

Аддитивное производство – растущая отрасль мировой промышленности

В обзоре описано получение металлических отливок с помощью 3D-технологий. Отмечен ряд новых способов 3D-обработки материалов, относящихся к аддитивным процессам и олицетворяющим следующий шаг к ресурсосберегающему экологическому производству. Показаны примеры моделей и отливок сложной конструкции с оптимальным сочетанием металлоемкости, прочности и привлекательного внешнего вида. Описанные высокотехнологичные 3D-процессы расширяют существующий спектр металлопродукции и возможности ее производства.

Ключевые слова: 3D-технология, снижения металлоёмкости, аддитивное производство, 3D-принтер, конструирование отливок, компьютерное моделирование, литьё по газифицируемым моделям

Традиционное производство деталей, по сути, близко к ваянию скульптуры по камню. «В твёрдый горный камень воображение художника вкладывает живую фигуру, которую он извлекает оттуда, удаляя излишки камня», – объяснял Микеланджело. Напротив, аддитивное производство (АП) наращивает – печатает изделие слой за слоем. Этот процесс управляется компьютером, ориентируясь на точную 3D-модель. У метода есть несколько сильных сторон. Во-первых, сокращаются расходы материала (в зависимости от детали экономия может достигать 75 %). Во-вторых, появляется возможность создавать более сложные изделия (например, с различными полостями). В-третьих, можно выпускать детали, не нуждающиеся в дополнительной обработке.

Как отметил генеральный директор ВИАМ, академик РАН Е. Н. Каблов на конференции «Аддитивные технологии в промышленности» (10.02.2015), на сегодняшний день во всех развитых странах происходит «бум» АП, мировой рынок этих технологий в 2010-2014 гг. прирастал в среднем на 27,4 %, и его объём достиг \$3 млрд [1]. По его словам, лидерами в области АП являются США, Германия и Китай. Кроме того, в 22 странах уже созданы национальные ассоциации по АП, объединённые в альянс GARPA. Например, корпорация «Боинг» благодаря 3D-печати изготавливает более 22 тысяч деталей 300 наименований для 10 марок коммерческих и военных самолетов.

Взаимозаменяемые термины АП и 3D-печать всё чаще встречаются в информационных сообщениях. Как отмечается в докладе [2], многие организации по всему миру, в том числе национальные правительства, вкладывают значительные средства в развитие и распространение этой технологии. Всё возрастающее число новых компаний и предприятий разрабатывают продукты и услуги для промышленного использования АП невиданными ранее способами. Новые машины и материалы для 3D-печати становятся доступными в стремительном темпе, а новые приложения, например, начиная со «старого» процесса прототипирования, развиваются до АП, как

производства будущего. Кажется, если принтеры освоили плоскость, то легко освоят и объём.

Множество организаций по всему миру ищут способы, как приобщиться к этой быстро растущей и захватывающей отрасли промышленности, нередко кооперируя затраты, если те превышают их финансовые возможности. Например, в прошлом году было объявлено, что \$259 млн будет потрачено на создание Института инновационного производства перспективных композитов с ориентацией на АП в составе проекта государственно-частного партнерства по развитию Восточного Теннесси (США). Департамент энергетики выделил \$70 млн, а остальная часть поступает из консорциума 122 компаний и университетов [2]. В 2015 г. Компания Alcoa объявила, что потратит \$60 млн на расширение R&D центра для разработки методов и материалов АП, затем штат Нью-Йорк заявил, что инвестирует \$125 млн в типографию 3D, которая будет функционировать в качестве государственно-частного партнерства с Norsk Titanium из Норвегии.

В начале 2016 г. компания Stryker объявила о затратах \$400 млн на организацию АП титановых ортопедических имплантатов, затем Siemens – об инвестировании €21,4 млн на создание центра 3D-печати из металла в Швеции. А в Великобритании разработчик MetalYSIS получил \$28,4 млн на коммерциализацию порошков металлов (титан, тантал и сплавы под заказ) для 3D-печати. В начале 2016 г. GE открыла R&D центр АП (11613 м², \$32 млн) в Питтсбурге (Пенсильвания), как испытательный полигон для многих производств GE. В 2015 г. GE Aviation объявила о начале АП топливного сопла на двигатель LEAP с началом его эксплуатации в этом году. Национальный Институт инноваций АП, известный также как America Makes и объединяющий 163 организаций США, уже затратил \$87 млн на государственно-частное партнерство по развитию АП с 150 партнерами. А в марте он расширил финансирование на \$10 млн. В 2015 г. 62 компании выпускали системы АП промышленного класса (по цене ≥ \$5000) и продали 12558 таких машин [2].

Среди ряда достижений: Ricoh в партнерстве с Aspect (Япония) разрабатывает машину AM S5500P лазерного спекания (LS) по цене ~ \$658000 с размерами продукции 550×550×500 мм. В этом году Sintratec (Швейцария), выпустит свою S1 LS-машину с размерами выпускаемых деталей 150×150×200 мм и ориентировочной ценой €9000. Sinterit (Польша) представляет свою машину Лиза LS, сходную по размеру продукта с Sintratec и по цене €7000. В то же время Sentrol (Южная Корея) запускает большую машину по цене ~\$300000 для производства деталей из пластика, металла и песка (для литейных форм и стержней).

