитры цветов для печати;

- невысокая стоимость печати.

Недостатками являются:

- растекание пластика из-за нагрева за границами печатаемой области;

- ограничение применения других материалов кроме тех, которые можно расплавить и продавить;

- чувствительность к перепадам температур во время процесса печати.

Последнее, пожалуй, единственное, что принципиально отличает два вида аддитивных технологий — это способ подачи материала. 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 (электронным лучом), скрепляя частички порошка (сплавляя или склеивая) в соответствии с текущим сечением исходной САД-модели. Эта технология в англоязычной традиции называется «Bed Deposition» (рис. 1), т. е. предполагается, что имеется 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). В этом методе используется измельченный порошок (возможно

использование порошков титана, алюминия и др.) который спекается лазером в точке контакта и наращивает тем самым структуру изготавливаемого объекта (рис. 1). То есть в этой технологии инструментом отверждения является лазер, который здесь, в отличие от лазерной стереолитографии (SLA-технологии), является источником тепла [2]. «Селективное лазерное спекание» смело можно назвать самой интересной и ценной, на сегодняшний день, технологией, с точки зрения точного машиностроения, и, в частности, авиастроения.

К достоинствам данного метода необходимо отнести прежде всего:

- возможность осуществлять печать объектов без использования поддерживающих структур, под нависающими поверхностями (в отличие от технологии **Direct deposition** рис. 3). В данном случае сам порошок служит поддержкой и не дает модели разрушиться пока она окончательно не сформируется (рис. 1);

- кроме того можно использовать разнообразные материалы для печати;

- при этом можно достичь высокой прочности изделий, при использовании соответствующего материала (на сегодняшний день в качестве сырья доступны нейлон, стекло, пластик, керамика, различные металлы);

К недостаткам данной технологии относятся:

- сложность последующей обработки (обжига) после печати, в специальной печи для окончательного спекания порошка (если это необходимо);

- усадка детали после обжига достигающая порой значений 30% (а в среднем 8-10% в зависимости от используемого материала) от исходного объема, что накладывает ограничения на допуски точности, и требует последующей механической обработки для приведения к требуемым значениям параметров качества;

- порошок летуч и при неправильно подобранных режимах работы, способен засорять рабочее пространство и ухудшать качество печати;

- сложность и громоздкость оборудования, используемого в основном при промышленном производстве (например, необходимость защиты порошков титана от окисления путем применения защитных газов или использования вакуумного оборудования);

- не возможность применения данного метода как технологии восстановления и ремонта деталей;

- возможно спекание порошинок соседствующих с порошинками в месте построения;

- эта технология не позволяет изготавливать детали с закрытыми полостями;

- высокая стоимость оборудования, а главное высокая стоимость сырья (сферического порошка).

Схема хода лазера и послойного построения детали по технологии селективного лазерного спекания представлена на рисунке 2.

Второй вид аддитивных технологий – «Direct Deposition» 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.

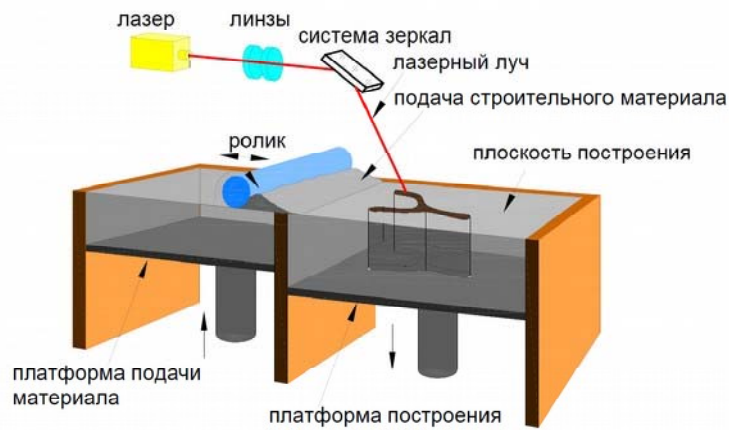


Рис. 1. SLS технология (Bed deposition) [2]

