

at

АДДИТИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



Применение
Generative Design
для оптимизации
конструкции
кронштейна
авиадвигателя
26

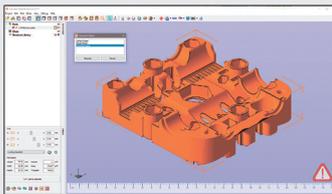


Аддитивные
технологии
в производстве
изделий
из композитов
29



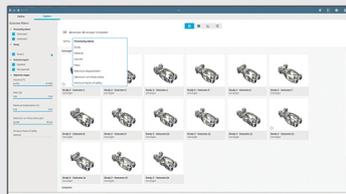
Послойный синтез
материалов в вакууме
на основе плавления
присадочной
проволоки
электрической дугой
34

Netfabb – революционное решение для аддитивного производства: от 3D модели до успешно напечатанной детали



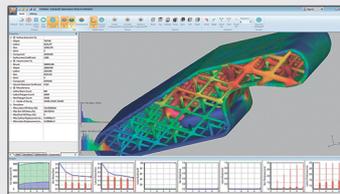
Импорт и корректировка моделей

Netfabb импортирует модели из большинства известных CAD-систем и автоматически преобразует их в триангулированную сетку, что существенно экономит время. При этом интеллектуальные скрипты могут автоматически анализировать поверхности, исправлять ошибки сеток, улучшать точность моделей путем повторной триангуляции, устранять пространственные коллизии и прочие ошибки.



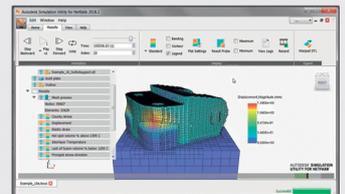
Generative Design (генеративный дизайн)

С помощью уникальной технологии порождающего проектирования Netfabb создает оптимизированные формы изделий, перебирая тысячи возможных вариантов, исходя из заданных параметров веса, жесткости, нагрузок и других возможных ограничений.



Оптимизация внутренней структуры и поверхности

С помощью Netfabb и 3D-печати создавайте детали с уникальной решетчатой структурой, позволяющей снизить вес, при этом сохранив характеристики прочности и производительности.



Моделирование процесса 3D-печати металлами

Быстрое моделирование процесса нанесения слоев позволяет прогнозировать напряжения и деформации в металлических деталях, помогая снизить потребность в дорогостоящих физических испытаниях и избежать повторения ошибок.

Хотите узнать больше?
pointcad.ru/product/autodesk-netfabb



СУШИЛКА
ПЛАСТИКА



FD1

FD5

НАСТОЛЬНЫЕ
3D-ПРИНТЕРЫ



XD10

XD20

XD30

СТАЦИОНАРНЫЕ 3D-ПРИНТЕРЫ

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ НАСТОЛЬНЫЕ
3D-ПРИНТЕРЫ



D100

D200

D300



D400



D400 Двойная Сушилка

Настольные 3D-принтеры высокого разрешения

- Лучшее качество поверхности в своем классе
- Печать высокоэффективными полимерами и стандартными материалами
- Пластик для 3D-печати Verbatim и Polymaker

ООО «Шевалье.ру»
129626, Москва,

ул. 2-я Мытищинская, д. 2, стр. 1, оф. 502
(495) 967-55-62, 755-77-31, 755-58-10

Принтеры: www.mass-portal.ru

Пластик: www.4fdm.ru

 **MASS PORTAL®**



14



22



26

СОДЕРЖАНИЕ

- 12 О развитии аддитивных технологий
- 14 Аддитивные производства для цифровой экономики
- 16 Практические 3D-решения для производства
- 18 Долго запрягать, чтобы быстро ездить
- 20 Моделирование дефектов аддитивного производства
- 22 VISION 300 – первый профессиональный принтер для печати инженерными пластиками у вас дома
- 24 АО «ПОЛЕМА»: передовые разработки для сурового климата и агрессивных сред
- 26 Применение Generative Design для оптимизации конструкции кронштейна авиадвигателя
- 29 Аддитивные технологии в производстве изделий из композитов
- 30 Лазерное выращивание металлических и металлокерамических изделий
- 34 Послойный синтез материалов в вакууме на основе плавления присадочной проволоки электрической дугой
- 39 Исследование прочностных характеристик модельного материала, получаемого методом FDM-печати

Издатель ООО «ПРОМЕДИА»

директор О. Фалина

главный редактор
М. Копытина

отдел редакции:

Т. Карпова

Э. Сацкая

С. Куликова, Е. Ерошкина

консультант:

Н.М. Максимов

nikamax@gmail.com

отдел рекламы

т/ф (499) 55-9999-8

АДРЕС: 101000, Москва

Милютинский пер., 18А,

оф. 3Бс, помещение 1, 3

т/ф (499) 55-9999-8

(многоканальный)

e-mail: info@additiv-tech.ru

www.additiv-tech.ru

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации СМИ
ПИ № ФС 77-67106 от 15.09.2016.

Тираж 5000 экз.

Распространяется на выставках
и по подписке.

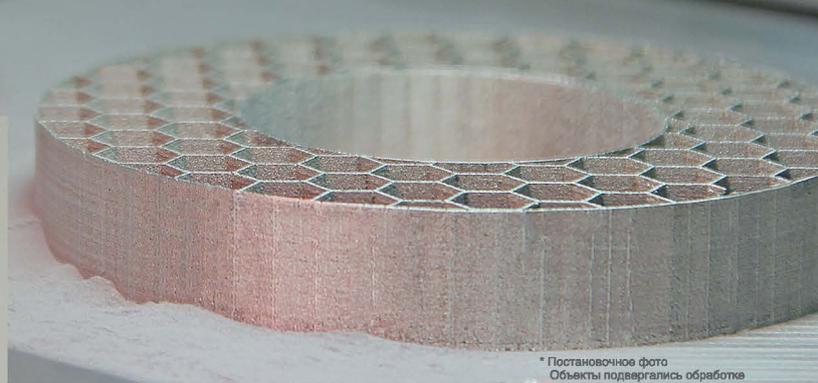
Перепечатка опубликованных
материалов разрешается только
при согласовании с редакцией.

Все права защищены ®.

Редакция не несет ответственности
за достоверность информации
в рекламных материалах
и оставляет за собой право
на редакторскую правку текстов.
Мнение редакции может
не совпадать с мнением авторов.

**9.5 млн
руб с НДС**

для тех, кто посетит
наш стенд на выставке
"ИННОПРОМ-2018"

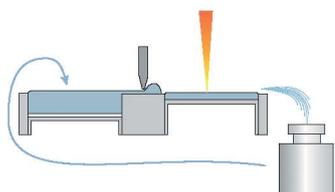


* Постановочное фото
Объекты подвергались обработке

RussianSLM[®] FACTORY

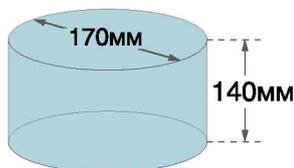
Компактная система печати металлами
отечественного производства

Сбор отработанного
порошка в защитной среде

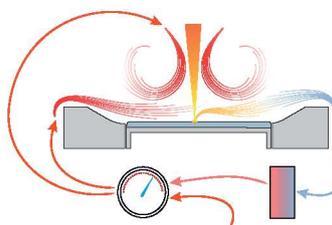


Большой объем
построения

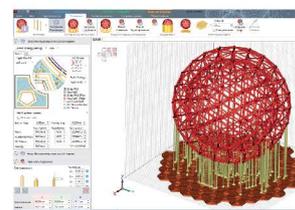
> 3,2 литра



Система очистки
защитного газа, сдув факела



Софт Triangulatica
(Россия)



3DSL.A.RU
РОССИЙСКИЕ 3D ПРИНТЕРЫ

3D SLM принтер для печати металлами
RussianSLM[®] FACTORY производится в Санкт-Петербурге компанией
ООО «Эксклюзивные Решения» («3DSL.A.RU – Российские 3D принтеры»)
Тел: +7 (812) 929-8765, +7 (812) 373-3311
Email: info@3dsl.a.ru

Крупнейший 3D-принтер по металлу

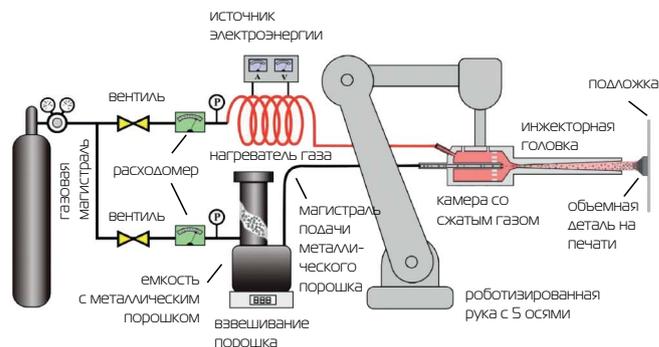
Компанией Titomic на заводе в Мельбурне (Австралия) запущен крупнейший металлический 3D-принтер собственной разработки (рис. 1). Технология, на которой основана его работа, достаточно хорошо известна специалистам — это холодное газодинамическое напыление порошком (ХГН) с помощью сверхзвукового сопла (рис. 2). Но если раньше ХГН-технологию применяли в основном для нанесения покрытий и ремонта изделий, то Titomic впервые применила ее для аддитивного производства титановых изделий больших размеров (9×3×1,5 м) с высокой производительностью — до 45 кг порошка в час. Это в 10–100 раз выше производительности любого металлического принтера на сегодняшний день.

Рис. 1. Роботизированный 3D-принтер, работающий по технологии ХГН



При соударении частиц металла с поверхностью детали на сверхзвуковой скорости происходит пластическая деформация и объединение материалов порошка и подложки. При этом прочность изделия из титанового сплава, полученного по технологии ХГН, на 34% выше, чем прочность исходной заготовки. Отходы материала (порошка) сводятся практически к нулю, что снижает стоимость готовых изделий из титановых сплавов, а возможность изготавливать изделия любой геометрии обеспечивают компании глобальное преимущество по затратам в сравнении с традиционными методами металлообработки. Интерес к оборудованию проявила и судостроительная компания Fincantieri из Италии.

Рис. 2. Схема ХГН-процесса



<http://www.titomic.com/machines.html>

Для печати микрообъектов

Компания Cytosurge (Швейцария) предлагает оборудование FluidFM μ 3Dprinter для 3D-печати металлических микрообъектов с высокой точностью, в том числе на существующих структурах. Технология основана на применении так называемых микрожидкостных пипеток, у которых отверстие в 500 раз меньше толщины человеческого волоса. Управляя потоком жидкости с ионами металла через пипетки в соответствии с 3D-файлом, можно выстраивать на 3D-принтере объемные структуры. При этом отверждение металла происходит за счет электрохимических процессов в электролите после выхода жидкости из сопла пипетки (рис. 1).

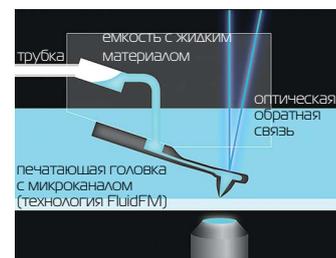
Работая при комнатной температуре, принтер способен создавать высококачественные металлические конструкции размером от 1 мкм до 1 000 000 мкм³. Система может печатать практически любую геометрию,

включая нависающие структуры с углами 90 градусов без поддержки.

До сих пор медь была основным металлом, который использовался, но в настоящее время изучается печать титана, олова и никеля, а также применение технологии FluidFM для создания структур из сплавов и полимеров.

Данный 3D-принтер идеально подходит для экспериментальных приложений, для поиска оптимальной геометрии трехмерных печатных объектов с высокой производительностью.

Рис. 1. Схема работы микропринтера



www.cytosurge.com

Новый формат

В Facebook появилась поддержка 3D-объектов, что позволяет размещать в ленте интерактивные 3D-модели, рассматривать их со всех сторон и даже переносить в виртуальную реальность. Для этого был предложен новый формат файлов glTF 2.0. Он поддерживает технологии текстур, освещения и реалистичного рендеринга и будет использоваться многими 3D-дизайнерскими продуктами, в частности, Google Poly 3D – библиотекой моделей виртуальной реальности Google.

<https://developers.facebook.com/>

Управление сетью поставок

Компании ST Aerospace (Сингапур, использует AM-технологии в производстве) и Moog (разработчик системы контроля и логистики VeriPart) объединили свои возможности для использования технологии блокчейн для цифрового управления сетью поставок (рис. 1). Проект был реализован на основе смарт-контракта на платформе Azure компании Microsoft.

Вместе с St Aerospace и Национальным центром производственных наук (NCMS) Moog будет использовать VeriPart для разработки технологии аддитивного производства с интегрированными возможностями цифровых транзакций. Это должно повысить эффективность и безопасность послепродажного обслуживания 3D-печатных деталей (рис. 2), что позволит оптимизировать цепочки поставок как на военном, так и на коммерческом аэрокосмическом рынках.

Рис. 1. Составляющие «умного обслуживания».

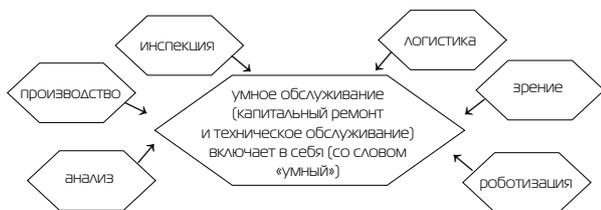


Рис. 2. Запчасти, изготовленные на 3D-принтере, поступают от производителя в блокчейн поставок для авиакосмической отрасли.

