

## НАНОТЕХНОЛОГИИ И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ «СНИЗУ-ВВЕРХ»

С.А. Чижик

*Институт тепло- и массопереноса им. А.В. Лыкова НАН Беларуси*

По определению Нобелевского лауреата Р.Фейнмана, нанотехнологии являются технологиями «снизу-вверх», когда объекты (изделия) производства формируются путем цепочки присоединений «атом к атому», «молекула к молекуле». Именно таким образом реализуется процесс роста в природе. Освоение человеком данного подхода является чрезвычайно привлекательным, но на сегодняшний день нереализуемым, хотя атомарная сборка была экспериментально продемонстрирована на небольшом количестве атомов. Масштабный уровень при манипулировании отдельными атомами делает процедуры чрезвычайно сложными, что не позволяет достичь приемлемой производительности. Основой получения продуктов nanoиндустрии сегодня являются обнаруженные учеными и реализованные на практике процессы самоорганизации материи в наномасштабе. Например, при производстве углеродных наноструктур (фуллерены, углеродные нанотрубки), в инженерии поверхностей при нанесении функциональных нанопокровов и др.

В последние годы внимание ученых и еще в большей степени практиков обращено к аддитивным технологиям, технологиям 3D печати, которые, по сути, можно также отнести к технологиям «снизу-вверх». Иногда их интерпретируют как цифровые технологии. В данном случае трехмерное изделие «выращивается» по заданной программе путем последовательно присоединения элементарных объемов материала.

Существуют мнения, что парадигма развития производств на базе аддитивных технологий будет во многом определять будущее мировой экономики. Такая уверенность основана на том, что при использовании современных технологий аддитивного производства обеспечивается высокий

коэффициент использования материалов, сокращение производственных издержек и себестоимости при малых партиях, снижение энергозатрат, исключения ряда технологических операций, с возможностью перехода от массового производства к производству по индивидуальным заказам, когда все стадии реализации проекта находятся в единой конструкторско-технологической среде, обеспечивающей, как соответствие изделия проектной документации (цифровой модели), так и возможность быстрой модификации изделия. При этом процессы, используемые в аддитивном производстве могут быть реализованы в жидкой фазе (полимеры, фотополимеры) в стереолитографии, послойной наплавке, струйной печати, в порошкообразном состоянии (полимеры, керамика, металл) в селективном лазерном спекании, селективной лазерной плавке, в прямом лазерном спекании металлов, электронно-лучевой плавке, прямом нанесении металлов, точном лазерном формовании, в твердой фазе при послойном изготовлении объектов из листового материала, или при произвольном экструзионном формовании. Во многом интерес к развитию таких технологий связан с тем, что современные технологии аддитивного производства позволяют значительно уменьшить техногенное воздействие на окружающую среду. При использовании аддитивных технологий значительно сокращается количество обрабатываемого исходного материала (до 90 %), снижается энергоемкость производства и количество материала требующего переработки. Кроме того, аддитивное производство, обеспечивает возможность производства изделий непосредственно в том месте, где они нужны, и когда они нужны, сокращая издержки на складские запасы, транспортировку, хранение и логистику.

Сущность аддитивных технологий заключается в послойном синтезе или «выращивании» изделия по цифровой модели без формообразующей оснастки, создание предмета происходит путем добавления материала в отличие от традиционных технологий, основанных на удалении его излишков [1, 2]. В настоящее время реализуется новая парадигма дизайна, в том числе и молекулярного, «снизу-вверх» взамен или в дополнение развивающейся веками парадигме «сверху-вниз» [3, 4]. Авангардные технологии, помимо новых аппаратных и программных средств, оборудования и оснащения, основываются на послойном выращивании поверхностей изделий и самоорганизации структур композиционного материала [5]. Так, определяя фундамент передовых нанотехнологий, Ж.И.Алферов выделяет кроме зондовой микроскопии, эпитаксиальный рост пленок на поверхности и процессы самосборки гетероструктур материала [6].

При «непосредственном осаждении слоя» по технологиям DD (Direct Deposition), наиболее чувствительным фактором является расстояние до формируемой поверхности, а его изменение важно для стабилизации толщины при «предварительном формировании слоя» материала по технологиям BD (Bed Deposition) подразумевающим наличие некоторой платформы, на кото-

рой послойно создается материал и изделие [2, 3]. Выбор в аддитивной технологии источника энергии или подаваемого материала определяет не только технологическую среду процесса (дискретную или непрерывную), но и поверхностные явления, обеспечивающие самоорганизацию веществ.