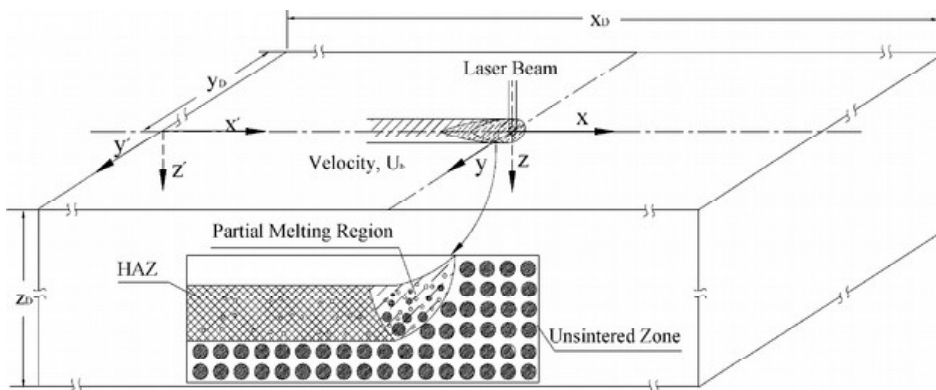


Рис. 2. Схема построения детали по технологии SLS [3]

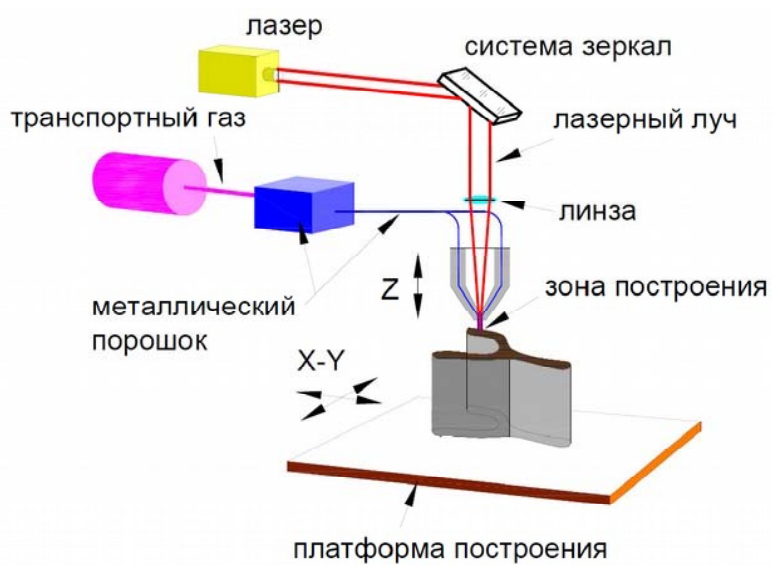


Рис. 3. Технология Direct deposition [2]

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.

Преимуществом данной технологии 3-D печати является то, что ее можно использовать в качестве метода восстановления деталей с различной конфигурацией, а так же для формирования закрытых полостей при послойном построении.

Общей особенностью технологий Direct deposition является необходимость применения специальных поддержек – своеобразных якорей, которые удерживают строящуюся деталь от термических деформаций. При построении деталей из порошков по технологии Bed deposition в этом нет необходимости, деталь при построении находится в массиве порошка, и не спеченный порошок сам выполняет функцию поддержек. При сплавлении металлических порошков концентрация тепловой энергии в рабочей камере чрезвычайно высока, и без удерживающих «якорей» деталь может «уплыть», покособиться и даже повредить элементы дозирующей системы машины. Кроме того, удаление поддержек – это достаточно ответственный процесс. Необходимо, во-первых, снять остаточные напряжения для чего 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, что является значительным недостатком технологии Direct deposition. Кроме того, АМ-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 [2].

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 возникает особый 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.

Развитию АМ-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 [2].

В тоже время АМ-технологии дают новые возможности и для более традиционных форм производства, позволяя изготавливать сложную оснастку. Например, пресс-форма может быть выращена вместе с каналами охлаждения произвольной конфигурации, что невозможно сделать при обычных методах механообработки.

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 АМ-технологии это не противопоставление, а предложение новых возможностей для оптимизации затрат и повышения эффективности производства.