<http://automobile-engine.com/>

ЛАЗЕРНЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Станок для лазерной наплавки
и прямого выращивания
из металлического порошка

СЕРИЯ
МЛ7 производится
с 2016



Разработано и произведено в России

Рабочий объем камеры построения
500×500×500 мм³

Координатно-кинематическая система на
базе линейных двигателей с
ферромагнитными якорями

Трех- и пятикоординатная
кинематическая система

Головка для лазерной наплавки Precitec

Использование порошков российского
и иностранного производства

ГРУППА КОМПАНИЙ
**ЛАЗЕРЫ
И АППАРАТУРА**

www.laserapr.ru • sales@laserapr.ru • +7 499 731 20 19

Для капсулы «Орион»

Более 100 деталей для капсулы «Орион», которую создает космическое агентство США НАСА, будет производиться с помощью трехмерных принтеров. Компании Локхид Мартин, Stratasys и инженерная фирма RADT объединили свои усилия для разработки деталей, способных выдержать экстремальные температуры и химическое воздействие во время космических полетов. За основу взяты термопластичные материалы РЕКК для 3D-принтера Stratasys (ULTEM 9085™ и Antero™ 800NA, обладающий антистатическими свойствами).

Капсула «Орион» позволит космонавтам покинуть Международную космическую станцию, которая находится на высоте примерно 420 км над Землей. Следующий испытательный полет капсулы «Орион», получивший название Exploration Mission-1 (EM-1), станет первой интеграционной миссией с самой мощ-

Рис. 1. Пример детали для двери док-станции, отпечатанной на 3D-принтере

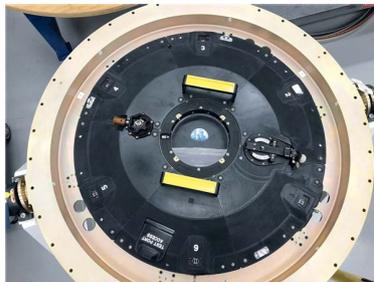


Рис. 2. Деталь из термопластика для капсулы «Орион»

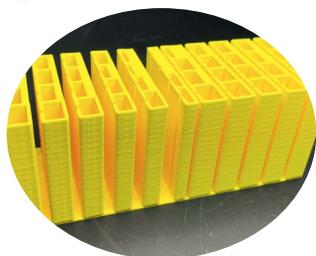


ной ракетой мира — Space Launch System. Полет рассчитан примерно на 3 недели, в течение которых капсула будет летать за пределами Луны. Очередной полет, ЭМ-2, также планируется к Луне, но с астронавтами на борту. Это будет первый полет с 1972 года, и позволит НАСА подготовить все более сложные миссии в глубоком космосе.

<http://www.3ders.org>

3D-звуковые фильтры

Группа исследователей из университета Дюка (США) разработала так называемые метаматериалы для перенаправления и отражения звуковых волн (рис. 1).



Отпечатанный на 3D-принтере материал для перенаправления и отражения звуковых волн

Структура представляет собой линейку из набранных элементов, состоящих из четырех полых столбцов с прорезанным с одной стороны узким каналом посередине. В основу проекта положены теоретические расчеты прохождения звуковых волн через полые структуры, а также практические исследования на моделях. Доказано, что конечный результат не зависит от материала пористой структуры и определяется ее формой и размерами. Объем полых ячейки определяет резонансную частоту звуковой волны, на которую ячейка будет настроена. Таким образом можно создавать звуковые фильтры, избирательно настроенные на определенные диапазоны звуковых частот. В частности, получены результаты по уверенному отражению звуковой волны на углы в 60 градусов с эффективностью в 96%.

<https://pratt.duke.edu/about/news/sound-control>

Реалистичная скульптура

Художник Martin Binder создал четырехметровую скульптуру ветки березы, используя 3D карандаш с материалом в виде нити из пластика на основе дерева. Называется она «Портрет березы» и выставлена на выставке современного искусства в Берлине (рис. 1). Многие посетители принимают скульптуру за реальную ветку березы в стеклянном футляре. Однако при более близком рассмотрении видна послойная структура печати. Художник потратил немало времени для изучения структуры реального дерева и почти 250 часов на печать скульптуры.



Экспонат на выставке



<https://edgny.com/>

Огромный успех

Компания Glowforge из Сиэттла (США) выпустила линейку трехмерных лазерных принтеров, которые могут печатать в домашних условиях на объектах из разных материалов. Стартап имел огромный успех, получив инвестиции в размере 27,9 млн USD и собрав более 70 млн USD в качестве предзаказов.

Это субтрактивная технология, которая позволяет гравировать изображения на материалах или резать материалы на определенные формы с использованием 40 Вт CO₂-лазера.

«С самого начала мы разработали лазерный принтер Glowforge 3D, чтобы освободить творчество людей. Теперь вы можете напечатать то, что хотели, и тогда, когда это нужно», — сказал генеральный директор Glowforge Дэн Шапиро. Принтер можно легко настроить, подключить через Wi-Fi и печатать из известных программ Adobe Illustrator, Adobe Photoshop, Inkscape, CorelDraw, GIMP, Autodesk 360 и SketchUp. Также можно обойти программное обеспечение в целом — бортовые камеры (широкоугольная и макро) могут сканировать чертеж и преобразовывать его непосредственно в печать практически на любом материале.

Glowforge предлагает линейку материалов Proofgrade, закодированных в цифровой форме, поэтому принтеры Glowforge могут распознавать их и автоматически настраивать для правильной печати.

Размеры рабочей зоны: глубина от 455 мм до неограниченной, ширина 515 мм, высота до 50 мм. Материалы для резки и гравировки: дерево, ткань, кожа, бумага, картон, пластик, резина, еда и многое другое. Материалы только для гравировки: стекло, мрамор, резина для печатей, камень, керамическая плитка, анодированный алюминий, титан и другие.



Рис. 1. 3D-принтер Glowforge



а) б)
Рис. 2. Резка (а) и гравировка (б) по дереву

www.glowforge.com

ОДИН ИЗ ЛИДЕРОВ РЫНКА 3D-ПЕЧАТИ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

3dcrafter.ru

info@3dcrafter.ru
+7 495 00-44-187



Работаем с 2014 года

*Статуя
высотой 2 м
изготовлена
в 3Dcrafter.ru

КРУПНЕЙШАЯ ФРАНЧАЙЗИНГОВАЯ СЕТЬ В РОССИИ

fran.3dcrafter.ru

Обувь по запросу



Рис. 1. Adidas использует роботы для сборки кроссовок

Adidas применяет технологию компании Carbon для производства подошв для своей обуви, а также роботизированные станки для вязания верха кроссовок и сборки обуви (рис. 1). Все это позволило увеличить производительность почти в 100 раз. В планах компании увеличить производство обуви с помощью технологии DLS (Digital Light Synthesis) со 100 000 штук в 2018 году до миллионов в последующие годы. Первая опытная партия кроссовок Futurecraft 4D была с успехом продана в январе 2018 г. по цене \$300 за пару.

Наиболее важное преимущество технологии — возможность создавать

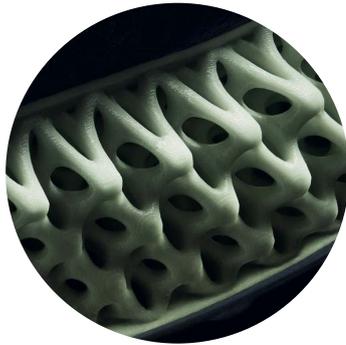


Рис. 2. Обувь Adidas с отпечатанной на 3D сетчатой подошвой



обувь по запросу покупателя и осуществлять доставку за несколько дней. В торговом зале Adidas сканируют ноги клиента, согласуют с ним дизайн кроссовок, и информация отправляется в облачный сервис компании, где создается рабочий файл обуви. После этого в ближайшем для клиента сервисном центре печатается подошва на принтере Carbon, изготавливаются комплектующие и собирается пара обуви, которая доставляется клиенту.

Технология DLS позволяет создавать подошву в виде сотовой структуры (рис. 2), которая идеальна для амортизации ударной нагрузки и обладает долговечностью. При воздействии нагрузки на такую структуру она деформируется только в направлении действия силы. Так, когда пятка ударяет по подошве, та просто сжимается к земле, не выпирая по бокам, что снижает износ обуви и предохраняет ногу от травмы.

<https://www.youtube.com/watch?v=3aQrRrYQob8>

Медицина будущего

Развитие и внедрение аддитивных технологий (АТ) в медицине уже сейчас обеспечивает новые уникальные возможности — получены существенные результаты, повышающие эффективность лечения и качество жизни пациентов. Однако новые знания и опыт требуют пристального внимания и изучения.

В связи с этим в рамках ведущей московской выставки **«Здравоохранение»** впервые будут организованы специализированная экспозиция **«Аддитивные технологии для медицины»**, включающая стенд стартапов и тематическую секцию в рамках конференции **«Медицина будущего»**.

К участию в проекте приглашаются:

- *производители оборудования* для АТ, имеющие опыт участия в медицинских проектах;
- *врачи и представители клиник*, которые готовы поделиться опытом внедрения АТ в хирургии, ортопедии, стоматологии и других направлениях;
- *ученые*, которые могут рассказать о мировых и собственных достижениях, актуальных для внедрения в медицине, в т. ч. в биопечати.

Журнал «Аддитивные технологии» выступает соорганизатором проекта. Через нас Вы можете забронировать выставочные площади, включить доклад в программу

тематической секции «Аддитивные технологии для медицины», проанонсировать на страницах журнала участие в выставке и рассказать о своих достижениях. В случае комплексного участия в проекте предусмотрено спецпредложение.

Выставка «Здравоохранение» будет проходить в Москве в ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР» с 3 по 7 декабря 2018 г.

Посещение выставки и конференции бесплатное при оформлении на сайте www.zdravo-expo.ru электронного билета.



3DQ



3DQ Scan



PRISM Pro Dual



3DQ One V2

КАЧЕСТВО

ВО ВСЕХ ИЗМЕРЕНИЯХ

3DQuality одна из крупнейших российских компаний по разработке и производству 3D-принтеров по системе delta-робот. Мы делаем надёжные, простые и доступные 3D-принтеры.

ООО "ТРИДЕКЬЮ"
117105, Москва, Варшавское шоссе, дом 28А,
Технопарк "Нагатино", офис 253
(495) 134-27-54
www.3dquality.ru, info@3dquality.ru

Новое решение от 3DQuality

Компания 3DQuality полностью завершила разработку новой головы для двухцветной печати и печати с растворимыми подержками.

По сравнению с предыдущей версией сделаны следующие конструктивные изменения:

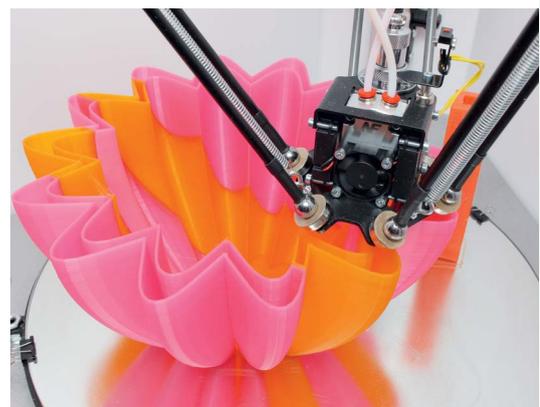
- добавлена распределительная плата на исполнительные элементы (кулеры, нагревательный элемент, термистор) с одним входящим разъемом, которая позволяет обеспечить максимально возможную надежность и упрощает процесс смены головы при необходимости чистки сопла или его замены;

- эффлектор с диагоналями на 60 миллиметров приближен к соплу, что позволяет увеличить

высоту области печати на данную величину;

- используется более современная конструкция радиатора с расположением каналов под углом 45 градусов, которая позволяет уменьшить количество пластика на построение утиральной башни, требуемого для разделения цветов при печати;

- автокалибровка производится при помощи кронштейна с концевиком, размещаемого на эффлекторе посредством магнита. В предыдущей версии автокалибровка производилась за счет возможности перемещения единого блока из сопла, термобарьера, нагревательного элемента и радиатора, в связи с чем могли быть сложности с автокалибровкой,



вызванные невозможностью перемещения единого блока по различным причинам. Данное решение было апробировано в версии 3DQ Mini Dual, выпущенной весной 2017 года, и зарекомендовало себя как более надежное и долговечное.

После успешно реализованного проекта все новые 3D-принтеры оснащаются головой Dual X.

www.3dquality.ru

Центр аддитивных технологий

Создание высокотехнологичного Центра аддитивных технологий (ЦАТ) началось на Московском машиностроительном предприятии им. В.В. Чернышева (входит в ОДК). Его организаторами являются холдинги авиационного кластера Госкорпорации «Ростех»: ОДК, «Вертолеты России», КРЭТ и «Технодинамика». Для обеспечения работы ЦАТ на предприятии будет создан конструкторско-технологический комплекс, который включит в себя лабораторию металлургических исследований и конструкторское бюро.

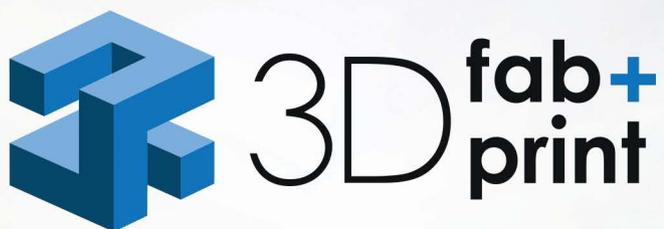
Основной продукцией будут детали газотурбинных двигателей из титана, кобальт-хрома, нержавеющей стали, инконеля и алюминия, уже прошедшие опытно-конструкторские работы в холдингах. По расчетам участников проекта, первая опытная партия будет изготовлена уже в 2019 году.