Additive Industries (Нидерланды) представила машину MetalFAB1 с объемом сборки 420×420×400 мм. Система может быть сконфигурирована с 11 модулями и имеет две камеры сборки, базовая цена продукта составляет €1,1 млн. Massivit3D из Израиля предлагает систему для производства деталей с габаритами 1,2×1,5×1,8 м. Из-за невысокого разрешения система рекомендуется для макетирования крупных скульптур и мебели.

Среди быстрых машин компания Carima (Южная Корея) анонсировала технологию 3D-печати непрерывной добавкой (C-CAT), способ, альтернативный фотополимерному. Она строит со скоростью до 60 см в час в вертикальном направлении. Это в четыре раза быстрее, чем скорость сборки процесса CLIP Carbon (США). Среди разработчиков быстрых фотополимерных машин – NewPro3D (Канада), Nexa3D (Италия) и Gizmo из Австралии.

Три известных компании готовят выпуск новых машин. До конца 2016 г. от HP ожидается пилотный продукт, основанный на технологии Мульти Jet Fusion. Термопластичные детали напоминают полученные способом LS, но производятся на порядок быстрее. Также в планах многоцветный вариант и материалы со специальными физическими свойствами (электропроводность и др.). Canon планирует коммерциализировать машину АП к 2017 году, но не раскрывает её технологии. Предполагается использовать полиамид, полипропилен и другие термопластичные материалы. Mattel выпустит свой новый ThingMaker, на основе экструзии материала в 2016 г., продукт по цене \$299 для производства детских игрушек. Насчитывается 34 компании, предлагающие металлы для 3D-печати, а также 23 компании предлагают полимеры для промышленных систем АП [2].

Использование АП для изготовления моделей (в т. ч. выплавляемых) и прототипов деталей хорошо известно, промышленность за 28 лет с появления АП освоила технологию и производственный процесс для этих важных приложений. Следующий этап – использование АП для создания финальных деталей промышленного качества, и это именно то, на что обращено главное внимание и во что вложены недавние инвестиции. Nano Dimension (Израиль) производит 3D-принтер для изготовления печатных плат (PCB). Машина и образцы плат экспонировались на выставке SolidWorks World в январе 2016 г. в Далласе (Техас). Печатающая головка машины наносит по струйной технологии в двух режимах фотополимер в качестве основного материала и наночастицы серебра для токопроводящих следов толщиной 2 мкм. За 75 мин печатается плата в размере 38×38 мм.

В начале прошлого года отчёты показали, что в Шанхае на основе WinSun планируется 3D-печать многоэтажных зданий. Статьи по печати целых домов были опубликованы в прошлом, хотя чаще всего были напечатаны секции стены и они были выполнены за пределами площадки, а затем собирались на месте строительства здания.

С начала 2000-х годов моделирование методом наплавки (FDM) было самым популярным процессом печати АП или 3D во всем мире. В 1991 г. Stratasys продал первые машины, а в 2006 г. – 1723 машин – 54,7 % всех систем АП. По истечении срока ключевых патентов FDM с 2007 г. выпуск таких машин различными компаниями начал набирать обороты до продажи 12558 машин в 2015 г. Около 1000 производителей FDM машин могут работать только в Китае [2].

Сегодня 3D-печать и 3D-сканирование активно входят в производство и нашу жизнь и скоро станут незаменимыми инструментами во многих сферах деятельности. Психологическим или образовательным препятствиям для распространения АП становится потребность изменить стереотипы мышления дизайнеров, проектирующих конструкции в любой сфере деятельности.

В отечественном литейном производстве 3D-технологии прежде всего используют для литья по газифицируемым моделям (ЛГМ, Lost Foam Casting) при изготовлении пенопластовых моделей на 3D-фрезерах по компьютерным программам [3] (рис. 1). Также для литья предложено моделирование

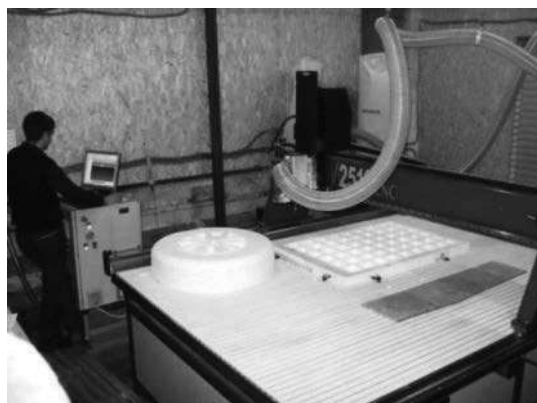


Рис. 1. Примеры изготовления моделей для ЛГМ на 3D-фрезерах

строения простейших кристаллических решёток с использованием объёмных сборных структур с повторяющимися унифицированными элементами, пенопластовые модели которых можно изготовить на пластавтоматах либо на 3D-фрезерах [4].

Ряд зарубежных фирм предлагает 3D-печата́ние песчаных форм и стержней без какой-либо формообразующей оснастки непосредственно из принтера. От цифрового файла металлических деталей, например, полученного по электронной почте, в течение семи часов можно получить готовую отливку [5]. 3D-принтеры могут изготовить, в частности, воскоподобные модели быстрее, чем многие другие процессы, например, модель ротора в течение нескольких часов. Кроме того, на том же принтере можно изготавливать литейные песчаные формы путём замены материалов и программы. Материалы формы мало чем отличаются от традиционных песчаных смесей. На рис. 2 показаны этапы технологического процесса: изображение детали на мониторе компьютера, отпечатанная на принтере песчаная форма и готовая отливка [5].