Обслуживание серийного производства также связано с необходимостью изготовления специальных приспособлений, шаблонов, кондукторов и т. д., и здесь применение АМ-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 АМ-машине или делать «нормальную» оснастку, но с риском, что через короткое время потребуется внесение изменений и оснастку придется переделывать.

Отдельным вопросом при внедрении аддитивных технологий является выбор сырья, который не так уж и велик. 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, которые классифицируют по условному диаметру частиц, подразделяя их на нанодисперсные с диаметром частиц менее 0,1 мкм, ультрадисперсные с диаметром частиц 0,1–1,0 мкм, высокодисперсные от 1,0 до 10 мкм, мелкие от 10 до 40 мкм, средние от 40 до 250 мкм и крупные от 250 до 1000 мкм. Одним из параметров, характеризующих порошок, является величина d_{50} – средний диаметр частиц. Например, если d_{50} равно 40 мкм, это означает, что у 50 % частиц порошка размер частиц меньше или равен 40 мкм. Общеизвестным является тот факт, что чем больше частиц одного диаметра в партии порошка, тем луч-

ше качество получаемых из него металлопорошковых композиций. Вот почему порошки после изготовления дополнительно сортируют по размерам частиц [2], с чем мы не совсем согласны, поскольку это не согласуется с правилом Плато [5].

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 [2]. Что также противоречит правилу Плато [5]. К тому же в работе [6] показано, что частицы угловатой формы могут обеспечить меньшую пористость порошковых изделий, а также, в отличие от сферических порошков, могут быть скомпактированы в холодном состоянии [7].

И, во-вторых, необходимо обеспечить «текучесть» порошковой композиции в системах подачи материала с минимальным сопротивлением (Direct deposition). Это как раз достигается при сферической форме частиц, поскольку порошинки, имеющие угловатую форму, обладают невысокой текучестью.

Основными технологиями получения порошков для АМ-машин, которые позволяют изготавливать порошки необходимого размера и обеспечивают выполнение этих требований, являются газовая атомизация, вакуумная атомизация и центробежная атомизация [2,8].

При газовой атомизации металл расплавляют в плавильной камере (обычно в вакууме или в инертной среде) и затем сливают в управляемом режиме через специальное устройство – распылитель, где производится разрушение потока жидкого металла струей инертного газа под давлением.

Процесс вакуумной атомизации происходит за счет растворенного в расплаве газа. Суть его состоит в следующем. Атомайзер состоит из двух камер – плавильной и распылительной. 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 давления побуждает растворенный газ к выходу на поверхность капель расплава и «взрывает» капли изнутри, обеспечивая при этом сферическую форму и мелкодисперсную структуру порошка.

Наконец, технология центробежной атомизации предполагает распыление расплава, создаваемого электрической дугой между прутком материала и вольфрамовым электродом.

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.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение АМ-технологий является перспективным направлением в развитии различных отраслей производства позволяющим получать как готовые изделия, так и необходимую в промышленности технологически сложную оснастку.

Технологии 3-D печати позволили объединить в себе не только преимущества порошковой металлургии такие, как высокий коэффициент использования материала, что не получается достичь методами литья, а также и преимущества литейного производства, такие, как получение деталей сложной формы и различной конфигурации, но даже превзошла их.

Не смотря на все достоинства и преимущества, которые предоставляет использование 3-D печати остается ряд проблем, которые сдерживают распространение этой технологии в промышленных масштабах. Одной из них является необходимость тщательных исследований свойств (механических, физических) получаемых изделий из различных порошковых материалов, в зависимости от таких факторов как влияние фракционного состава и формы самих частиц, что безусловно, является очень важным в таких ответственных отраслях производства как авиастроение. А так же необходимость отработки технологических режимов процесса спекания под конкретные порошковые материалы и изделия. Хотя следует отметить, что на сегодняшний день уже существует ряд деталей, изготовленных методами 3-D печати, которые устанавливаются на газотурбинные двигатели производства зарубежных компаний [9,10]. В то время как развитие отечественного рынка АМ-технологий находится на начальной стадии. Еще одной проблемой является дороговизна оборудования для 3-D печати, но исходя из опыта предприятий, которые внедряют в своем производстве технологии послойного выращивания изделий можно сделать вывод, что главным сдерживающим фактором на пути к широкому применению АМ-технологий является дороговизна сырья для печати. Особенно это сказывается при использовании порошков титана как легированных, так не легированных, и основную роль в ценообразовании здесь играет не столько стоимость легирующих элементов, а сколько стоимость самой технологии получения порошков необходимой сферической формы (которая составляет около 500–700 долларов за килограмм).