<http://rostec.ru/news/>

Покрyтия для 3D-имплантов

Ученые Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Томского политехнического университета занимаются модифицированием поверхности костных имплантатов с помощью покрытия из кальций-фосфата или гидроксиапатита. Это необходимо для повышения биоактивных свойств имплантата, чтобы он лучше приживался в организме и не отторгался, что особенно актуально у больных, страдающих от остеопороза. Вместе с коллегами из Румынии они предложили новое решение для увеличения биосовместимых свойств гидроксиапатита. Для этого они добавляют к гидроксиапатиту ионы активных металлов — магния, стронция, циркония, а для придания покрытию антибактериальных свойств — ионы серебра. Результаты исследований были представлены на международном симпозиуме «Перспективные исследования в области химии и биомедицины», проходившем в Томске с 4 по 8 июня.

<https://news.tpu.ru>



Проект аддитивных технологий
и 3D-печати в промышленности

29 января – 1 февраля 2019

www.3dfabprint.ru

в рамках выставки «интерпластика»



Ваше
трехмерное
пространство
в России

Место проведения:



Партнер:

Организатор:



000 «Мессе Дюссельдорф Москва»
119021 Россия, Москва
ул. Тимура Фрунзе, д. 3, стр. 1
Тел.: +7 495 955 91 99
messe-duesseldorf.ru





О развитии аддитивных технологий

Татьяна Карпова

Развитие аддитивных технологий (АТ) идет столь быстрыми темпами, что формат конференции, где возможен быстрый обмен знаниями и опытом, стал одним из самых популярных для продвижения разработок данной тематики как в научной среде, так и для информирования широкой аудитории. Проходившая во Всероссийском институте авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ») уже четвертая конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» отразила как новые достижения, так и различные проблемы, задачи, которые стоят перед специалистами отрасли, а также новые направления для применения навыков и технических решений. Динамика роста количества участников отражает актуальность представленных здесь тем и направления в целом. В этом году были зарегистрированы 528 человек от 200 организаций, в том числе из зарубежных стран. Гостями конференции стали представители Китайской Народной Республики, Казахстана, Германии, Вьетнама, Белоруссии, Мексики и др.

«Аддитивные технологии — это основа новой промышленности. Все мы должны приложить усилия к тому, чтобы технологии 3D-печати стали инновационной точкой роста экономики России», — считает генеральный директор ФГУП «ВИАМ» Е. Н. Каблов. При сравнении итогов конференций разных лет, проведенных во ФГУП «ВИАМ», видно, что компетенции по использованию АТ в России радикально возросли. Разрабатываются порошки, появились первые установки, разрабатывается программное обеспечение, системы неразрушающего контроля, идет процесс формирования нормативной базы для изготовления изделий по АТ. Например, в ВИАМ в настоящее время успешно решена задача по созданию производства отечественных металлопорошковых композиций — обеспечен выпуск в объеме до 190 тонн в год. Тем не менее, по данным, Е. Н. Каблова, на долю России приходится не более 1,5% мирового рынка АТ, составляющего более 5 млрд долларов. США, КНР, Германия, Великобритания, Япония суммарно кон-

тролируют более 50% мирового рынка. По прогнозам, к 2025 году рынок достигнет 25 млрд долларов, и доля России в нем 2%.

«Для выполнения принятых руководством нашей страны решений о создании и внедрении аддитивных технологий в различных отраслях отечественной экономики необходимо объединить и скоординировать усилия научных, финансовых и промышленных организаций России, как это сделано за рубежом», — подчеркнул Евгений Каблов. «В этой связи на базе ВИАМ готовится «Комплексный план мероприятий по развитию и внедрению аддитивных технологий в Российской Федерации на период 2018–2025 гг.». Подготовка документа ведется в соответствии с поручением правительства РФ, Военно-промышленной комиссии, Минпромторга России. «План разрабатывается с участием «Росатом», «Ростех», «Роскосмос», активное участие принимают «ОДК», «ОАК», корпорация «Тактическое ракетное вооружение», «Вертолеты России», КРЭТ, «Технодинамика», академические институты ФАНО, исследовательские университеты, Росстандарт. В обсуждении этого комплексного плана участвовали представители более 40 организаций, было сделано около 190 предложений от 24 организаций. Все они учтены», — заявил руководитель ВИАМ.

В решении конференции отмечены следующие направления, которые необходимо развивать для широкого внедрения АТ в российскую промышленность: создание единой информационной среды на базе цифровых технологий; создание отечественных материалов нового поколения и аддитивных технологий изготовления деталей; разработка отечественного оборудования на базе отечественного программного обеспечения; разработка национальных стандартов и нормативной документации; совершенствование системы подготовки кадров по базовым инженерным специальностям; создание цифровых аддитивных производств. Все они так или иначе нашли отражение в докладах российских участников из Москвы, Санкт-Петербурга, Перми, Казани, Томска, Рыбин-

ска, Самары, Ижевска и др. Среди представленных тем: синтезирование металлокерамических композиционных материалов и их применение в аддитивном производстве; исследование структур и свойств новых сплавов; нанесение защитных покрытий; сварка заготовок, полученных с помощью АТ; очистка оборотного порошкового материала, создание оборудования для производства порошка, компьютерное моделирование процесса печати и оптимизация конструкций; прогнозирование остаточных напряжений; контроль геометрии 3D-деталей с помощью сканера и их качества с помощью компьютерной томографии, изготовление деталей сложной геометрии и др. Приз за лучший доклад в секции «Новые материалы и технологические процессы для аддитивного производства» вручен Андрею Самохину (ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова» РАН) — тема выступления «Сфероидизация частиц металлических порошков в плазме и их консолидация методами ГИП и СЛМ», а за лучший доклад на секции «Опыт разработки и применения аддитивных технологий» приз получил Алексей Курчев (АО «ОДК-Авиадвигатель») — тема выступления «Разработка аддитивных технологических процессов изготовления жаровых труб ГТД из отечественного порошка марки ВВ751 П». Интересной стала третья секция, отразившая опыт разработки и применения АТ для целого ряда прикладных задач: атомного машиностроения, создания навигационных систем беспилотных летательных аппаратов, ремонта деталей и изготовления жаровых труб газотурбинных двигателей, челюстно-лицевой хирургии. А компанией ООО «ИФ АБ Универсал», например, была даже представлена новая технология фирмы XJET по печати керамическими и металлическими наноматериалами. Кроме того, в фойе работала обширная стендовая экспозиция.

Перед Россией стоят масштабные задачи в области авиастроения. Заканчивается первый этап создания ПД-14 — центрального в семействе двигателей самолетных, вертолетных и промышленных, начинается новый проект по созданию тяжелого авиадвигателя ПД-50. Аддитивные технологии входят в их производства, а также в уникальные проекты других отраслей, причем не как экзотика, а как необходимый технологический процесс. И конференция, проводимая в ВИАМ, является важным этапом для продвижения АТ, местом, где собираются ведущие ученые отраслевых институтов, специалисты отечественных и зарубежных предприятий, чтобы обсудить пути развития отечественной аддитивной отрасли. Заместитель министра промышленности и торговли О. Е. Бочаров отметил, что в ВИАМ создана удивительная атмосфера и очень высокая степень интеллектуального напряжения.

Использованы фото и материалы www.viam.ru

Организаторы: отделение химии и наук о материалах РАН, научный совет РАН по высокомолекулярным соединениям, ИНЭОС РАН, ИСПМ РАН.



7–12 октября 2018 года

VII Бакеевская всероссийская конференция с международным участием «Макромолекулярные нанообъекты и полимерные нанокompозиты»

Основные тематические направления конференции:

- Макромолекулярные нанообъекты
- Функциональные полимерные нанообъекты и нанокompозиты
- Теория и компьютерное моделирование полимерных нанокompозитов
- Полимерные композиционные наноматериалы для аддитивных технологий
- Современные методы исследования наночастиц и полимерных нанокompозитов

11 октября

круглый стол «Состояние и перспективы развития аддитивных технологий»,

целью которого является организация междисциплинарного сотрудничества между научными институтами, вузами и инжиниринговыми центрами, бизнес-структурами.

Место проведения:

Санаторий «Красная Пахра», Москва, поселение Краснопахорское, с. Красное, ул. Парковая, дом 10, строение 1

Оргкомитет:

Ученый секретарь +7 (499) 135-61-28
Технический партнер +7 (926) 688-68-86
Спонсоры и деловые партнеры +7 (499) 135-93-84

www.nano2018.ru

nano@ineos.ac.ru

Спонсоры



Информационные партнеры





Аддитивные производства для цифровой экономики

Татьяна Карпова

Секция «Аддитивные технологии в парадигме Индустрии 4.0», проходившая в городе Рыбинске Ярославской области 17 апреля, является одним из самых популярных и значимых событий международного технологического форума «Инновации. Технологии. Производство».

Это связано как с активным внедрением аддитивных технологий (АТ) в процессы производства газотурбинных двигателей на рыбинском ПАО «ОДК-Сатурн» (предприятие входит в Объединенную двигателестроительную корпорацию (ОДК) и является соорганизатором форума), так и с общей политикой ОДК, которая ставит АТ как один из приоритетных векторов развития. Заместитель генерального директора, генеральный конструктор АО «ОДК» Ю.Н. Шмотин определил это направление как доминанту развития технологий и новых средств производства. Уже сейчас в ОДК по данным технологиям изготавливают порядка трех тонн деталей в год [1]. Например, в Центре аддитивных технологий ПАО «ОДК-Сатурн» представлены все перспективные и наиболее востребованные направления АТ: селективное лазерное сплавление металлических материалов, селективное лазерное спекание полимерных материалов, электронно-лучевое сплавление металлических материалов, прямое нанесение металлов. Детали, изготовленные по АТ-технологиям, применяются, в частности, в механизмах поворота лопаток, элементах камер сгорания, элементах механизации, направляющих аппаратов ГТД [2].

Аддитивные технологии — это важный инструмент для повышения эффективности и гибкости производства. И целый ряд компаний уже добились существенных результатов в их внедрении. О своих достижениях, направлениях развития и поставленных целях на конференции рассказали представители GE Additive, SLM Solution, EOS GmbH, LPW Technology Ltd, ООО «Ямазки-Мазак», ООО «Би Питрон СП», ГК «ПЛМ Урал», ООО «Адванс Инжиниринг», останавливаясь на различных аспектах и этапах построения современной «умной» фабрики. Говорили и о технологической подготовке производства, и об управлении данными, обеспечении качества при изготовлении деталей, сборе и анализе данных в условиях производства, защите интеллектуальной собственности и др.

Показательны результаты внедрения АТ корпорацией General Electric, представленные О.В. Ентиным — директором по продажам региона Россия и СНГ General Electric Additive. Отличие корпорации в том, что это и разработчик, и производитель оборудования и материалов для АТ, и самый большой потребитель деталей. Развитие аддитивных технологий здесь получило значительный импульс после 2016 года, когда более 1 млрд долларов были инвестированы в покупку ряда компаний — производителей оборудования и материалов. И сегодня как достижения можно привести следующие примеры. Новый двигатель Advanced Nurboprop Engine (АТР) производится на 35–40% аддитивным способом. 855 деталей традици-

онного способа производства были заменены 12 деталями, произведенными с помощью АТ. Как результат сокращается расход топлива, вес изделия и скорость реализации подобных проектов. Топливная форсунка — это деталь, которая уже два года используется в летных аппаратах. В этом году GE произведет их порядка 40 тысяч. В другой детали «корпус», которая была реализована на новых машинах, триста деталей были заменены на одну. GE выстраивает на сегодня глобальную цепь аддитивного производства. Подразделения располагают доступом к глобальной сети предприятий производственных и исследовательских, которые включают в себя абсолютно все: производство порошка, предоставление консалтинговых услуг, услуг адаптации любой инновационной идеи, мелкосерийное производство и производственные центры. В корпорации полагают, что старые производства будут в очень краткосрочной перспективе заменены на новые цифровые комплексы на базе АТ. Для развития корпорация ставит перед собой следующие задачи: улучшенный дизайн изделий, увеличение их размера от 150 мм до 1 метра, увеличение скорости построения, дифференциация технологий машинного производства и цифровых технологий, разработка нового оборудования, материалов и программного обеспечения. Индустрия 4.0 невозможна без кадров,

поэтому GE много инвестирует в образование. Огромный потенциал внедрения АТ GE видит внутри собственного концерна. Цель GE Additive — довести годовой доход до 1 млрд долл. США к 2020 г., продать 10000 аддитивных производственных комплексов к 2026 г.

В заключение хочется сказать в целом о форуме. Это уникальное явление, отражающее в тематических секциях целый ряд практических задач в рамках формирования цифровой экономики страны, это поиск новых путей и решений, платформа для обмена знаниями, для консолидации с целью подготовки перспективных проектов в рамках «Национальной технологической инициативы». Поэтому неудивительно и интерес к мероприятию, и его ежегодный рост. В этом году в пятом юбилейном форуме приняли участие более 1300 человек от 300 организаций. И можно уверенно сказать, что это уже давно событие не регионального, а международного масштаба с большим потенциалом развития. ■

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шмотин Ю. Н. Сверхвостребованные направления и задачи ОДК // Трамплин к успеху. 2018. N 13. С. 5–7.
2. www.uecrus.com/rus/presscenter/odk_news/?ELEMENT_ID=2855 ОДК-САТУРН 05.04.2018



ПОДПИСНОЙ КУПОН

Вы можете оформить подписку на журнал «Аддитивные технологии» с любого месяца. Стоимость одного номера — 250 рублей, стоимость годовой подписки — 1000 рублей.

БАНКОВСКИЕ РЕКВИЗИТЫ:

ООО «ПРОМЕДИА»
Юр. адрес: 101000, г. Москва,
Милютинский пер., 18А
Почт. адрес: 101000, г. Москва,
Милютинский пер., 18А, оф. 8
ИНН 7708266787
КПП 770801001
Р/с 40702810400120033781
ПАО АКБ «АВАНГАРД»
г. Москва
К/с 3010181000000000201
БИК 044525201

Подписка на:

номер год

Фамилия, имя, отчество (получателя):

Наименование предприятия (организации, фирмы):

Индекс и полный почтовый адрес (получателя):

Юридический адрес (для выставления счета)

ИНН/КПП

Телефон:

E-mail (если он имеется)

Для выставления счета направьте заполненный купон по адресу: info@additiv-tech.ru.

