

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

П. А. ВИТЯЗЬ, С. А. ЧИЖИК, М. Л. ХЕЙФЕЦ

*Президиум НАН Беларуси, Отделение физико-технических наук,
Беларусь*

Проведенный анализ современного состояния и перспектив развития аддитивных и нанотехнологий компьютеризированного производства позволяет прогнозировать новую парадигму его эволюции – «Индустрия 4.0». Показано, что в настоящее время формируется и детализируется концепция «цифровой фабрики», в которой аддитивные и нанотехнологии являются определяющим звеном системы, включающим подсистемы: 3D-проектирования и управления производством и потреблением, начиная от моделирования изделия, его материалов и компонентов в соответствии с новыми технологическими возможностями и заканчивая получением и эксплуатацией функционально ориентированного кастомизированного изделия.

В настоящее время зарождается новая эпоха производства – массовая кастомизация, характеризующаяся тем, что потребитель выступает в качестве дизайнера и инженера. Теперь по запросам потребителя можно непосредственно контролировать и управлять, а также изменять производственный процесс. Повышению эффективности производственной деятельности служит создание комплексов технологических, транспортных, энергетических и информационных машин на основе новых аддитивных технологий, нанотехнологий и повышения производительности уже используемых.

Поэтому при системном анализе роста эффективности технологических комплексов необходимо рассчитывать не только удельную технологическую трудоемкость (себестоимость), приходящуюся на одно изделие, но и затраты по всему жизненному циклу изделия, особенно связанные с его кастомизированным маркетингом, проектированием, эксплуатацией, утилизацией и сокращением всевозможных логистических затрат, связанных с многочисленными поставками.

Производство и адресная поставка кастомизированного изделия, с учетом внешней и внутренней логистики предприятия (в том числе и вир-

туального), могут быть дополнены прогнозом на будущее, которое часто связывается с новой парадигмой *интеллектуального* производства, называемой «*Индустрия 4.0*». Данный термин предложен немецкими компаниями на Ганноверской выставке технологий в 2011 г. для обозначения начала «эпохи четвертой индустриальной революции», связанной с промышленным интернетом вещей (*IioT – Industrial Internet of Things*).

Передовые производственные технологии, помимо используемых новых аппаратных и программных средств, оборудования и оснащения, основываются на *последовательном выращивании поверхностей* изделий и *самоорганизации структур* композиционного материала. Так, определяя фундамент наукоемких нанотехнологий, Ж.И. Алферов выделяет кроме зондовой микроскопии *эпитаксиальный рост пленок на поверхности* и процессы *самосборки гетероструктур* материала.

Современные аддитивные технологии реализуют провозглашенную в 1959 г. Р. Фейнманом новую парадигму производства «*снизу-вверх*» взамен или в дополнение развивающейся веками парадигме «*сверху-вниз*». Сущность аддитивного производства заключается в последовательном синтезе или «выращивании» изделий по «цифровым моделям» без использования формообразующей оснастки. Создание формы изделия происходит путем добавления материала, в отличие от традиционных технологий, основанных на удалении «лишнего» материала.

Аддитивные технологии обеспечивают новые возможности дизайнера. Создавая легкие ажурные каркасы и несущие конструкции, можно усиливать только опорные и контактные поверхности. На поверхностях в свою очередь последовательно формировать функциональные покрытия. Различают две основные группы аддитивных методов:

Методы «предварительного формирования слоя» материала по технологиям *BD (Bed Deposition)*, подразумевающим *наличие определенной платформы*, на которой последовательно «выращивается» материал и изделие.

Методы «непосредственного осаждения слоя» материала на *сложно-профильную поверхность* изделия по технологиям *DD (Direct Deposition)*, которые имеют традиционно глубокие корни в технологиях упрочнения и восстановления деталей машин.

В настоящее время методы аддитивного производства классифицируются по стандарту ISO/ASTM 52900-15:

1. *Vat Photopolymerization* – фотополимеризация в емкости.
2. *Material Jetting* – разбрызгивание материала или струйные технологии.
3. *Material Extrusion* – выдавливание или экструзия материала;

4. *Powder Bed Fusion* – плавление материала **в заранее сформированном слое;**

5. *Binder Jetting* – разбрызгивание связующего вещества;

6. *Sheet Lamination* – соединение листовых материалов;

7. *Directed Energy Deposition* – прямой подвод энергии **непосредственно в место построения.**

Классификации по принципам получения изделий без формообразующей оснастки отвечают, согласно представленной последовательности (1-7), созданные уже более 30 лет назад «традиционные» методы, соответственно:

1. *Stereolithography Application (SLA)* – стереолитография;

2. *Solid Ground Curing (SGC)* – послойное уплотнение материала;

3. *Fused Deposition Modeling (FDM)* – послойное экструдирование расплава;

4. *Selective Laser Sintering (SLS)* – селективное лазерное спекание;

5. *Direct Shell Part Creation (DSPC)* – прямое создание литейных форм;

6. *Laminated Object Manufacturing (LOM)* – послойное ламинирование из листового материала;

7. Методы, использующие *концентрированные потоки энергии (КПЭ)*; и другие сегодня не столь распространенные в производстве.

На сегодняшний день не часто используются установки для реализации старейшего метода стереолитографии (1), а широкое применение, в том числе и в быту, нашли экструдерные установки (3). Применимы, чаще всего в масштабном производстве, дорогостоящие установки селективного лазерного спекания (4) разнообразных порошковых материалов.

Послойное ламинирование (6), с малыми затратами может быть реализовано при использовании недорогого раскройного оборудования для различных листовых материалов. Актуальны также аддитивные технологии, использующие концентрированные потоки энергии (7), в основном лазерные технологии. Особой перспективой среди этих технологий обладают ионные и электронно-лучевые методы обработки, реализуемые в вакууме.

Технологии прямого создания литейных форм (5), в том числе и при использовании послойного уплотнения материала (2), использующие вяжущие, быстротвердеющие вещества (строительные материалы), пока не нашли должного применения, хотя уже сегодня могут быть востребованы промышленностью и строительством.

Широко используемые в мировой практике и новые проектируемые технологии послойного синтеза позволили предположить, что наиболее перспективно применение аддитивных технологий создания слоев и формообразования изделий, использующих различные сочетания материалов и источников энергии. Это в свою очередь ставит задачи распределения компонентов материалов и потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру подачи энергии или материала и изменению его свойств, определяемому тепло-, электрофизическими и другими критериями.

В результате, при проектировании технологии аддитивного синтеза применяются как методы формообразования деталей из композиционных материалов, использующие потоки энергии и компонентов материала, так и методы автоматизации и управления процессами оперативного макетирования и производства, как отдельных слоев, так и изделия в целом.

Таким образом, анализ современного состояния и перспективы развития аддитивных и нанотехнологий компьютеризированного производства позволяет говорить о новой парадигме в его эволюции – «Индустрии 4.0», в ходе которой формируется и детализируется концепция «цифровой фабрики», включающей: 3D-проектирования и управления производством и потреблением, начиная от моделирования и заканчивая эксплуатацией функционально ориентированного кастомизированного изделия.