Поэтому нами предложено исследование технологии (и отработки режимов) получения изделий методами 3-D печати с использованием не сферических порошков зарубежного производства, а порошков неправильной формы, получаемых на отечественных предприятиях, что позволит в несколько раз снизить стоимость готовых изделий, благодаря чему станет возможным внедрение АМ-технологий на отечественных предприятиях, занимающихся, в частности, авиадвигат-

телестроением. Так же планируется исследование технологии сфероидизации этих порошков для дальнейшего их применения при производстве деталей методами 3-D печати. В этом направлении нами ведутся интенсивные исследования, результаты которых в ближайшее время будут опубликованы.

Список литературы

1. Довбыш В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М. Довбыш, П. В. Забеднов, М. А. Зленко // Библиотечка литейщика. – 2014. – № 9. – С. 14–71.
2. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. – Санкт-Петербург : Издательство политехнического университета, 2013. – 221 с.
3. Bin xiao Partial melting and resolidification of metal powder in selective laser sintering / Bin Xiao and Yuwen Zhang // Journal of thermophysics and heat transfer. – 2006. – Vol. 20, №. 3. – P. 439–448.
4. Powder Metal Technologies and Applications Volume 7 of ASM Handbook. – ASM International, 1998. – 2762 p.
5. МакЛин Д. Границы зерен в металлах / Д. МакЛин. – М. : Metallurgizdat, 1960. – 325 с
6. Водородная технология титановых сплавов / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, В. К. Носов, А. М. Мамонов; под общ. ред. А. А. Ильина. – М. : МИСИС.– 2002. – 392 с.
7. Порошковая металлургия титановых сплавов / Под ред. Ф. Х. Фроус и Дж. Е. Смургерски : пер. с англ. под ред. С. Г. Глазунова. – М. : Металлургия, 1985.-263 с.
8. Сфероидизация порошков в дуговой плазме / Порошковая металлургия / [С. А. Макарова, Р. Т. Гольшевская, Н. А. Кошелев, О. Н. Кузовлева] // Сталь. – 1985. – № 8. – 79–82.
9. 3D принтер по металлу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.novator-grp.ru/rus/catalog/274>
10. 3D-принтер и металл – настоящее и будущее трехмерной печати металлом [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://3dtoday.ru/industry/a-3d-printer-and-metal-present-and-future-three-dimensional-printing-metal.html>

Одержано 11.12.2014

Джуган О.А., Овчинников О.В., Ольшанецкий В.Ю. Аддитивні технології і можливості їх застосування в сучасних умовах (огляд)

Застосування адитивних технологій є перспективним напрямком у розвитку різних галузей промисловості, особливо таких, як високоточне машинобудування і авіадвигунобудування, що дозволяє отримувати як готові вироби, так і виготовляти необхідне в промисловості технологічно складне оснащення. Застосування АМ-технологій дозволяє об'єднати в собі головні переваги таких методів отримання виробів як порошкова металлурія та ливарне виробництво.

Ключові слова: порошок, форма, фракційний склад, шар, енергія, спікання, побудова, властивості.

Dzhugan A., Ovchinnikov A., Olshanetskiy V. Additive technologies and capabilities of their applications in modern conditions (review)

The use of additive technology is a promising direction in the development of various industries, especially such as precision mechanical engineering and aircraft engine manufacturing, which allow obtaining both finished products and making technologically complex tools needed in the industry. The use of AM technology allows to combine the main advantages of such methods products manufacturing as powder metallurgy and foundry.

Key words: powder, form, fractional composition, layer, the energy, sintering, building, properties.