Прямое выращивание изделий послойным синтезом материала возможно в различных агрегатных состояниях – твердом, жидком, газообразном и в разнообразных высокоэнергетических процессах [5] с объемной, множеством локализованных и единой сфокусированной зоной поглощения в зависимости от плотности мощности потоков энергии (табл.).

В процессе индукционной наплавки погружением детали в расплавленный металл объемная зона поглощения энергии распределена по всей наращиваемой поверхности. Толщина формируемого слоя определяется адгезией между расплавом и поверхностью изделия и описывается скоростью подъема детали, напряжением поверхностного натяжения и коэффициентом внутреннего трения. Максимальная толщина при обтекании расплавом ограничивается условиями потенциального течения и рассчитывается как толщина пограничного слоя, за пределами которого происходит срыв потока [5].

*Таблица*

**Высокоэнергетические процессы послойного синтеза изделий**

Процессы разделения и формирования слоев	Агрегатное состояние наносимого материала	Зоны поглощения и плотность потоков энергии, Вт/см <sup>2</sup>	Толщина разделяемого и формируемого слоя, мм
Индукционный нагрев с припеканием и наплавка погружением	твердое (порошок), жидкое (расплав)	объемная, 10 <sup>2</sup> ...10 <sup>4</sup>	0,3...3,0
Плазменная резка, напыление и наплавка	твердое (порошок)	объемная, 5×10 <sup>2</sup> ...10 <sup>5</sup>	0,1...10
Электроэрозионная обработка и электромагнитная наплавка	твердое (порошок)	множество локализованных, 10 <sup>3</sup> ...10 <sup>5</sup>	0,05...0,5
Электроннолучевая резка, оплавление и поверхностное модифицирование	жидкое (расплав)	единая сфокусированная, 10 <sup>3</sup> ...10 <sup>6</sup>	1,0...10 (при термoeлектрической конвекции 0,01...1,0)
Лазерная резка, оплавление и легирование	жидкое (расплав)	единая сфокусированная, 5×10 <sup>3</sup> ...10 <sup>7</sup>	1,0...10 (при термoeлектрической конвекции 0,01...1,0)
Ионная имплантация и осаждение	газообразное	множество локализованных, 10 <sup>3</sup> ...10 <sup>5</sup>	0,002...0,2

Аддитивные технологии (AF – Additive Manufacturing), являются технологиями послойного синтеза, обеспечивающими практически безотходное энергоэффективное производство изделий из металлических, полимерных и композитных материалов. С момента появления в середине 80-х годов стереолитографии и технологии послойного наплавления техника аддитивного производства непрерывно совершенствовалась. По данным Wohlers Associates, современный мировой рынок аддитивных технологий с 2010-го по 2015-й увеличился ежегодно на 25-30%, превысив в 2015 году 3 млрд. долларов (40% — оборудование и материалы, 60% — оказание сервисных услуг).

Широко используемые в мировом производстве технологии послойного синтеза (представленные в хронологическом порядке) позволяют анализировать состояние и перспективы развития методов прямого «выращивания» изделий.

Стереолитография. Впервые процесс стереолитографии предложен Чарлзом Хеллом (Charles Hall) в 1984г. Технологические установки начали производиться с 1988г. В настоящее время установки по стереолитографии производятся компанией 3D Systems Inc, USA. Процесс основан на поглощении фоточувствительным полимером лазерного излучения конкретной длины волны, в результате чего происходит радикальная полимеризация (т.е. отверждение полимера). Физико-механические свойства полимера ограничивают область применения стереолитографии. Чаще всего этот процесс используют в макетном проектировании, в технологии литья по выплавляемым моделям в качестве мастер-форм, эталон-моделей, он также хорошо подходит для сборочного конструирования сложных моделей, при этом допустимо нанесение слоя резины или металла на модель.

Послойное формирование из листового материала. Послойное формирование изделий было предложено Майклом Фейгеном (Michael Feygin) в 1985г. Промышленные технологические установки LOM 1015, LOM 2030 и др. выпускаются фирмой Helisys, Кроме Helisys есть и другие производители установок: Paradigm, Sparx AB (HotPlot). При изготовлении изделий используется листовый материал, который раскраивается по заданному контуру лазерным или другим излучением, а затем скрепляется в стопке путем склеивания или пайки (сварки). Толщина листов зависит от материала и изменяется в интервале от 50 до 500 мкм. В настоящее время используются

следующие материалы: пластики, керамика, композиты. Метод может применяться для: макетного проектирования; литья по выплавляемым моделям; литья в песчаные формы; для получения гипсовых отливок; создания кремнеорганических форм; в кокильном или одноразовом литье.