Частные лица могут подписаться без счета, оплатив подписку в Сбербанке по указанным реквизитам.

Ольга Горобец

В рамках московской выставки «Металлообработка», проходившей в ЦВК «Экспоцентр» с 14 по 18 мая, 3D-тематика впервые была представлена в специально выделенном разделе. Компания iQB Technologies показала здесь уникальные разработки и провела практическую конференцию.

Автоматизация производственных процессов — одна из самых актуальных проблем современных предприятий. На выставке можно было увидеть множество роботизированных решений, однако iQB Technologies представила не имеющее аналогов ноу-хау в области автоматизации контроля качества: систему, состоящую из роботизированной руки Fanuc LR Mate 200iD и ручного 3D-сканера Creaform HandySCAN 700 (рис. 1). Это первое разработанное в России решение, позволяющее управлять двумя принципиально разными устройствами с одной рабочей станции. Робот управляет сканером, который включается и выключается по заданной программе, без участия человека. Скан объекта передается в программу Geomagic Control X для контроля геометрии, ПО сравнивает САД-модель с полученным сканом и выгружает готовый метрологический отчет. Автоматизированная сканирующая система гарантирует точность измерений до 30 мкм и обеспечивает выявление брака на ранних стадиях производства. Роботизированное решение разработано iQB Technologies совместно с НП ЦТМ «Мезон» и ведущими миро-

выми производителями оборудования Creaform и Fanuc.

Реверс-инжиниринг — задача, с которой сталкиваются конструкторские отделы многих производств. На стенде компании было представлено оборудование для измерения координат малых и больших деталей и объектов и ПО от лидеров индустрии: стационарный оптический 3D-сканер Solutionix CS2+ для высокоточной оцифровки объектов со сложной геометрией, контроля качества и обратного проектирования; система фотограмметрии Creaform MaxSHOT; комплексное программное обеспечение Geomagic Design X. Гости стенда могли наблюдать на экране монитора, как происходит процесс сканирования в цифровом формате, получение облака точек и обработка модели в ПО.

Также демонстрировались возможности технологии селективного лазерного плавления, в том числе уникальные цельнометаллические изделия, выращенные на аддитивной установке SLM Solutions. Благодаря высокой плотности (на 50% лучше, чем при литье), точности и повторяемости SLM-технология позволяет создавать объекты сложнейшей геометрии или структуры, в том числе очень мелкие, без необходимости в изготовлении оснастки и с минимальной постобработкой.

Увидеть, как происходит подготовка моделей к 3D-печати, можно было благодаря универсальному программному продукту Materialise Magics, который обеспечивает полный цикл адди-



Рис. 1. Автоматизированная сканирующая система: робот + сканер

тивного производства — от импорта данных и анализа качества до создания поддержек, подготовки платформы и постобработки.

Литейные предприятия с успехом используют 3D-печать, экономя время и деньги при создании литейных моделей и форм, мастер-моделей и оснастки. На стенде iQB Technologies демонстрировался весь технологический процесс создания восковой и фотополимерной модели перепускного клапана стравливания избыточного давления газа для последующей отливки. Применяя технологию многоструйной печати (MJP), можно получить литейную форму всего за неделю.

Более подробно представлены на стенде решения и технологии, а также реализованные с их помощью проекты были освещены на конференции iQB Technologies «Практика внедрения 3D-технологий на промышленном предприятии», которая собрала более 150 слушателей — главных инженеров, технологов и других профессионалов металлообрабатывающей промышленности. ■

rosmould

Международная выставка форм, пресс-форм, штампов, оборудования и технологий для производства изделий

18–20 июня 2019

МВЦ «Крокус Экспо», Москва

**От идеи
до готового изделия**



Формы, пресс-формы и штампы



Аддитивные технологии



Сырье и материалы



Оборудование и оснастка



www.rosmould.ru



messe frankfurt

mesago

Messe Frankfurt Group

Долго запрягать, чтобы быстро ездить

Зинаида Сацкая



*Шарль Фишер,
директор по международным
продажам и маркетингу
компании AddUp*

Директор по международным продажам и маркетингу компании AddUp Шарль Фишер (Charles Fischer) дал эксклюзивное интервью обозревателю журнала «Аддитивные технологии».

Как возникла компания AddUp?

AddUp — это совместное предприятие группы Fives и группы Michelin, а начиналось всё около 15 лет назад. В практике команды Michelin — а это, как вы знаете, мощное предприятие — брать новые, растущие технологии, внедрять их у себя и совершенствовать. Так было и с аддитивными технологиями. В какой-то момент пришло понимание, что этот тип технологий весьма интересен для НИОКР в области производства пресс-форм. Началась работа, и сегодня срок выпуска пресс-форм сократился с 6 месяцев до 3 недель. То есть Michelin ускорил свою реакцию на запросы рынка и сократил время реализации своей идеи и выпуска на рынок новой продукции. На развитие и отработку технологии Michelin понадобилось примерно 10 лет. Это был первый этап. Второй этап был реализован уже в промышленном масштабе с технологией производства ламелей, которые входят в состав пресс-форм для шин. Благодаря использованию аддитивных технологий компания смогла делать ламели сложной формы, которые после вулканизации придают шинам такие характеристики, каких нельзя было бы достичь без аддитивных технологий. Сегодня Michelin производит в год порядка миллиона деталей с помощью аддитивных технологий. На это направление работает парк оборудования, насчитывающий по миру около 30 аддитивных станков именно для производства ламелей. Эти станки были приобретены

на рынке, но чтобы использовать их в промышленных масштабах, пришлось полностью переделать механику и программное обеспечение. Это было сделано для того, чтобы обеспечить надежность, стабильность производства, такую повторяемость процесса, чтобы между первой подложкой и, условно говоря, тысяча первой подложкой не было различий. Следующим этапом совершенствования процесса стала полная автоматизация линии производства ламелей: автоматически загружаются подложки, автоматически идет 3D-печать и выходят готовые изделия. Но выстроившиеся в автоматическую линию станки не были приобретены на рынке, они с нуля были созданы компанией Michelin. В апреле 2016 года было создано совместное предприятие Fives и Michelin, которое получило название AddUp. Это был третий шаг на пути к созданию нашей компании. Со стороны Michelin в компанию были вложены компетенции по технологиям и надежности, а со стороны Fives — компетенции в таких областях, как проектирование и серийное производство станков. В первый год компания продавала станки в основном в Европе, сейчас мы открываем представительство в США, а также, опираясь на команду Fives в России, начинаем продвигать свою продукцию на российский рынок.



Приходится слышать, что в печати металлом остаются проблемы, которые до сих пор не решены, в частности, проблемы остаточных напряжений, пористости. У вас эти вопросы решаются в самом процессе печати или в процессе постобработки?

Всё, конечно, зависит от вида деталей, но Michelin строил свою стратегию, держа курс на то, чтобы избежать всех видов постобработки. Детали достаточно тонкие, чтобы не пришлось снимать напряжения, и используются очень мелкие фракции порошка, чтобы не понадобилась чистовая обработка ламелей.

Выходя с вашим оборудованием на российский рынок, предполагаете ли вы использовать металлические порошки российских же производителей?

Наша цель — иметь возможность использовать российские металлические порошки прямо с момента продажи станка, но в любом случае мы не ограничиваем своих клиентов в выборе поставщиков порошков. Мы сертифицируем тип порошка, материал, размер фракции и отдельно сертифицируем поставщиков. Выбирая поставщика, мы должны быть убеждены в том, что поставщик выдает продукцию постоянного качества. Когда поставщик сертифицирован, мы просто даем нашим заказчикам контакты поставщиков металлических порошков, и дальше наши заказчики общаются с поставщиками самостоятельно.

Как ваша компания смотрит на проблему утилизации отходов аддитивного производства? Это проблема экологическая или экономическая?

По утилизации мы работаем с партнерами, которые также являются нашими поставщиками порошков. Они создают процедуру утилизации отходов. До конца года у нас будет подробный пресс-релиз на эту тему. Французское *utiliser* — это «использовать». Не использовать отходы, выкинуть их означает выкинуть деньги. Идея переработки отходов — это возможность сократить свои расходы. Одним словом, чтобы быть конкурентоспособным на рынке, надо использовать все возможности снизить свои издержки.

У вас уже есть продажи в России?

Пока нет.

Кто сейчас ваши конкуренты на российском рынке? С кем вы будете бороться за место под солнцем на российском рынке?

TRUMPF, Concept Laser, EOS, а в принципе, все производители, которые используют технологию SLM. ■

Step into the digital reality

25-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ТЕХНОЛОГИЙ
ОБРАБОТКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА

23 – 26 ОКТЯБРЯ 2018
ГАННОВЕР, ГЕРМАНИЯ

- Листовой металл, трубы, профили
- Перемещение и транспортировка
- Формовка
- Готовые изделия, комплектующие, монтажные модули
- Сепарация, резка
- Сборка, сварка
- Обработка гибкого листового металла
- Обработка труб и профилей
- Многослойные или композиционные материалы
- Обработка поверхности
- Инструменты, штампы
- Системы CAD/CAM/CIM / обработка данных



Моделирование дефектов аддитивного производства

Аннотация

Разработка технологии селективного лазерного спекания (СЛС) порошков основывается на длительных и дорогостоящих экспериментальных пробах и ошибках. Однако если для этой цели можно применить моделирование, то процесс проверки производственной технологии ускоряется, а стоимость производства может быть значительно снижена. В данной статье рассматриваются численные подходы, описывающие процессы СЛС, в том числе дефекты, которые могут возникнуть при производстве.

Введение

Технология СЛС относится к аддитивному типу производства изделий, когда происходит нанесение очень тонких слоев металла друг за другом. Источник тепла плавит металлический порошок в определенных областях порошкового слоя. Эти области затвердевают, а нерасплавленный порошок удаляется в конце процесса. Таким образом получается, что технология СЛС охватывает шкалу размеров различных порядков: диаметр частиц порошка равен 10–100 микрон, а общий путь перемещения лазера составляет несколько километров за весь процесс. Лазер воздействует на порошок несколько микросекунд, а время выращивания целого изделия может достигать нескольких дней. Поэтому для корректного прогнозирования свойств и дефектов конечного изделия необходимо иметь возможность моделировать СЛС как

на микро-, так и на макроуровне. Однако попытка развивать все физические аспекты в одной модели является чрезмерно дорогой с точки зрения вычислительной техники, что делает необходимым разработку мультимасштабных моделей.

Платформа для мультимасштабного и мультифизического моделирования

Исходя из вышеописанных сложностей в решении задач моделирования СЛС, был выбран подход, предусматривающий разделение данной задачи на три категории по размерной шкале: микро-, макро- и мезо-. Микро-модель характеризует зону расплава в пределах длин от микрон до миллиметров, что обеспечивает анализ дефектов, соизмеримых с размером частиц порошка, таких как непролавы, пористость и шероховатость поверхности. На рис. 1 приведены изображения, показывающие расплавление заново нанесенного порошкового слоя. Исследуется один участок длиной около 1 мм. Размер пятна лазера составляет 80 мкм, мощность лазера — 100 Вт, скорость

сканирования — 1000 мм/с. Расчетная модель учитывает излучение и поглощение энергии, изменение фаз, теплопередачу и все три термодинамические составляющие, а также температурно зависимое поверхностное натяжение.

Технология СЛС относится к процессам с высокой склонностью к пористости. Поры образуются из газа, доступного в камере выращивания и находящегося между частицами порошка и образующегося в процессе испарения металла. Наличие небольших пузырьков напрямую зависит от условий потока расплава. С помощью микромоделей был проведен расчет для определения влияния

Рис. 1. Процесс плавления при нанесении нового слоя

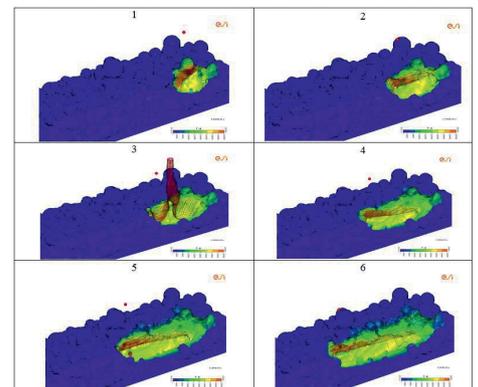


Рис. 2. Вид сбоку на затвердевший слой. Расчет показывает наличие пористости и трещин

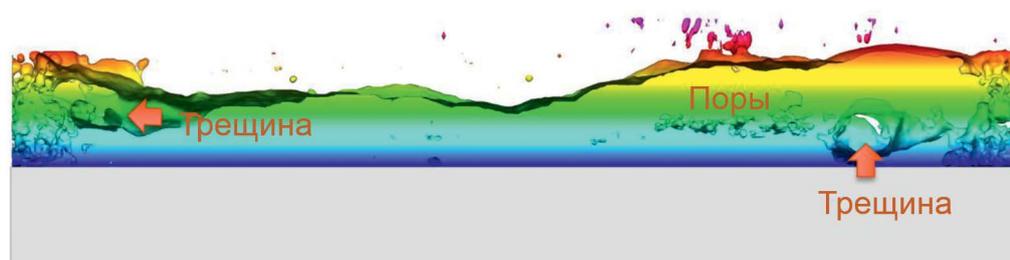
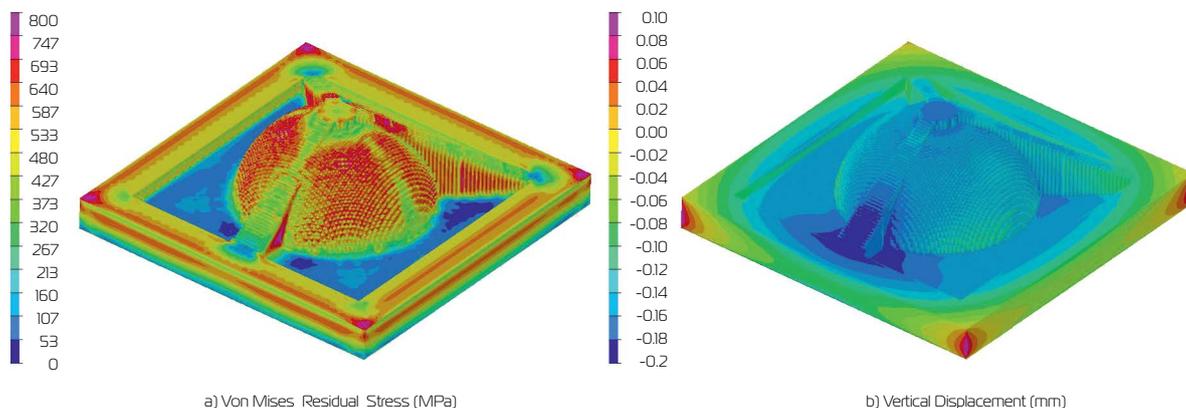


Рис. 3. Распределение напряжений и короблений в заготовке



неравномерного распределения в слое порошка, полученного в результате дефектов предыдущих слоев, на конечное качество изделия (рис. 2). Параметры обработки были отрегулированы в соответствии с определенной толщиной слоя порошка в центральной области для оптимального затвердевания порошка.