На рис. 3 представлен процесс изготовления песчаной формы. В «картридже» (с надписью – названи-

ем компании) подаётся песчаная смесь, послойно наносится на подложку на подвижном конвейере по всей горизонтальной плоскости формы и избирательно отверждается с помощью устройства на «картридже» [5], остатки сыпучей смеси осыпаются с отверждённой формы.

Примеры модельно-макетных изделий, выполненных аддитивным методом и показанных на прошедших в 2015 году литейных и машиностроительных выставках Formnext и Euromold, по информации из открытых источников Интернета, приведены на рис. 4.

Производство компании FIT West Corp. аддитивным методом детали cylinder head (для спортивной автомашины) весом 1,9 кг и полезной площадью 10223 см² позволило заменить такую литую деталь весом 5,1 кг и полезной площадью 823 см² (рис. 5) [6].

Сайты по литейному производству подробно описывают и иллюстрируют аддитивные технологии. В статье Роберта Брукса [7] описан устойчивый прогресс аддитивных методов, «бросающих вызов» традиционным способам конструирования и изготовления деталей литейным процессом. Одна из причин этого: широкая доступность метода АП сделала возможным для десятков научно-технических центров

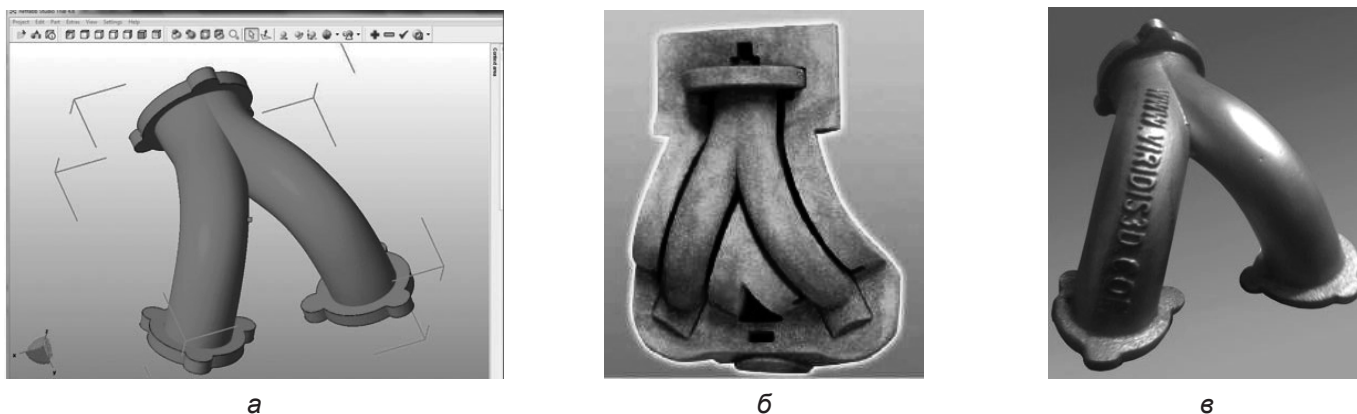


Рис. 2. Технологический маршрут от файла детали на мониторе компьютера (а), до отпечатанной на принтере песчаной формы (б) и готовой отливки (в) [5]

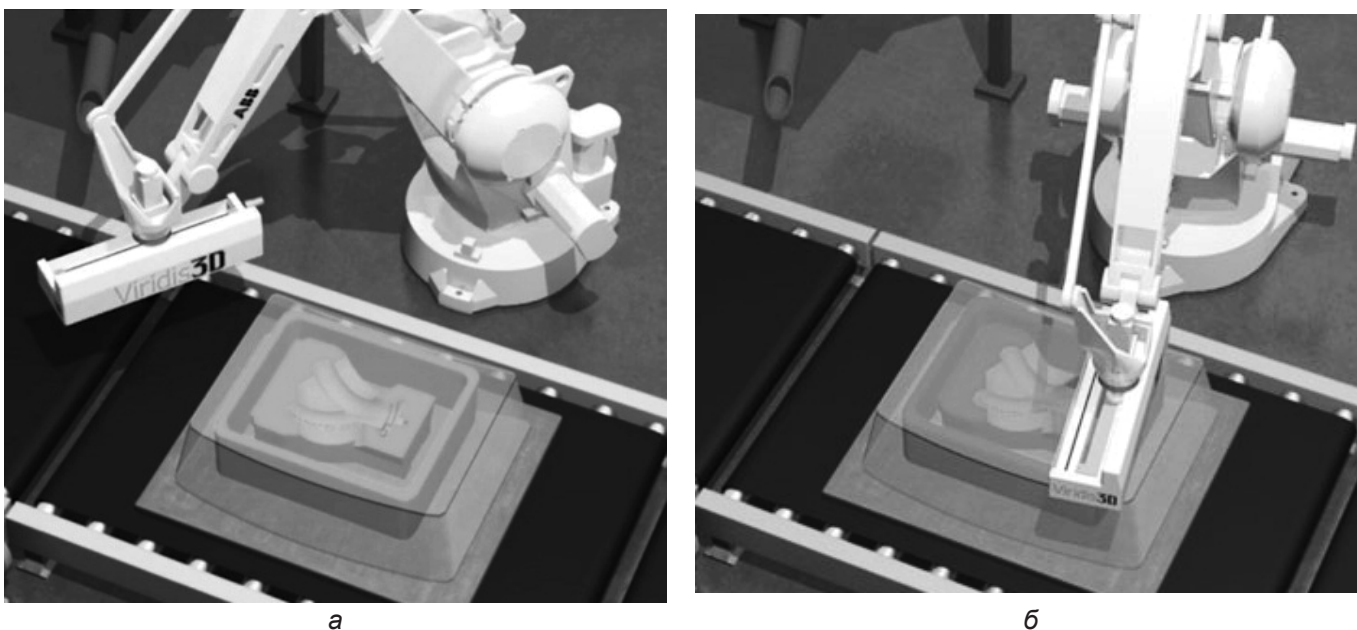


Рис. 3. Две позиции манипулятора в процессе печатания песчаной формы [5]