Селективное лазерное спекание. Процесс лазерного спекания впервые предложен Карлом Декартом (Carl Deckard) в 1986г. Технологическое оборудование производится фирмой DTM Corp. (установки марки Sinterstation 2000 и 2500). Сущность SLS-процесса заключается в том, что порошковые материалы послойно спекаются лазерным излучением. Для этого нужны мелкодисперсные, термопластичные порошки с хорошей вязкостью и быстро затвердевающие, например: полимеры, воск, нейлон, керамика, металлические порошки. Корпорация DTM производит установки с различным числом используемых материалов: литейный воск, нейлон, поликарбонат. Развитие SLS-технологии идет по пути внедрения новых порошковых материалов, а для металлических композиционных порошков - повышения мощности лазерного излучения.

Послойное уплотнение. Метод послойного уплотнения разработан фирмой Cubital Inc. (Israel) в 1987 г. Выпускается технологическое оборудование Solider 4600 и 5600, в котором используются фоточувствительные к УФ-излучению полимеры. Процесс подобен фотокопированию. В результате использования фотографической маски все лишнее счищается и остается наэлектризованный порошок, отвечающий данному сечению синтезируемой модели. После того, как расплавленный воск скрепит наэлектризованный порошок, слой считается изготовленным. Аэродинамический уровень счищает излишки порошка, и материал может быть использован повторно, если не был облучен УФ-излучением.

Создание литьевой формы. Непосредственное создание литьевой формы было предложено Эмануилом Сайчем (Emanuel Sachs) из Массачусетского технологического института (MIT) в 1989г. Фирмой Soligen для этой технологии производится технологическое оборудование. DSPC-процесс состоит из распределения и уплотнения слоев порошка и послойного его связывания расплавом из нагреваемой принтерной головки, сканирующей по поверхности. Несвязанный порошок вокруг модели поддерживает и предохраняет ее от разрушения. По окончании процесса он удаляется. Созданные оболочки могут быть использованы в качестве литьевых

форм. Формы могут сразу включать литниковую систему для заливки расплава металла.

Экструдерная заливка расплава. Послойная заливка экструдруемым расплавом была предложена Скоттом Крапом (Scott Crump). Компания Stratasys выпускает установки с 1991г. Процесс включает: предварительный подогрев материала, а затем – заливку расплавом. Расходный материал поступает в катушках, диаметр нити – 0,127 см (его стоимость от 150 до 300 дол. США). Основной частью установки является головка, через которую подается материал. Там он предварительно подогревается до температуры плавления, дозированно подается в рабочую зону и скрепляется с предыдущим слоем. В качестве материалов чаще всего используются пластики, а толщина формируемых слоев – 50 – 750 мкм.

По результатам рассмотрения наиболее используемых методов прямого «выращивания» изделий, можно проанализировать перспективы по областям потребления продуктов, изготовленных на 3D-принтерах, и оценить состояние разработок и освоения производства оборудования, средств контрольного и программного оснащения, расходных материалов для 3D-печати в частности в Республике Беларусь.

«Бюджетные» 3D-принтеры для бытового, учебного, игрового и другого применения, чаще всего используют наиболее широко распространенную технологию FDM. Институт химии новых материалов освоил для них производство расходных полимерных материалов с необходимым комплексом свойств (состояние поставки – нить нужного диаметра на катушке, устанавливаемой в принтер). ИХНМ использует нити у себя, а также поставляет по договорам для импортных принтеров, эксплуатируемых в республике. В Институте механики металлополимерных систем им. В.А. Белого имеется большой опыт по созданию композиционных порошковых материалов на полимерной основе и изделий широкой номенклатуры из них. Сами принтеры в наиболее простой комплектации, как по механике, так и по электронному и программному оснащению (собственной разработки) готовы освоить в Институте тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова. Производство малых серий принтеров в закрытых корпусах (обеспечивающих экологичность, путем использования фильтров для выделяющихся газов), для оснащения учебного процесса вузов и школ планируют в БНТУ.