Макромодель предназначена для решения задач в размерах целой заготовки и используется

для расчета короблений изделия в процессе производства, предоставляя важную информацию о технологичности (рис. 3). Макромодель также прогнозирует деформации и остаточные напряжения. Мезомасштабная модель предоставляет необходимую информацию о свойствах материала.

Заключение

В статье было дано описание платформы для мультимасштаб-

ного и мультифизического моделирования, которая позволяет описывать дефекты как на микроуровне (распределение порошка в слое, плавление слоя), так и на макроуровне (коробление полноразмерной заготовки). Было показано, что числовые модели способны прогнозировать технологичность, а также конечную форму изделия. ■



**Форум ESI Group в России,
Санкт-Петербург,
13 и 14 сентября 2018.**

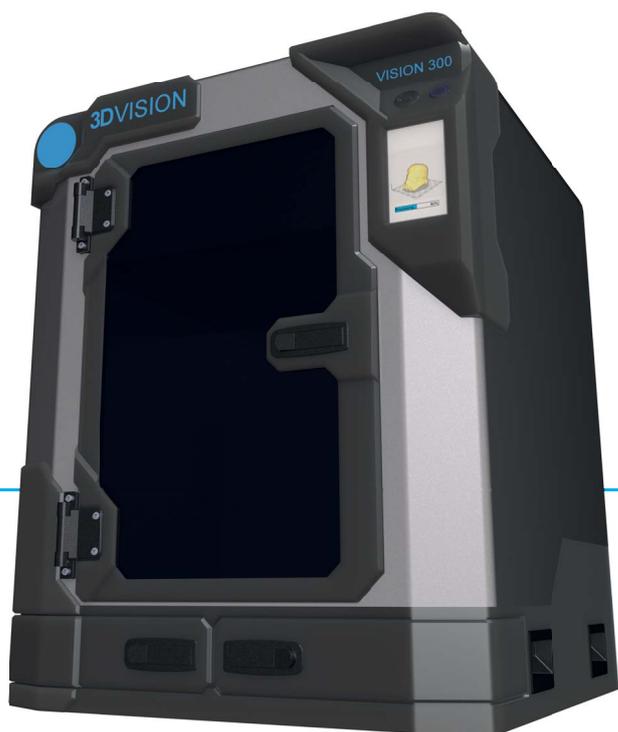
Площадка для обсуждения современных задач производственного предприятия и путей их решения:

- Снижение веса конструкции - композиционные и мульти-материалы, аддитивные технологии производства.
- Уменьшение количества испытаний и брака - системы моделирования технологических процессов литья, сварки, штамповки с учетом модели материала.
- Аналитика больших данных в разрезе промышленного предприятия.
- Превентивный ремонт и оптимизация обслуживания на базе технологий Гибридного двойника изделия и виртуального прототипа.

Подробнее на www.esi-group.com/ru

+7 343 385 85 08

ESI Group Россия



VISION 300 — первый профессиональный принтер для печати инженерными пластиками у вас дома

- Зона печати — 300×300×300 мм
- Печать двумя материалами
- Термостатная рабочая камера, +80°C
- Оригинальная конструкция печатающей головки
- Электроника собственного производства на основе ARM Cortex-F4 и Intel Pentium G
- Интерфейс Ethernet для поддержки сетевого управления

Вот уже год команда наших разработчиков трудится над созданием собственного 3D-принтера, способного выдавать качественные изделия методом FDM-печати. На данный момент рынок переполнен низкокачественным оборудованием, благодаря которому многие компании знают о 3D-печати как о чем-то, не очень подходящем под их задачи. И напротив, высококачественная 3D-печать в понимании многих людей находится где-то «там», за границей, а к нам попадает только за огромные деньги и, соответственно, недоступна непрофильным предприятиям.

Действительно, в сегменте полупрофессиональных FDM-принтеров на сегодняшний день в мире создано достаточно устройств, удовлетворяющих тем или иным потребностям заказчика.

Тем не менее спрос на подобное оборудование сдерживается его высокой стоимостью. Отечественные разработки по данному виду оборудования ведутся, но пока что представлены на рынке

слабо. Работа с китайскими поставщиками влечет за собой ряд проблем: неудовлетворительное качество печати, нестабильность в работе оборудования, сложность технического обслуживания и ремонта и т. п.

Отечественных производителей серийных **промышленных FDM 3D-принтеров** на сегодняшний день нет. Важно понимать разницу между любительским и профессиональным оборудованием. Есть производство настольных принтеров, но они больше подходят для задач частных пользователей или мелких фирм, занимающихся в основном декоративным прототипированием.

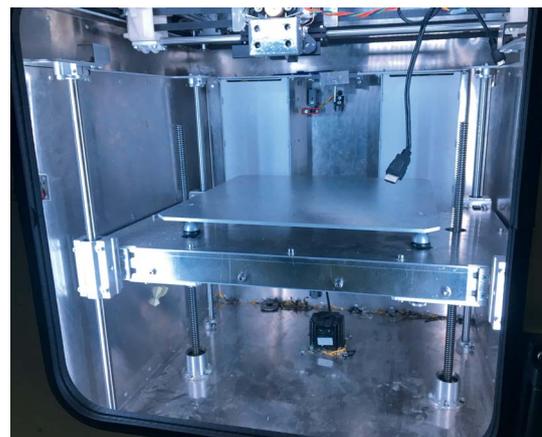
Команда проекта стремится создать промышленное устройство 3D-печати с поддержкой индустриального интернета. Это необходимо как для использования сети принтеров в масштабе фабрики будущего, так и для нормально функционирующей технической поддержки и администрирования устройств среди частных пользователей. Для этого разработчики

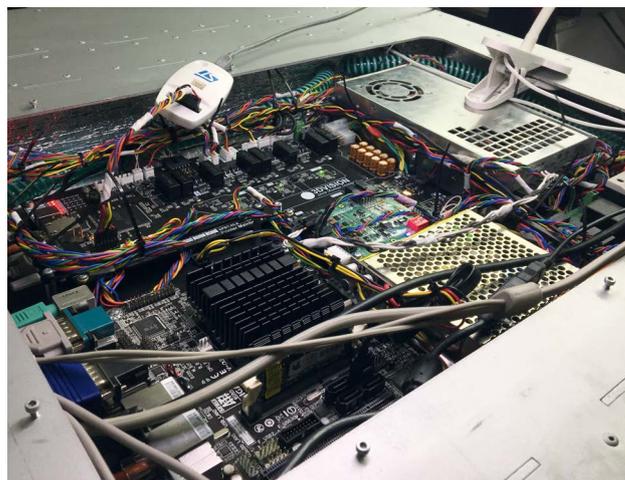
отошли от использования архитектуры китайской электроники и создали собственные платы управления, драйвера приводов и программное обеспечение. Для российского рынка 3D-техники разработка является инновационной по следующим показателям:

1. Удаленная самодиагностика и сбор информации о неполадках в работе.

2. Значительное снижение зависимости от импортных ком-

Внутреннее пространство принтера VISION300 в процессе отладки





плектующих в контексте технической поддержки.

3. Промышленное качество 3D-печати инженерными пластиками в термостатной прогреваемой камере.

4. Функция удаленного сетевого контроля за процессом для оптимизации логистических процессов и эффективного использования производственных мощностей.

5. Доступная ценовая политика.

Причем реализация пунктов 1–4 принципиально важна для разработчиков.

Отдельно хотелось бы упомянуть печатающую головку, позволяющую печатать в условиях повышенной температуры (80°C). Для достижения качественной экструзии охлаждение термобарьера производится за счет воздуха, забираемого снаружи, а сам термобарьер уменьшен до небольшого перехода горячо/холодно, что предотвращает залипание в нем пластика, устраняя тем самым одну из основных проблем большей части доступных на рынке принтеров.

Сотрудники компании 3D Vision собрали большой объем информации от своих клиентов по существующим проблемам в области прототипирования.

Первое — это, несомненно, качество и удобство печати. Промышленный FDM-принтер немыслим без прогреваемой рабочей камеры, позволяющей получать модели, которые не коробит и не ведет. Пока что ни один отечественный 3D-принтер такой функции не имеет, устройства оснащены только нагревательным столом. Разработанная термостатная камера позволяет поддерживать внутри себя температуру 80°C на протяжении всего процесса печати.

Второй значимой проблемой является сервисное обслуживание. Для покупателя промышленного оборудования важно, чтобы аппараты работали без нареканий, а в случае неисправности была возможность быстрой диагностики и ремонта устройства.

На реализацию этой функции в принтере VISION300 делается особый упор. Разработчикам важно удаленно иметь полное представление о работоспособности всех узлов, входящих в состав принтера. Каждый узел является частью общей системы, а не обособленно прикрепленным к САУ (системе автоматического управления). Все нагреватели, датчики, подсветки и вентиляторы должны быть предусмотрены изна-

чально. Необходимо определять, подключен ли тот или иной узел, и своевременно замечать, когда он не в штатном состоянии или вообще отключен от системы. При этом нужно учитывать тот факт, что конечный пользователь может захотеть внести свои изменения в систему, и здесь стоит задача не просто не предоставить ему эту возможность без серьезного вмешательства в САУ (и каких-либо гарантий дальнейшей работоспособности в целом), а сделать так, чтобы даже не было необходимости этим заниматься.

Еще раз следует отметить тот факт, что теперь при планировании производства, логистике и диагностике систем промышленное 3D-оборудование перестает быть обособленной единицей, а становится частью централизованной управляемой системы. ■

 **3D VISION**
Центр Объемной Печати

Услуги: mail@3dvision.su
Поставки оборудования и расходных материалов: info@3dvision.su
Тел.: +7 (812) 385-72-92
+7 (495) 662-98-58, 8 (800) 333-07-58
<https://3dvision.su>
<https://www.instagram.com/3dvision.su>
<https://vk.com/3dvisionsu>

АО «ПОЛЕМА»: передовые разработки для сурового климата и агрессивных сред

при поддержке



«ПОЛЕМА» (г. Тула, входит в промышленно-металлургический холдинг) активно расширяет номенклатуру своей продукции, которая может применяться при экстремальных температурах — от -70°C до 1100°C . Постоянное увеличение требований высокотехнологичных отраслей, таких как авиакосмическая промышленность и двигателестроение, а также освоение Арктики требуют применения новейших материалов. Помимо самой возможности создания таких материалов необходимо учитывать и их себестоимость — она должна быть ниже, чем у традиционных материалов, чтобы ускорить развитие смежных отраслей.

Эти условия соблюдены на предприятии «ПОЛЕМА», инвестиционные проекты которого позволяют создавать новые продукты по конкурентной цене.

С 2017 г. при поддержке Фонда развития промышленности (ФРП) реализуется проект по производству металлических высоколегированных порошков для наплавки, напыления и аддитивных технологий. Запущено передовое оборудование, благодаря которому осваивается выпуск новых марок порошковых композиций, соответствующих мировым стандартам качества по сферичности частиц, грансоставу, чистоте материала.

В начале текущего года «ПОЛЕМА» представила новые материалы, которые показывают стабильность физико-механических характеристик при температурах, критичных для традиционных материалов. Среди наиболее востребованных разработок можно выделить следующие:

- **Порошковый суперинварный сплав** — отличается низким ТКЛР (температурный коэффициент линейного расширения). Изделия из порошкового суперинварного сплава не меняют своих геометрических размеров в широком диапазоне температур. Материал адаптирован для производства деталей и узлов машин и конструкций.

- Для изделий, используемых при экстремально низких температурах, был разработан **порошковый аналог сплава ЭП 817**. Полученный материал выдерживает температуры до -70°C , сохраняя основные физико-механические свойства. Применим для создания коррозионностойких покрытий, например, для нагруженных деталей, работающих при низких температурах. Ведутся работы по определению оптимальных режимов 3D-печати из данного материала.

- **Инновационный материал на основе кобальта (марка КХ26Н9МЖВ)**, разработан для изготовления деталей и изделий, работающих при высоких температурах (до 1100°C). Он обладает хорошей устойчивостью к агрессивным средам и к абразивному износу. В зависимости от размера частиц возможно применение как для изготовления деталей и изделий традиционным методом порошковой металлургии, так и для наплавки и напыления.