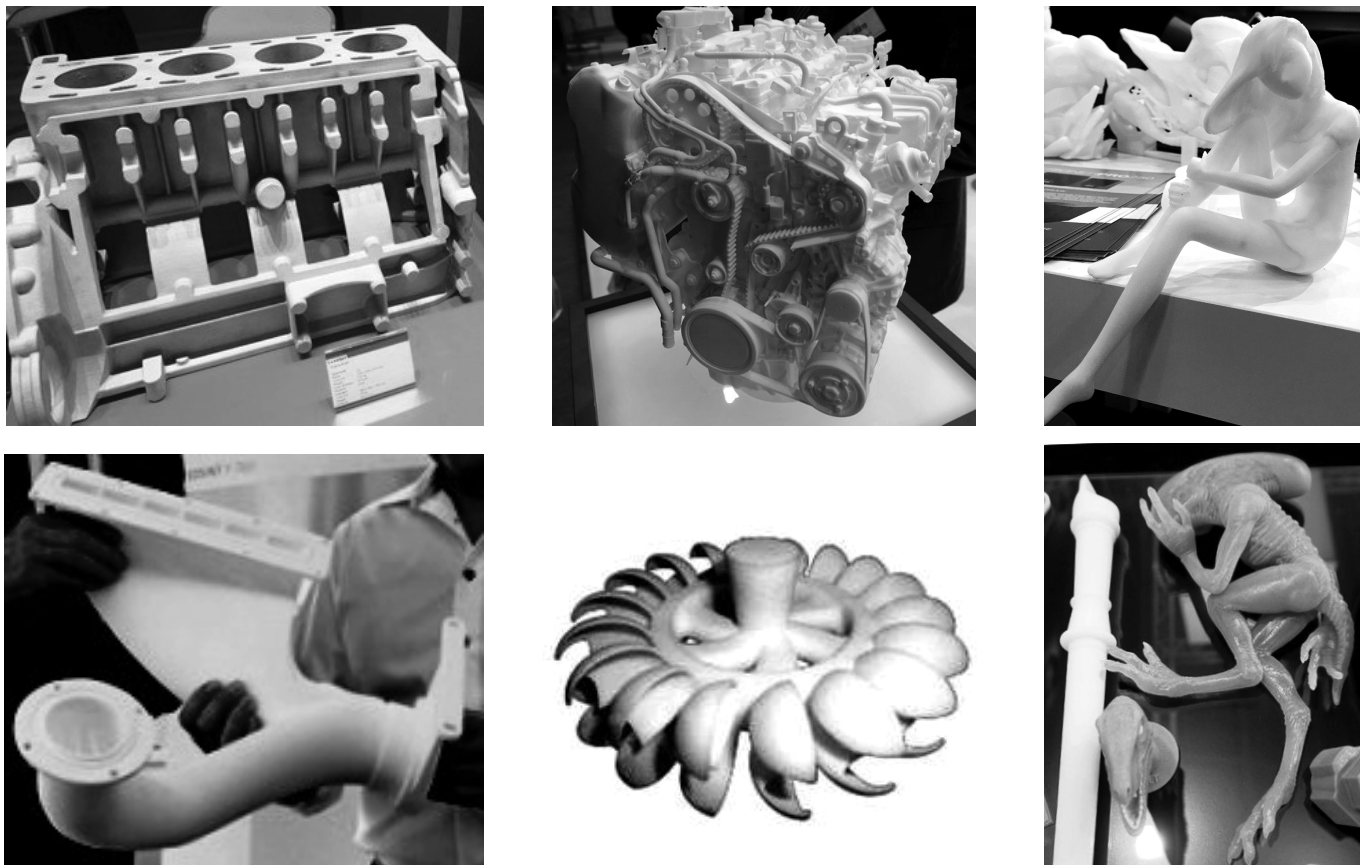


Рис. 4. Примеры модельно-макетных изделий АП

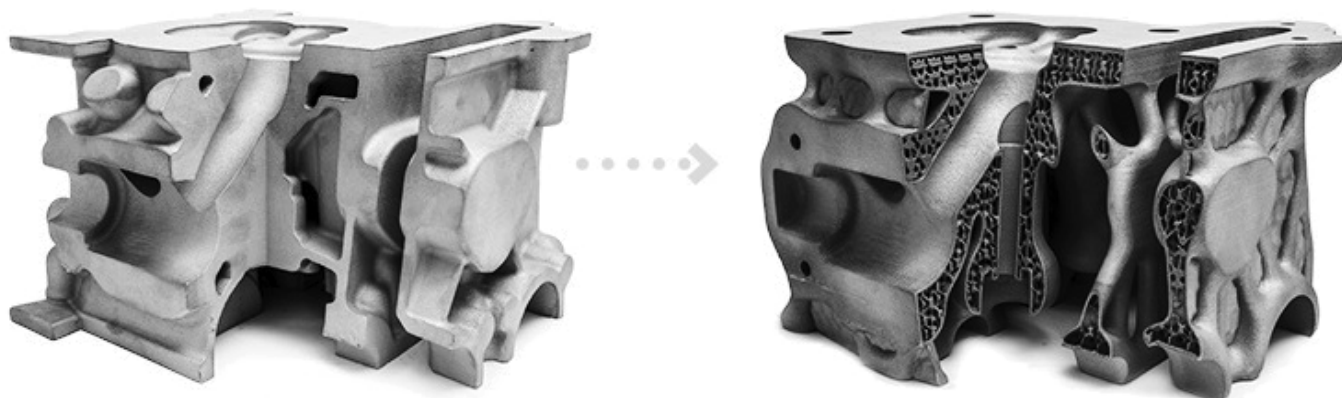


Рис. 5. Перевод литой детали для автоспорта на аддитивное производство [6]

целенаправленно заниматься исследованиями, решая конкретные проблемы и постепенно улучшая общие перспективы. 3D-печать является доступной для различных способов производства (лазерного спекания, стерео литографии и т.д.), которые передают информацию от CAD в структурной форме, ограничения определяются только физической природой изготавливаемой конструкции или применимостью выбранной системы производства.

Например, научно-исследовательский центр VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. и Nurmi Cylinders Oy разработали 3D-печатный гидравлический клапан, который, по их утверждению, является экономически эффективным для производства, надёжен в исполнении и на 66 % легче, чем оригинальная деталь. Для изготовления таких деталей обычно прибегают к сверлению. Клапан используется для

контроля жидкости в гидравлических цилиндрах систем управления движением тяжёлой техники, например, кранов (рис. 6 а) [7].