Порошковые технологии 3D печати – детали и их заготовки из композиционных материалов

в машиностроении (для потребностей авиации, космонавтики, медицины и другого) производят по технологиям, относящимся к SLS. Ввиду огромного разнообразия изделий и высоких требований к ним, создано и разрабатывается множество порошковых материалов (металлических, керамических, композиционных и других), а также технологий (зачастую комплексных) для синтеза деталей и заготовок из них. Институт порошковой металлургии (ИПМ) десять лет назад создал такую установку, для синтеза изделий медицинского назначения из порошковых металлических материалов с регулируемой пористостью, совместно с Институтом физики (лазеры) и Объединенным институтом проблем информатики (программное обеспечение). В настоящее время ИПМ участвует в крупном международном проекте по созданию порошков для селективного лазерного спекания. Работы по созданию устройств дозирования и подачи композиции порошков в принтерах ведутся на машиностроительном факультете БНТУ.

Изделия из строительных материалов (быстротвердеющих высокопрочных гипса, цемента, керамики и других, в том числе в композициях с песком) по технологии DSPC в республике пока не производятся, ввиду отсутствия оборудования и расходных материалов (в которых используются уникальные связующие). Однако работы по измельчению и активации песка и цемента, металлургических шлаков и других строительных материалов в ГНПО «Центр» ведутся при участии специалистов строительного факультета БНТУ. Механика оборудования может быть воспроизведена нашими предприятиями, но пока главный вопрос в физико-химии связующих, обеспечивающих расходным материалам уникальные свойства.

Задача создания изделия с заданным пространственным распределением физико-химических параметров по объему может быть решена выбором применяемых материалов, их структуры, характеристик технологического процесса и рабочей среды, а также созданием оптимальной математической модели температурного поля в процессе формирования слоев при воздействии движущегося локального источника тепла (экструдера с прямым или косвенным нагревом или лазерного излучения). Анализируя основные тенденции аддитивных технологий для создания изделий из ПКМ, можно утверждать, что их применение позволяет в полной мере реализовать принципы создания материалов нового поколения.

В Республике Беларусь сделаны первые шаги по освоению аддитивных технологий, выражающиеся в создании прототипов 3D принтеров, в первую очередь на базе термополимерных материалов, предложении самих расходных материалов, подготовке образовательных курсов и создании соответствующих кафедр в университетах. Проведен ряд семинаров по популяризации аддитивных технологий. Определены задачи исследований в области мехатроники и точной механики, аддитивного материаловедения. Намечены шаги по развитию технологий 3D печати для промышленных приложений. Назрела необходимость формирования научных и научно-технических программ, объединяющих усилия приборостроителей, материаловедов и IT-специалистов для интенсификации разработок и освоения в производстве аддитивных технологий.

Таким образом, проводится параллель между нано- и аддитивными технологиями. Перенос

аддитивных технологий на микроуровне может рассматриваться как переходной этап к нанотехнологиям «снизу-вверх» путем манипулирования соответствующими нано- и микрообъемами материалов. Реализация данных технологий с переходом на микроуровень возможна с использованием оборудования сканирующей зондовой микроскопии, в том числе в режиме многозондовых моделей. Актуально рассмотрение задач исследования элементарных процессов в 3D печати, изучение свойств материалов сформированных с помощью аддитивных технологий, а также отличительных особенностей при реализации элементарных процедур аддитивного производства на микроуровне. Важно создание специализированного оборудования и методик для отработки режимов 3D микропечати для формирования сенсоров различной функциональности и других объектов микроэлектромеханики (МЭМС).

#### *Литература*

- 1 Чижик, С.А. Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий / С.А.Чижик, М.Л.Хейфец, С.А.Филатов // Механика машин, механизмов и материалов, 2014, №4(29). - С.68-74.
- 2 Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А.Зленко, А.А.Попович, И.Н. Мутьлина. – СПб: Изд. СПбГУ, 2013. – 221с.
- 3 Логачева, А.И. Аддитивные технологии производства ответственных изделий из металлов и сплавов (обзор) / А.И.Логачева, Ж.А.Сентюрина, И.А.Логачев // Перспективные материалы, 2015, №5. - С.5-15.
- 4 Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / Под общ. ред. П.А. Витязя и К.А. Солнцева / П.А.Витязь, А.Ф.Ильющенко, М.Л. Хейфец, С.А.Чижик и др.– Минск: Беларуская навука, 2011.- 283 с.
- 5 Хейфец, М.Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей / М.Л. Хейфец.- Новополоцк: ПГУ, 2001.- 156 с.
- 6 Головин, Ю.И. Введение в нанотехнологию / Ю.И. Головин.– М.: Машиностроение, 2003. – 112 с.