- **Сплавы высокой энтропии марки ПР-КХ23Н26** — новейшая разработка АО «ПОЛЕМА». Эти материалы обладают уникальной коррозионной стойкостью, способны сохранять прочность и гибкость даже при сверхнизких температурах, а также устойчивый фазовый состав при термомеханической обработке. Сплав подходит для производства изделий различными методами, — наплавкой и напылением, с помощью аддитивных технологий, спеканием и т. д.

На «ПОЛЕМА» действует собственный научно-исследовательский центр. Разработки предприятия позволяют существенно улучшить потребительские свойства и снизить стоимость конечных изделий. «ПОЛЕМА» принимает участие в федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» совместно с НИТУ МИСиС. С этим институтом ведется разработка порошкового материала CompoNiAl-M5-3 для 3D-печати лопаток турбинных двигателей и отрабатываются режимы аддитивного производства и финишной термической обработки (ГИП).

Реализация масштабных инвестиционных проектов и мощная исследовательская лаборатория позволяют АО «ПОЛЕМА» быть в авангарде создания продуктов для аддитивных технологий. «ПОЛЕМА» готова поставлять продукцию для самых сложных условий, под нужды конкретного заказчика, а также участвовать в решении задач по внедрению эффективных аддитивных технологий на российских предприятиях.

АО «ПОЛЕМА» — один из ведущих мировых производителей изделий из хрома, молибдена, вольфрама, металлических порошков и композиционных материалов. С 2014 г. на заводе освоены выпуск порошков для 3D-печати и МИМ-технологий. В настоящее время «ПОЛЕМА» — крупнейший в России поставщик порошков для 3D-печати.

АО «ПОЛЕМА» может производить до 3000 т различных металлических порошков в год. Это уникальное предприятие, где почти 60-летний опыт работы в порошковой металлургии сочетается с самыми передовыми технологиями. Номенклатура металлических порошков на никелевой, кобальтовой, железной, титановой, хромовой и других основах, изготавливаемых компанией, превышает 200 наименований. Портфель клиентов включает отечественные и зарубежные компании. Порошки производства предприятия «ПОЛЕМА» широко используются для 3D и МИМ-технологий, наплавки, напыления, в том числе с целью защиты или ремонта и восстановления рабочих поверхностей различных типов технологического оборудования.



ПМХ

ПОЛЕМА

Металлические порошки

Более 250 видов для наплавки, напыления, 3D и MIM технологий

Хром

Порошки, чешуйки, пластины, распыляемые мишени, испаряемые катоды

Чистота хрома 99.95-99.99 %

Композиционные материалы

Распыляемые мишени, испаряемые катоды, контакты

Тугоплавкие металлы

Листы, пластины, лодочки, прутки, электроды

АО «ПОЛЕМА»

Т: +7(4872) 25 06 70 Ф: +7(4872) 25 06 78
300016, Россия, г. Тула, ул. Пржевальского, д. 3

www.polema.net

Применение Generative Design для оптимизации конструкции кронштейна авиадвигателя

Дмитрий Шестаков, компания «ПОИИТ»

Разговоры о порождающем проектировании идут уже давно. Мы видим все новые и новые примеры реального воплощения этой технологии в новостных лентах, научных статьях и социальных сетях. Оно тесно связано с аддитивными технологиями 3D-печати. Сегодня ими уже никого не удивить, но, например, пять лет назад мало кто мог представить, что напечатанные детали можно использовать в автомобильной промышленности и самолетостроении. Тем не менее такие примеры уже есть, и их эксклюзивность превращается в нечто привычное. General Motors анонсирует использование напечатанных деталей в своих автомобилях, Airbus оснащает самолеты легкими перегородками с бионическими вну-

тренностями, и даже компания Black&Decker ведет работу над созданием нового облегченного инструмента (рис. 1).

При возрастающей популярности аддитивных технологий логично, что программное обеспечение, позволяющее использовать порождающее проектирование, становится доступным рядовому конструктору, работающему с Fusion 360 или Netfabb. И если рассматривать Fusion 360, выходит, что высокотехнологичный инструмент для порождающего проектирования вы получаете по цене, сравнимой с годовой страховкой среднего автомобиля. А если принять во внимание все остальные возможности этого облачного продукта, получается почти даром.

В этой статье мы разберем простой пример разработки конструкции кронштейна авиационного двигателя с помощью приложения Generative Design (GD), недавно анонсированного Autodesk в качестве нового функционала Fusion 360 (рис. 2). Важно отметить, что «волшебная» кнопка GD доступна только счастливым обладателям подписки Fusion 360 Ultimate. При нажатии на нее вы скачиваете приложение GD, в котором и будут выполняться все манипуляции. Во Fusion же можно посмотреть готовый результат и, при желании, доработать полученную модель.

Последовательность действий напоминает алгоритм использования генератора форм в Inventor или Shape optimization во Fusion

Рис. 1. Применение бионического дизайна в различных изделиях

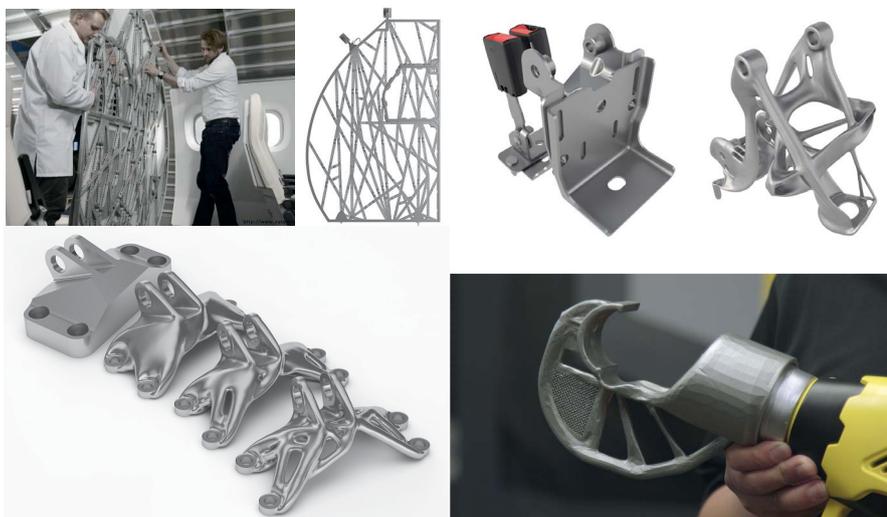


Рис. 2. Варианты конструкции кронштейна авиационного двигателя



360. Основное отличие заключается в том, что система сама выращивает форму детали в зависимости от поставленных задач и введенных параметров. Необязательно использовать какой-то прототип для его дальнейшей доработки, как это происходит при топологической оптимизации, например, в Inventor.

Прежде всего необходимо проанализировать конструкцию, задать цель, условия и нагрузки. В данном случае целью будет минимизация веса детали при сохранении ее прочности. Предположим, что кронштейн лежит на бесконечно жесткой пластине, при этом штифт и болты также будут бесконечно жесткими. Осталось определиться с нагрузками, возможными материалами, мини-

мальной толщиной модели и коэффициентом прочности, после чего можно приступать к работе в приложении (рис. 3).

После запуска приложения необходимо создать проект, который хранится в службе A360, а затем загрузить геометрию, которая будет использоваться как ссылаящаяся. Это могут быть части окружающего узла. Например, двигателя, как в нашем случае. Autodesk Generative Design импортирует достаточный список форматов. Вся геометрия помещается в браузер.

После импорта данных необходимо указать, какие функции будет выполнять определенная геометрия. Сначала выберем неизменяемую геометрию — к ней отнесем цилиндрические части под

болты и штифт. Затем обозначим геометрию, ограничивающую движение кронштейна, — все то, что не было выбрано в первый раз. Отмеченная геометрия окрашивается в разные цвета и помещается в соответствующие папки браузера (рис. 4). Также есть возможность выбрать исходную деталь, если бы она была импортирована в сборке.

Следующий шаг — наложение ограничений (рис. 5). В качестве зафиксированной геометрии выбираем цилиндрические поверхности под болты. Доступен еще один тип ограничений — без трения. Затем на геометрию можно наложить нагрузки, такие как давление, сила и момент. В нашем случае мы задаем несколько сил, выбирая одновременно два коль-

Рис. 3. Определение нагрузок и сил, действующих на модель

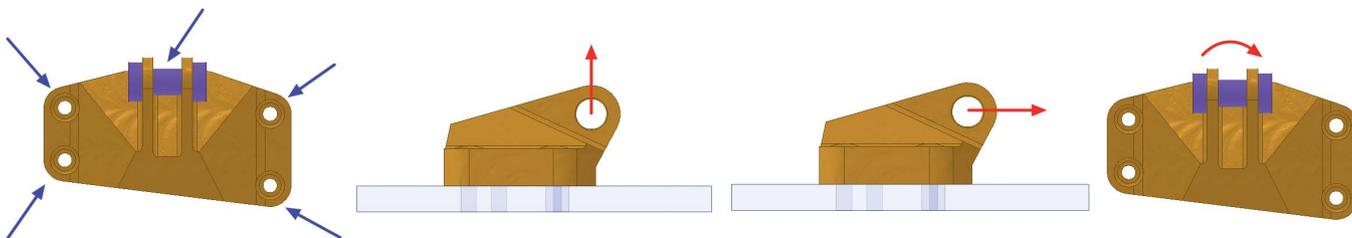


Рис. 4. Определение функций выбранной геометрии

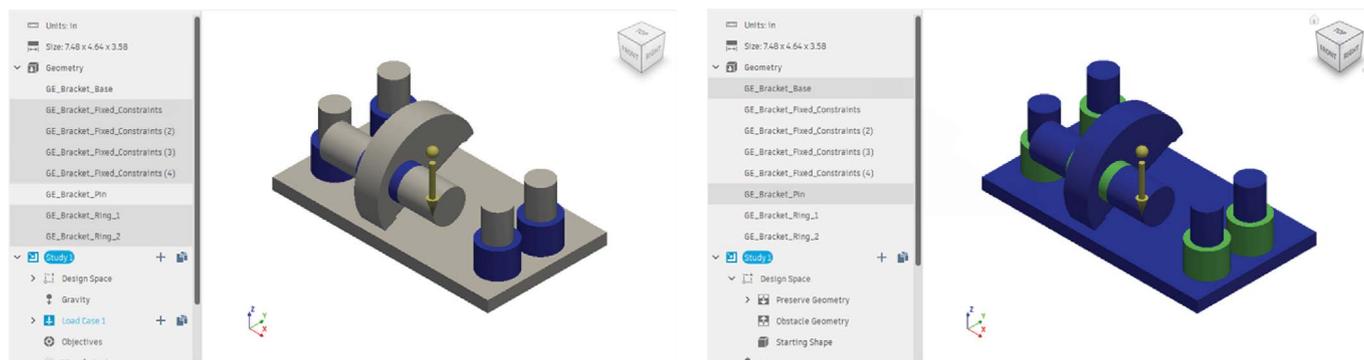
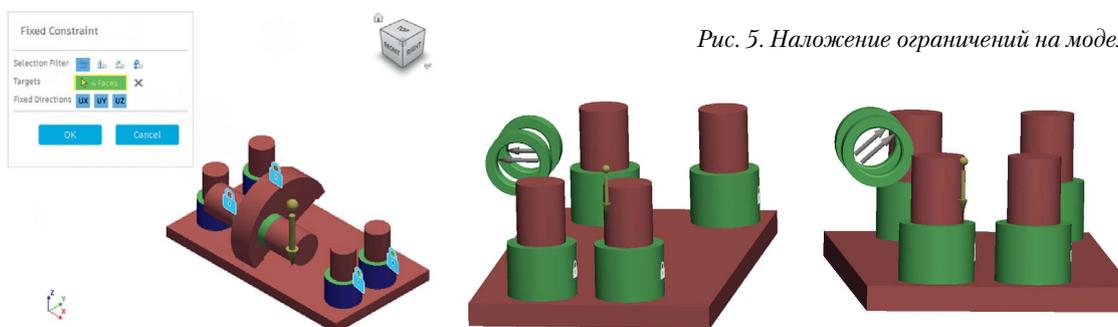


Рис. 5. Наложение ограничений на модель



ца и указывая значение и направления по разным осям. Клонировать полученный вариант несколько раз и затем меняем направления и значения нагрузок. В последнем варианте задаем направления нагрузки в противоположные стороны, имитируя момент.

Теперь необходимо выбрать цель дизайна (рис. 6а). Как уже было сказано ранее, мы хотим минимизировать вес детали при заданном коэффициенте прочности. При желании основной целью можно выбрать максимальную жесткость, в этом случае необходимо добавить желаемый вес модели.

Затем определим тип производства детали (рис. 6б). Тут в качестве метода будет логично выбрать аддитивное производство. В этом случае потребуется указать параметры трехмерной печати: минимальную толщину

и угол нависания. Перед генерацией вариантов необходимо выбрать материалы из предоставленной разработчиком библиотеки. Конечно же, есть возможность дополнить ее пользовательскими материалами. Теперь все готово для того, чтобы нажать заветную кнопку Generate!

В процессе генерации вы можете наблюдать, как изменяется форма деталей, приходя в соответствие с заданными условиями (рис. 7). По завершении процесса вы можете отсортировать детали по разным критериям, например массе, или отсеять те, которые не соответствуют вашим требованиям, а также просмотреть процесс трансформации каждой конфигурации в ходе расчета. Отображение результатов регулируется настройками: в виде списка, диаграммы, таблицы с подробными характеристиками и т. д.

При желании можно подробно рассмотреть варианты в отдельном графическом окне, увидеть, как распределена нагрузка, а также сравнить несколько полученных моделей. И наконец, финальный шаг — экспорт выбранной модели в формат SAT или STEP (рис. 8).