3D-печать позволила оптимизировать внутренние каналы для достижения наилучшего потока гидравлической жидкости, сохраняя её требуемый объём. И тогда это заменило выполнение сверлением требуемого объёма каналов с высоким потенциалом против утечки рабочей жидкости под высоким давлением. Блок гидравлического клапана является важной частью, хотя и небольшой. По результатам исследования VTT инициировал двухлетнее государственно-частное финансирование в размере \$3,5 млн для создания в Финляндии новых предприятий, использующих АП.

Компания Sciaky Inc. (Чикаго, США) быстро расширяет размерные возможности своего процесса

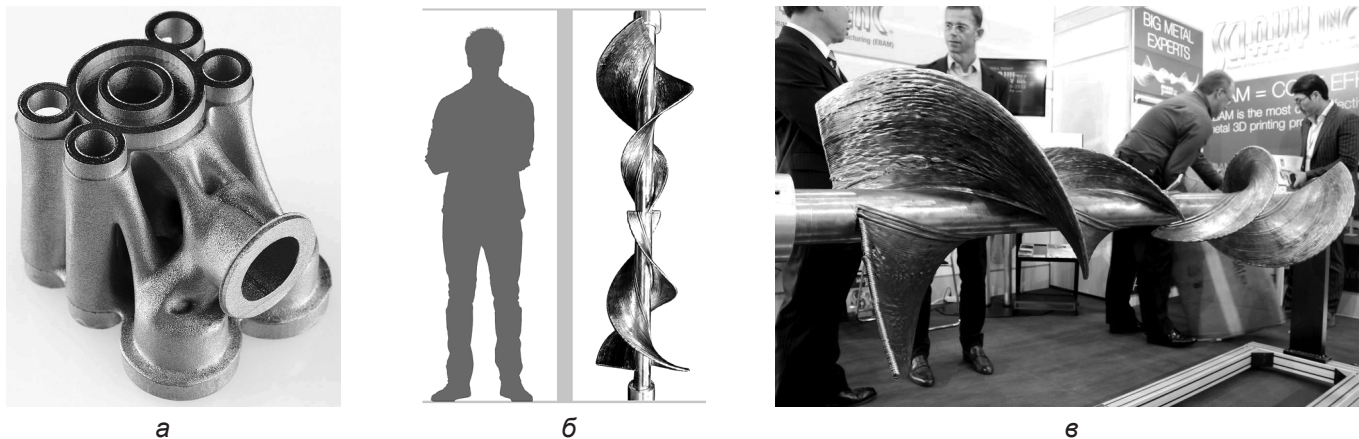


Рис. 6. Примеры АП с применением металла (описание фото в тексте)

«электронно-лучевого» АП (сокращённо – EBAM), который она называет «наиболее широкомасштабным» 3D-методом печати металлом с возможностью распространения на производство деталей с габаритами от 0,2 до 5,8 м. На рис. 6 (б, в) показано сравнение такой детали «шнек» с ростом человека, а также демонстрация её на выставке. Также сообщается, что EBAM является самым быстрым процессом осаждения металла из доступных со скоростью 3,18-9,07 кг/ч. Кроме того, установка 3D-печати имеет систему двойной подачи проволоки для объединения двух металлических сплавов. Титан, тантал, ниобий, вольфрам, молибден, алюминий, нержавеющая сталь, никелевые сплавы, и др. возможно поместить в одну ванну расплава, либо материалы могут по программе разделять вводить в разные части единой структуры [6].