Важно отметить, что процесс экспорта, как и генерации, затрачивает ваши индивидуальные «облачные кредиты» (cloud credits), которые рано или поздно заканчиваются. В дальнейшем потребуются дополнительное приобретение, поскольку стартовое количество равно всего 100 единицам.

Надеемся, эта статья смогла показать принципы, порядок и простоту работы с функциональностью порождающего проектирования Autodesk Generative Design в решениях Fusion 360 и Netfabb. ■

Рис. 6. Выбор критериев для оптимизации и типа производства

Рис. 7. Варианты генеративного дизайна, созданного искусственным интеллектом

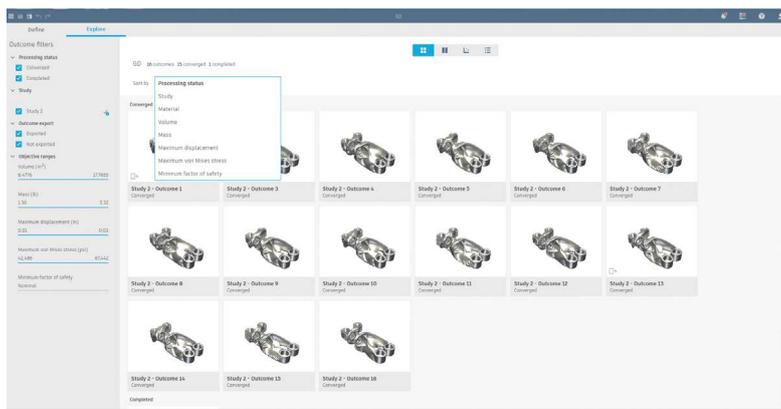
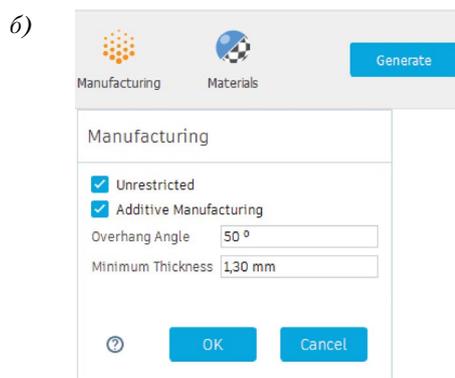
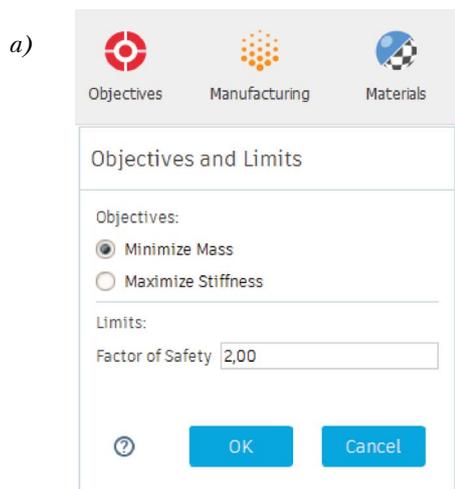
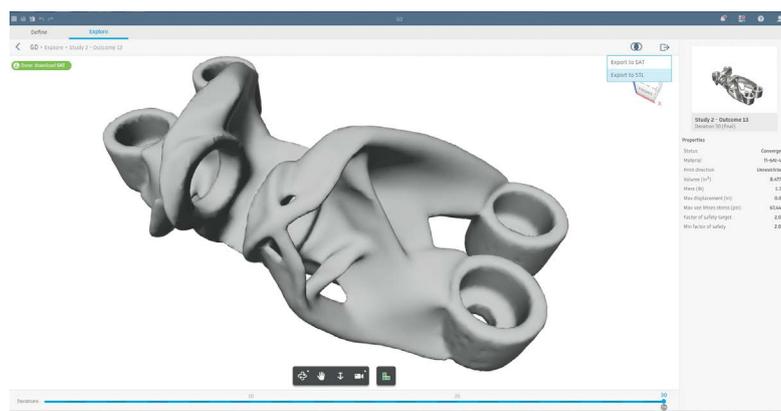


Рис. 8. Экспорт выбранной модели в необходимый формат



АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТОВ

А.В. Чесноков, В.А. Старцев, В.Н. Андреев, В.С. Прокопов, *es_ut@bk.ru*

На протяжении последних четырех десятилетий в увеличивающемся объеме растет применение полимерных композиционных материалов (ПКМ). ПКМ позволяют снизить массу конструкций при обеспечении требуемого уровня прочности, химической стойкости, биосовместимости. В последние пять лет наметилась тенденция к разработке экономически эффективных технологий получения ПКМ. Ключевой вклад в экономическую эффективность получения ПКМ вносят новые высокоскоростные автоматизированные технологии формообразования и ускорение процессов отверждения полимерной матрицы.

К сожалению, в России для получения ПКМ применяют в основном термореактивные связующие, которые позволяют получать ПКМ с достаточно высокими характеристиками, но технологический цикл получения одной детали достаточно длинный — от 4 до 18 часов. Применение термопластичных полимеров требует специализированного оборудования и оснастки, отличного от оборудования, приспособленного для работы с термореактивными полимерами (эпоксидными, фенольными и т.д.), но позволяет получать ПКМ за минимальное технологическое время (до 5 минут на 1 деталь). При этом свойства ПКМ с полиэфиркетоновой (ПЭЭК) матрицей близки к свойствам ПКМ с термореактивными матрицами. Применение термопластичной матрицы расширяет возможности изготовления ПКМ

с применением аддитивных технологий.

Специалистами инженерингового центра «Высокотемпературные композиционные материалы» ГБОУ ВО МО «Технологический университет» (г. Королев) в 2016 году реализован грант «Разработка технологических основ получения нитяного термопластичного препрега на основе углеродного волокна и полиэфиркетона для аддитивных технологий производства высокотемпературных композиционных материалов». Была разработана не имеющая российских аналогов технология получения нитяного термопластичного препрега (НТП) на основе углеродного волокна и полимера для использования его в аддитивных технологиях. НТП представляет собой готовый для переработки полуфабрикат — леску, состоящую из непрерывного углеродного волокна, пропитанного термопластичным полимером. В роли термопласта могут использоваться различные полимеры, в том числе РР, РЕЕК, ABS.

Отличительной особенностью разработанной технологии от известных аналогов является внедрение «сухого» углеродного волокна в полимерный материал при печати, что не позволяет в полной мере использовать прочность армирующего волокна, а создание полноценной монолитной конструкции с качественной пропиткой армирующего материала полимером.

Для получения НТП с качественной пропиткой межфиламент-

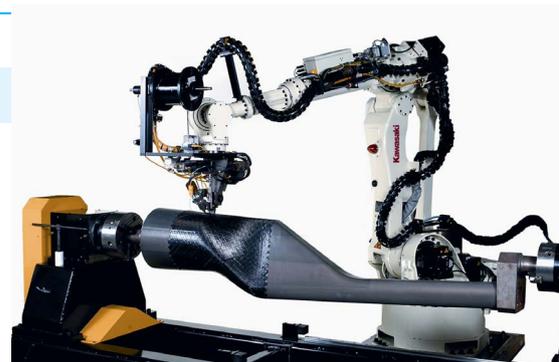


Рис. 1. Выкладочная головка производства компании Automated Dynamics, США

ного пространства углеродного волокна была разработана оснастка, на которой подобран оптимальный вариант площади и расположения сопел в узле пропитки. Протестирована возможность переработки полученного НТП на 3D-принтере собственной сборки.

В настоящий момент отрабатывается технология создания НТП, предполагающая нанесение порошка/гранул полимера на предварительно прогретое и плоское углеродное волокно, в структуру которого затем горячими каландрами будет впрессовываться полимер. Подобная технология позволит меньше травмировать жгут, а также получать не только леску для печати, но и ленты НТП разной ширины, в зависимости от ширины нитки и степени ее площади. Применение лент предполагается в автоматизированной выкладочной технологии. Начато проектирование выкладочной головки, аналог представлен на рис. 1.

Для прогнозирования свойств конструкций из ПКМ, полученных по аддитивной технологии, в ООО Научно-технический центр «АПМ» разработан специальный модуль конечно-элементного анализа. ■

Лазерное выращивание металлических и металлокерамических изделий

А.Г. Маликов, А.М. Оришич

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, laser@itam.nsc.ru

Оптимизация лазерной наплавки позволяет получить слой быстрорежущей стали любой толщины, совместить наплавку и термическую обработку в одном процессе, в три раза увеличить износостойкость поверхности изделия по сравнению с быстрорежущей сталью.

Введение

Аддитивные технологии (АТ) широко применяются во многих отраслях промышленности и продолжают развиваться. С помощью АТ возможно путем послойного наращивания материала изготовление изделий различной формы и конфигураций. Для улучшения характеристик изделий используют металломатричные композитные покрытия, состоящие из смеси порошков разных металлов с различной

по содержанию и химическому составу керамикой [1, 2]. При лазерной наплавке порошковой смеси методом АТ возможно образование различных дефектов, таких как трещины, поры и т.д., что снижает механические свойства изделий. К настоящему времени не разработаны методы определения оптимальных параметров наплавки, которые обеспечивали бы низкую шероховатость, монолитность и однородность структуры. Поэтому поиск оптимальных режимов (мощности лазерного излучения, скорости сканирования, шага сканирования, размера пятна и других) для данного материала или порошка производится эмпирически.

Целью работы является исследование влияния параметров лазерного воздействия на форму и характеристики получаемых наплавленных треков. Основная задача — проведение оптимизации процесса лазерной наплавки для получения монолитной наплавленной структуры с минимальным абразивным износом.

Метод лазерной наплавки для самофлюсующегося порошка ПГ-СРЗ

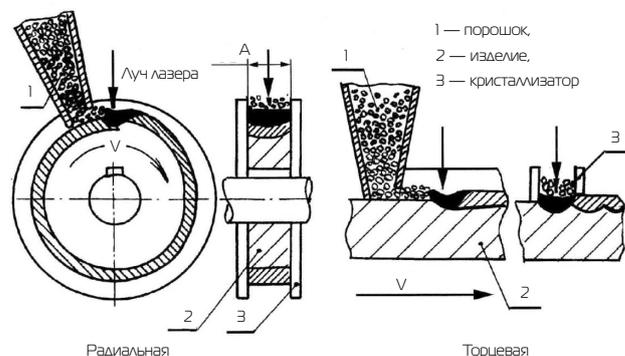
При наплавке никель-хромового износостойкого покрытия оптимальные режимы наплавки достигались при мощности лазерного излучения 1,65 кВт. Луч лазера сканировал по поверхности поперек движения заготовки с частотой 62 Гц, скорость движения луча составляла 3,2 м/с, размах сканирования 5 мм (рис. 1). При этом скорость подачи заготовки состав-

Лазерный инновационно-технологический центр «Оптикон» при Институте теоретической и прикладной механики СО РАН
весь спектр услуг по лазерным технологиям:

- резка
- сварка
- термоупрочнение
- наплавка

Новосибирск, 630090, ул. Институтская, д. 4/3
тел: +7 (383) 330-38-34 kvant@opticon.su www.opticon.su

Рис. 1. Схема наплавки



ляла 1,2 м/мин. В качестве технологического оборудования использовался автоматизированный лазерный технологический комплекс (АЛТК), созданный в Новосибирске на базе CO_2 -лазеров, разработанных в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН.

В результате концентрированного теплового воздействия порошковый сплав полностью расплавляется и сплавляется с предыдущим нанесенным слоем, образуя покрытие. Структура полученного покрытия дендритоячеистая (рис. 2). Тонко дифференцированная эвтектическая составляющая выделяется по границам дендритных ячеек. Выделения отдельных первичных карбоборидов не наблюдается. Твердый раствор имеет параметры, свидетельствующие о повышении концентрации в нем растворенных элементов. Это косвенно подтверждается в данной работе повышением микротвердости твердого раствора на 10–12% по сравнению с твердостью, получаемой при объемной термической обработке.

Лазерная наплавка быстрорежущей стали

Применение для обработки лазерного излучения мощностью около 2 кВт позволяет создавать на поверхности плотность мощности 2 МВт/см². Это дает возможность управлять градиентом температуры и локально воздействовать на зону обработки. Сочетание дозированной подачи порошковой стали типа Р6М5, защитных газов и лазерного излучения с заданным распределением интенсивности, сканирующего по поверхности обработки, позволило произвести регулируемый градиентный нагрев с целью получения тонкодисперсного распределения карбидов в первичной структуре.

Возможности повышения эксплуатационных свойств быстрорежущих сталей за счет их легирования очевидно исчерпаны, хотя такие попытки продолжают. Перспективным представляется путь совершенствования технологии за счет управления процессами кристаллизации быстрорежущей стали (например, [3]). Скорость нагрева поверхности дета-

лей излучением лазера такова, что очередность фазовых переходов в процессе расплавления структурных составляющих износостойких сплавов меняется. Эта особенность лазерной обработки представляет интерес в связи с возможностью совместить в одном технологическом процессе аддитивное наплавление материала и его термическую обработку. Карбиды вследствие более низкой теплопроводности плавятся позднее твердорастворной составляющей. Это дает возможность использовать лазерное излучение для дробления сеток карбидов и карбидов эвтектик и эвтектоидов.