Учёным-металлистом для 3D-печати не обязательно привлекать лазеры. NanoSteel Co. Inc., которая сосредоточена на АП с производством своих присадок на «нано-структурированных» содержащих сталь материалах, представила два порошковых сплава для струйного связывания. Это процесс АП, в котором материал осаждают в слоях (слой на слое), связанных друг с другом эпоксидным связующим, до момента, когда эти слои (в слоистом изделии) можно нагреть до сплавления, как единую структуру. Разработчик считает, что такой процесс АП обладает более высокой скоростью, чем лазерный метод спекания. Новые материалы NanoSteel (BLDRmetal™ J-10 и J-11) предложены как компоненты для печатания стойких к абразивному износу изделий, которые обладают преимуществом в варианте создания требу-

емых сложных конструкций без оснастки (рис. 7, а). Разработчиком рекомендовано, чтобы компоненты с использованием J-10 имели превышение по функции удлинения в два раза и по износу – в три раза, чем нержавеющая сталь марки 420 [7].

NanoSteel продемонстрировала материалы в проектах с 3DX Industries – поставщиком услуг АП – путём печатания безопасных инструментов для авиационной компании, которая удаляла панели самолётов. Инструменты, изготовленные с J-10, служили в пять раз дольше, чем в предыдущих версиях, значительно уменьшая риск задержек в обслуживании самолётов. По словам Р. Янссена, президента 3DX, решение NanoSteel позволило создать долговечные и надёжные инструменты, которые быстро поставляются заказчику по первому требованию [7].

Оба материала основаны на сочетании сложных металлических фаз, которые обеспечивают износостойкость и, при наличии стальной матрицы, пластичность и ударную вязкость. Материал марки J-11 предназначен для применения в условиях экстремального износа. Компоненты, образующиеся в J-11, повышают износостойкость в 10 раз по сравнению с изделиями из нержавеющей стали марки 420, соответственно разработчику. Порошки BLDRmetal имеют привлекательные альтернативы существующим материалам для процесса струйной печати. Они повышают возможности печати с помощью смешанных материалов со связующим, обеспечивая печать с присадками высокой сложности и более дешёвыми компонентами высокой износостойкости [7].

Ещё одним методом ухода от интенсивного источника энергии в виде сфокусированного лазерного

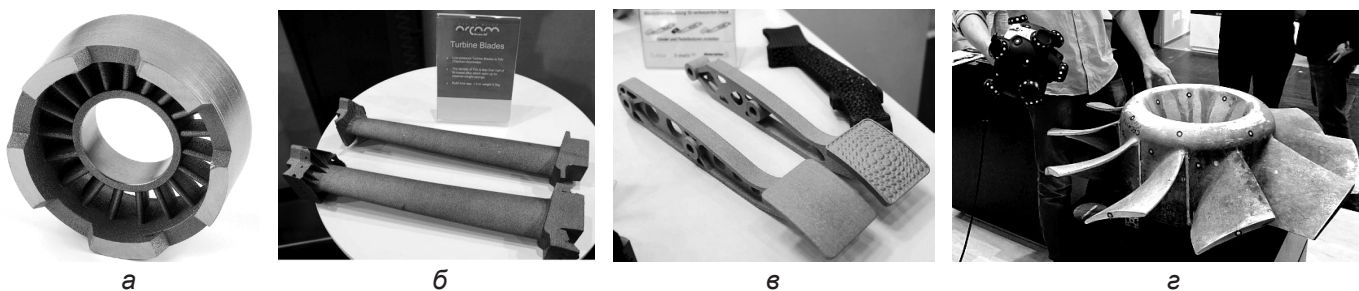


Рис. 7. Примеры 3D-технологии для производства металлических изделий: а – деталь бурового насоса для нефти и газа, полученная из материала BLDRmetal™ J-10 [7]; б – лопаток турбины; в – педаль; г – процесс 3D-сканирования поверхности отливки турбины (а – в взяты из репортажей о выставках Euromold-2015 и Formnext-2015)

(электронного) луча, который перемещается с потоком металлического порошка, определяя архитектуру объекта в одном слое путем сплавления частиц порошка, описан в статье [8]. Лучевые методы значительно ограничивают типы совместимых металлов и сплавов. Новый метод Northwestern Engineering исключает энергетическое действие луча при расплавлении порошка.

Создавая жидкотекучую композицию из металлического порошка или смешанных порошков металлов, растворителей и эластомерного связующего, исследователи стали печатать плотно упакованные порошковые структуры, используя простой процесс шприц-экструзии, в котором композиция распределяется через сопло при комнатной температуре. Экструдированный материал затвердевает мгновенно, сливаясь с предыдущим слоем, что позволяет получать крупные объекты, которые будут быстро созданы и немедленно обработаны. Затем слои переводят в монолитную конструкцию путём нагревания структуры в простой печи.

Хотя процесс стал двухстадийным (печать и спекание), но каждый шаг намного проще, чем комбинированная технология. Новый метод рекомендован для печати батарей, топливных элементов твёрдого оксида, медицинских имплантатов и механических деталей для крупных структур, таких как ракеты и самолёты. Для композиции с несвязанными металлическими порошками применяли эластичное полимерное связующее – биомедицинский полимер, который обычно используется в медицине для создания швов. Нагревание изделия из связанного порошка в печи, где все части конструкции уплотняются одновременно, приводит к равномерной структуре изделия.

В традиционных лазерных методах нагрев и охлаждение локализованы, что создаёт местные напряжения и приводит к нежелательным микроструктурам

с неоптимальными свойствами. Использование печи обеспечивает равномерную температуру, что приводит к структурам однородного состава без деформаций и трещин. Вместо медленного прохождения лазера на своём пути через толстый слой порошка может использоваться много экструзионных сопел одновременно. Потенциально возможно быстро выполнять 3D-печать листов с габаритами больше метра из различных структур с единственным ограничением по размеру печи.

Другим инновационным компонентом процесса является то, что его можно использовать для 3D-печати порошком оксида металла, например, оксидом железа (ржавчиной), который затем переводят в металл. Порошок оксида легковесный, более стабилен, дешёв и безопасен, по сравнению с работой с порошком железа. Учёные обнаружили, что могут выполнять 3D-печать структур из металлических оксидов, а затем использовать водород, чтобы превратить материал изделия, полученного экструзией, в соответствующий металл перед спеканием в печи.

Хотя добавление третьей стадии восстановления по переводу ржавчины в железо как будто усложняет процесс, но это открывает возможности для использования дешёвых порошков оксидов в отличие от соответствующих дорогих металлических порошков. Трудно найти для такого процесса содержащие металл порошки дешевле, чем ржавчина, считают исследователи [8].

3D-металлоизделия, фотографии которых постоянно пополняют «галерею» Интернета, своей сложностью и совершенством буквально завораживают взгляд, отличаясь от всего, что традиционно получают литьём. На рис. 8 показаны 3D-металлоизделия, изображения которых одними из последних размещены в Интернете в открытом доступе. В нижнем ряду в центре показан автор этого обзора у 3D-принтера с



Рис. 8. Примеры 3D-изделий, в нижнем ряду в центре показан автор этого обзора у 3D-принтера



Рис. 9. Примеры использования 3D-технологии концерном BMW: а – деталь насоса; б, в – эргономичный инструмент (белого цвета) на руке работника

моделью коллектора из полимерного материала (на выставке «Металлообработка, инструмент, пластмасса», Киев, 29-31.03.2016). Последним справа показаны модель и отливка корпуса огнестрельного оружия, выполненные на 3D-принтере.

Современные предприятия, используя АП и считая их одним из ключевых видов производства будущего, часто указывают это в своих пресс-релизах для подтверждения инновационного уровня своего производства. Так, в ноябре 2015 г. концерн BMW отмечал 25-летие внедрения АТ на своём производстве [8]. Кроме изготовления эргономичных инструментов, деталей концептуальных, эксклюзивных или ретро-автомобилей, BMW с апреля 2015 г. оснастила свои гоночные автомобили DTM водяным насосом с рабочим колесом, изготовленным 3D-печатью (рис. 9, а). Все насосы работают безупречно, подтверждая ведущую роль BMW в использовании АП. Высокоточная деталь состоит из алюминиевого сплава, подвергается большим напряжениям и показала высокую надёжность в жёстких условиях автоспорта.

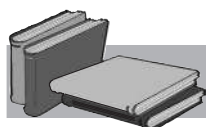
Кроме конструктивных деталей выпускаемой продукции, 3D-технологии применимы для производства индивидуального инструмента и оснастки. Так, в 2014 году BMW Group изготовила печатный эргономичный инструмент для конвейерной сборки, защищающий работников от избыточных напряжений на

суставах большого пальца при проведении определенных операций. Каждый из таких гибких монтажных устройств соответствует форме и размерам рук конкретного работника (рис. 9, б, в).

Центр Rapid Technologies BMW Group в области исследований и инноваций (FIZ) в Мюнхене обрабатывает около 25000 запросов по АП в год, производя до 100000 деталей в год для собственных заказчиков. В зависимости от функции и размера детали могут быть доступны в течение всего нескольких дней.

Таким образом, в продолжение цикла работ [3, 4, 9-11] о развитии 3D-технологий литейного производства и снижении металлоёмкости отливок выполнен краткий обзор ряда последних инноваций по этой теме. АП олицетворяет следующую промышленную революцию, ведущую к ресурсосберегающему экологическому производству.

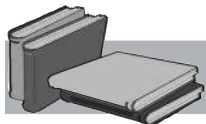
Показаны примеры моделей и отливок сложной конструкции с оптимальным сочетанием материалоемкости, прочности и привлекательного внешнего вида. Описанные высокотехнологичные 3D-процессы расширяют существующий спектр металлопродукции и возможность её изготовления, как правило, в условиях, значительно превышающих по экологической безопасности, трудоёмкости и длительности выполнения условия традиционного литейного цеха.



ЛИТЕРАТУРА

1. Новости ВИАМ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://viam.ru/news/2050> .
2. Wohlers T. Additive Manufacturing: The State of the Industry / T. Wohlers, T. Caffrey // *AdvancedManufacturing.org*. – 2016. – № 5. – P. 45-52.
3. Шинский И. О. 3D-технологии при литье по газифицируемым моделям / И. О. Шинский, В. С. Дорошенко. // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 4-5. – С. 30-33.
4. Дорошенко В. С. Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям / В. С. Дорошенко // *Литейное производство*. – 2008. – №9. – С. 28-32.
5. Shambley W. Prepare Your Technology Strategy for 3D Printing, Robotics, and the Cloud [Электронный ресурс] / W. Shambley // *Foundry Management & Technology* – Режим доступа: <http://foundrymag.com/simulationit/prepare-your-technology-strategy-3d-printing-robotics-and-cloud>.
6. Сайт компании FIT West Corp. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.netfabb.com/additivedesignandmanufacturing.php>.
7. Brooks R. Breaking Barriers in Shape, Space, Material to Achieve Finished Parts. [Электронный ресурс] / R. Brooks // *Foundry Management & Technology*. 13.10.2015. – Режим доступа: <http://foundrymag.com/materials/> .

8. Morris A. A New Way to Print 3-D Metals and Alloys. [Електронний ресурс] / A. Morris 11.01.2016. – Режим доступу: <http://www.mccormick.northwestern.edu/news/articles/2016/01/a-new-way-to-print-3-d-metals-and-alloys.html>.
9. 25 years of 3D printing at the BMW Group: Pioneers in Additive Manufacturing Methods. Press release BMW Group // Manufacturing Engineering, 2.12.2015 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.sme.org/MEMagazine/Article.aspx?id=8589937322>.
10. Дорошенко В. С. 3D технологии изготовления отливок как примеры аддитивного производства / В. С. Дорошенко // Металл и литьё Украины – 2014. – №12. – С. 4-9.
11. Дорошенко В. С. Моделирование отливок как оболочковых конструкций с целью металлосбережения / В. С. Дорошенко, В. О. Шинский // Металл и литьё Украины – 2015. – №6. – С. 30-34.
12. Дорошенко В. С. Анализ и идентификация литых легковесных металлоконструкций с использованием теории минимальных поверхностей / В. С. Дорошенко // Металл и литьё Украины – 2015. – №11. – С. 24-28.



REFERENCES

1. Novosti VIAM [VIAM News]. – Retrieved from: <http://viam.ru/news/2050> . [in Russian]
2. Wohlers T., Caffrey T. (2016). Additive Manufacturing: The State of the Industry – AdvancedManufacturing.org, 5, 45-52.
3. Shinskiy I. O., Doroshenko V. S. (2009). 3D tehnologii pri lit'e po gazifitsiruemyim modelyam [3D technology in the lost foam casting] Metall i lit'jo Ukrainy. – Metal and casting in Ukraine, 4-5, 30-31 [in Russian]
4. Doroshenko V. S. (2008). Sposoby polucheniya karkasnyih i yacheistyih lityih materialov i detaley po gazifitsiruemyim modelyam [Lost-Foam methods of aerated frames and cast materials and components producing]. Litejnoe proizvodstvo – Foundry, 9, 28-32. [in Russian].
5. Shambley W. Prepare Your Technology Strategy for 3D Printing, Robotics, and the Cloud. – Foundry Management & Technology – Retrieved from: <http://foundrymag.com/simulationit/prepare-your-technology-strategy-3d-printing-robotics-and-cloud>.
6. The site of FIT West Corp. – Retrieved from: <http://www.netfabb.com/additivedesignandmanufacturing.php> .
7. Brooks R. (13/10/2015). Breaking Barriers in Shape, Space, Material to Achieve Finished Parts. – Foundry Management & Technology. – Retrieved from: <http://foundrymag.com/materials/> .
8. Morris A. (01/11/2016). A New Way to Print 3-D Metals and Alloys. – Retrieved from: <http://www.mccormick.northwestern.edu/news/articles/2016/01/a-new-way-to-print-3-d-metals-and-alloys.html>.
9. 25 years of 3D printing at the BMW Group: Pioneers in Additive Manufacturing Methods. Press release BMW Group (2.12.2015) – Manufacturing Engineering. - Retrieved from: <http://www.sme.org/MEMagazine/Article.aspx?id=8589937322>.
10. Doroshenko V. S. (2014). 3D tehnologii izgotovleniya otlivok kak primeryi additivnogo proizvodstva [3D technology of castings production as examples of additive manufacturing] Metall i lit'jo Ukrainy. – Metal and casting in Ukraine, 12, 4-9 [in Russian].
11. Doroshenko V. S., Shinskiy V. O. (2015). Modelirovanie otlivok kak obolochkovyih konstruktsiy s tselyu metallosberezheniya [Casting Modeling as shell structures to metal savings]. Metall i lit'jo Ukrainy. – Metal and casting in Ukraine, 6, 30-34. [in Russian].
12. Doroshenko V. S. (2015). Analiz i identifikatsiya lityih legkovesnyih metallokonstruktsiy s ispolzovaniem teorii minimalnyih poverhnostey [Analysis and identification of light weight cast metal structures using the theory of minimal surfaces]. Metall i lit'jo Ukrainy. – Metal and casting in Ukraine, 11, 24-28. [in Russian].

Анотація

Дорошенко В. С.

Аддитивне виробництво – зростаюча галузь світової промисловості

Описано отримання металевих виливків за допомогою 3D-технологій. Відзначено ряд нових способів 3D-обробки матеріалів, що відносяться до адитивних процесів, які уособлюють наступний крок до ресурсозберігаючого екологічного виробництва. Показано приклади моделей і виливків складної конструкції з оптимальним поєднанням металоємності, міцності і привабливого зовнішнього вигляду. Описані високотехнологічні 3D-процеси розширюють існуючий спектр металопродукції і можливості її виробництва.

Ключові слова

3D-технологія, зниження металоємності, адитивне виробництво, 3D-принтер, конструювання виливків, комп'ютерне моделювання, лиття за моделями, що газифікуються

Summary

Doroshenko V.

Additive manufacturing as a growing global industry

The review describes the metal castings production using 3D-technologies. Some new ways of materials 3D-processing that are additive processes and represent the next step in environmental resource-saving production are mentioned. The examples of complex design patterns and casting with optimal combination of materials, durability and attractive appearance are shown. The described 3D high-tech processes expand the existing range of metal products and the possibility of its production.

Keywords

3D-technology, reducing metal, additive manufacturing, engineering castings, 3D-printer, computer simulation, Lost Foam Casting

Поступила 01.06.13