В данной работе в качестве присадки использовали порошок из стали типа Р6М5 (0,8% С; 3,9% Cr; 6,1% W; 4,9% Mo; 1,8% V), который распределялся перед лазерной обработкой на поверхности основы без какого-либо связующего с помощью специального дозатора-кристаллизатора (рис. 2). Основой служили листовые заготовки в виде диска толщиной 2 мм, изготовленные методом лазерной резки из стали 65Г (0,63% С; 1,1% Mn; 0,32% Si) после полной закалки и отпуска на твердость 45 HRC. Заготовка получала движение подачи V , а луч лазера сканировал поперек направления подачи с амплитудой A . Градиент температуры в изделии регулировали, изменяя мощность излучения, скорость подачи V , толщину укладываемого слоя порошковой шихты, а также амплитуду и шаг сканирования. Наплавленный слой получали на боковой поверхности путем торцевой наплавки по краю заготовки при ее угловой подаче в плоскости, перпендикулярной оси лазерного луча, а также на цилиндрической образующей диска (радиальная наплавка) при радиальном направлении лазерного пучка относительно заготовки. Оптимальные режимы наплавки достигались при мощности лазерного излучения 1,5 кВт.

Исходный порошок с частицами диаметром до 150–170 мкм имеет структуру, характерную для порошковой стали, полученной методом распыления жидкой фазы, — дендриты твердых растворов с дисперсными выделениями карбидов. Оплавленные

Рис. 2. Микроструктура покрытия ПГ-СРЗ, оплавленного лучом CO_2 -лазера

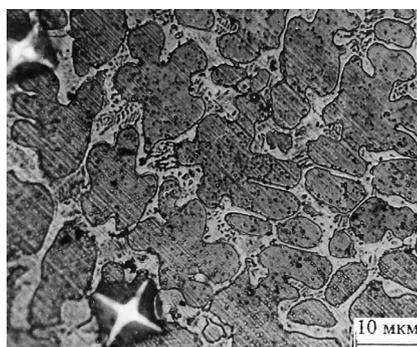


Рис. 3. Металлографический анализ однослойной наплавки стали Р6М5. Распределение карбидов. Масштаб 1:1000

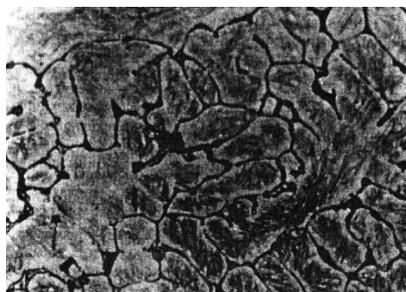
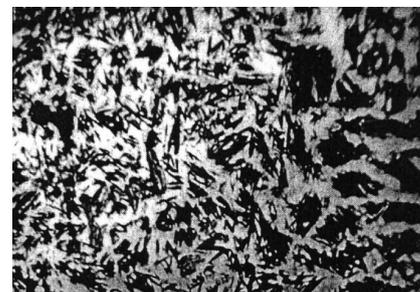


Рис. 4. Металлографический анализ наплавки Р6М5. Типичный мартенсит



зерна при охлаждении становятся центрами роста дендритных кристаллов наплавки (рис. 3). При увеличении толщины порошкового слоя, подвергаемого лазерной обработке, глубина проплавления основы уменьшается. При толщине обрабатываемого слоя более 2 мм появляются не сплавленные с основой участки, разделенные с ней пленкой окислов. Измерение микротвердости структурных составляющих наплавленного слоя показали, что на границе с наплавкой температура зоны лазерного воздействия обеспечивает гомогенизацию аустенита и последующую его закалку на мартенсит с микротвердостью до 11 ГПа.

Структура наплавляемой стали Р6М5 имеет дендритное строение (рис. 3). В сечениях ветвей дендритов высоколегированного аустенита располагаются кристаллы мартенсита (рис. 4). Карбиды выделились в междендритном пространстве в виде эвтектических колоний, а также цепочками отдельных частиц, которые местами образуют сплошной каркас. Толщина полученного покрытия определяется назначением и видом наплавки. При необходимости наращивания покрытия возможна наплавка в несколько слоев. Полученный наплавкой слой имеет достаточно высокую твердость, однако неоднородное распределение карбидов в виде эвтектической сетки по границам дендритных ячеек не обеспечивает необходимой вязкости и трещиностойкости материала. Для диспергирования карбидной сетки производили лазерную обработку полученной наплавки с температурно-временными параметрами, обеспечивающими твердожидкое состояние наплавленного слоя. Структура наплавленной стали Р6М5 во фронте движения лазерного луча и после повторной лазерной переплавки представлена на рис. 5. Во фронте первично переплавленного участка наблюдается увеличение травимости, обнаруживаются микропоры, имеются неметаллические включения. После вторичной переплавки карбидная эвтектика дробится на отдельные частицы. Общее количество карбидной фазы уменьшается. Одновремен-

Рис. 5. Микроструктура наплавленной стали Р6М5 во фронте движения лазерного луча и после повторной лазерной переплавки

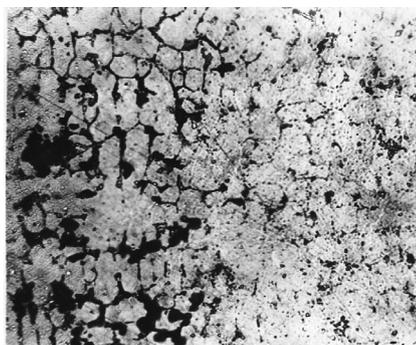
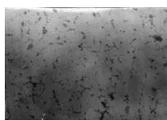


Рис. 6. Микроструктура покрытия в несколько слоев — высоколегированная аустенитно-мартенситная смесь с дисперсионным включением карбидов



но увеличивается легированность твердого раствора. По сути, лазерная переплавка полученного слоя представляет собой разновидность зонной очистки. В зоне лазерного влияния происходит повторная закалка, развиваются диффузионные процессы на границе с наплавленным слоем. Все это способствует улучшению механических свойств получаемого металла.

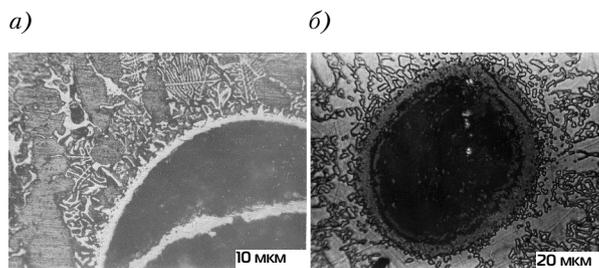
Толщина аддитивно получаемого материала определяется назначением создаваемой детали. При необходимости наращивания покрытия возможна наплавка неограниченного количества слоев. Толщина повторного и последующих слоев выбиралась около 80% от глубины проплавления стали Р6М5. Нижние слои при послойной наплавке попадают в ЗЛВ. Выбранный режим повторного лазерного воздействия на ранее наплавленную сталь Р6М5 обеспечивает благоприятные изменения в распределении карбидов. Вследствие оплавления сетка карбидов разделяется на отдельные частицы (рис. 6), происходит коагуляция и растворение карбидов. Это, в свою очередь, увеличивает легированность аустенита, образующегося при последующей наплавке.

Послойным наращиванием удалось получить наплавленный слой любой толщины без каких-либо макродефектов с твердостью 63–64 HRC. После стандартного трехкратного отпуска при 560°C твердость наплавленной стали Р6М5 увеличивается до 66–67 HRC.

Упрочнение никель-хромовых самофлюсующихся сплавов карбидом вольфрама

Как показано ранее, при испытании наплавленного самофлюсующегося сплава ПГ-СРЗ не наблюдалось охрупчивающего влияния сетки карбоборидов по границам дендритных ячеек. Было установлено, что увеличение доли твердых фаз в наплавленном покрытии снижает сопротивление ударно-абразивному изнашиванию. Структурные исследования показали, что это связано с выкрашиванием фрагментов покрытия по хрупкой карбидной сетке, выделившейся по границам дендритных ячеек. Однако, учитывая высокую твердость покрытия, можно ожидать высокой его из-

Рис. 7. Микроструктура наплавленного слоя самофлюсующегося никель-хромового сплава ПГ-10 Н-01 с 45% карбидом вольфрама



носостойкости при работе в массе абразивных частиц и трении о закрепленный абразив.

С учетом этих данных были составлены композиции наплавочных материалов из самофлюсующегося никель-хромового сплава ПГ-10 Н-01 и карбида вольфрама, который вводили в виде тонкодисперсного порошка и в виде сфероидизованных частиц релита — плавленного карбида вольфрама.

Оскольчатая форма зерен дробленого литого карбида вольфрама благоприятна при статической нагрузке, однако при работе с ударными, циклическими нагрузками такие включения способствуют возникновению микротрещин и выкрашиванию износостойкой наплавки. В данной работе исследована технологическая возможность получения износостойкого покрытия из смеси порошкового самофлюсующегося сплава со сферическим релитом. Частицы релита преимущественно сферической формы имеют диаметр 53–83 мкм, что по ГОСТ 21448–75 соответствует классу ОМ — «очень мелкий». Порошковая шихта составлялась из 55% самофлюсующегося порошкового сплава ПГ-10 Н-01 (С — 0,4%; Si — 2,6%; В — 2,0%; Cr — 13,5%; Ti — 0,1% Ni — основа) с добавлением 45% релита. Шихту укладывали на основу из стали 65 Г (0,63% С; 1,1% Mn; 0,32% Si) с помощью специального дозатора-кристаллизатора. Обработку слоя осуществляли лучом непрерывного CO₂-лазера номинальной мощностью 2 кВт с заглубленным фокусом. Оптимальные режимы наплавки соответствуют мощности лазерного излучения 1,65 кВт и скорости перемещения луча по поверхности 3,2 м/мин. Размах сканирования луча — 5 мм.

При плавлении Ni-Cr-B-Si-C сплава частицы релита остаются твердыми. Поверхность частиц карбида вольфрама растворяется в расплавленном никель-хромовом сплаве. Происходит взаимная диффузия компонентов, увеличивается количество карбидной эвтектики и мелких карбидов при последующей кристаллизации (рис. 7а, б). Частицы релита имеют весьма высокую твердость. Микротвердость, определенная на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 50 г, составила H₅₀ = 32,36 ГПа. Для сравнения — микротвердость стали 65Г, закаленной при лазерной обработке на мартенсит, составляет H₅₀ = 10,7 ГПа.

Износостойкость полученного композиционного покрытия оценивали при трении о жестко закрепленный абразив в соответствии с требованиями ГОСТ 17367–71. Одновременно испытывали образцы покрытия, полученные лазерной наплавкой износостойкого сплава ПГ-10 Н-01 и наплавкой порошковой быстрорежущей инструментальной стали Р6М5–ПМ (0,84% С; 0,48% Si; 0,5% Mn; 3,9% Cr; 6,1% W; 1,9% V; 4,9% Mo;). Появления трещин, отколов, выкрашивания наплавки во время испытаний не наблюдалось.

Состав покрытия	Твердость	V _{износа} · 10 ⁻⁷ , кг/с
ПГ-10Н-01	HRC ₃ 45–48	25,0
Р6М5–ПМ	HRC ₃ 66	15,6
ПГ-10Н-01–55% Релит – 45 %	Релит H ₅₀ = 32,36 ГПа	4,9

Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Износостойкость самофлюсующегося никель-хром-бор-кремниевого сплава при трении о жестко закрепленный абразив увеличилась в 5 раз за счет дополнительного упрочнения релитом сферическим и более чем в 3 раза превышает износостойкость быстрорежущей стали.

Заключение

Результаты исследования показали технологическую возможность наплавки быстрорежущей стали с помощью лазерного излучения. Регулирование термических циклов лазерной наплавки позволяет получить наплавленную быстрорежущую сталь со структурой высоколегированной аустенитно-мартенситной смеси с дисперсными включениями карбидов. Это позволяет получить слой любой толщины быстрорежущей стали с распределением первичных карбидов в виде отдельных частиц, совмещая наплавку и термическую обработку покрытия в одном технологическом процессе.

Релит сферический можно рекомендовать в качестве компонента износостойких покрытий и наплавов для деталей, работающих в условиях абразивного износа: бурового инструмента, рабочих органов землеройных, строительных и дорожных машин, глиноземов, деталей металлургического оборудования и др. ■

Литература

1. Davydova A., Domashenkov A., Sova A. et al. Selective laser melting of boron carbide particles coated by a cobalt-based metal layer. J. Materials Process. Technol. V. 229. P. 361–366 (2016).
2. Фомин В.М., Гольшев А.А., Косарев В.Ф. и др. Создание гетерогенных материалов на основе порошков В4С и Ni методом холодного газодинамического напыления с последующим послойным лазерным воздействием // Прикладная механика и техническая физика. Т. 58. № 5. С. 218–227 (2017).
3. Нижниковская П.Ф., Калинушкин Е.П., Аршова Е.В., Якушев С.С. Влияние скорости охлаждения на механизм и кинетику фазовых превращений при затвердевании W-Мобистрорежущих сталей // МиТОМ. 1987. № 9. С. 7–11.

Послойный синтез материалов в вакууме на основе плавления присадочной проволоки электрической дугой

Д.Н. Трушников, Ю.Д. Шицын, Д.С. Белинин
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия
Елена Георгиевна Колева, Институт электроники, Болгарская академия наук
E-mail: trdimitr@yandex.ru

Введение

Аддитивные технологии (АТ), или технологии послойного синтеза — одно из наиболее динамично развивающихся направлений цифрового производства. Они позволяют значительно ускорить решение задач подготовки производства, а в ряде случаев уже активно применяются для производства готовой продукции и являются прорывными технологиями этого столетия [1,2]. Большинство существующих в настоящее время аддитивных технологий изготовления металлических изделий основаны на использовании в качестве исходного материала для формирования изделий порошковых систем [4–6]. При этом существенно сужается круг конструкционных материалов, из которых возможно получение готовых изделий высокого качества. В частности, формирование изделий из большинства алюминиевых сплавов, а также сплавов активных металлов, таких как титановые и магниевые сплавы, приводит к повышенной пористости материала полученного изделия с существенным снижением его механических характеристик [5–8]. Производительность формирования деталей из порошковых материалов в существующих аддитивных технологиях явля-

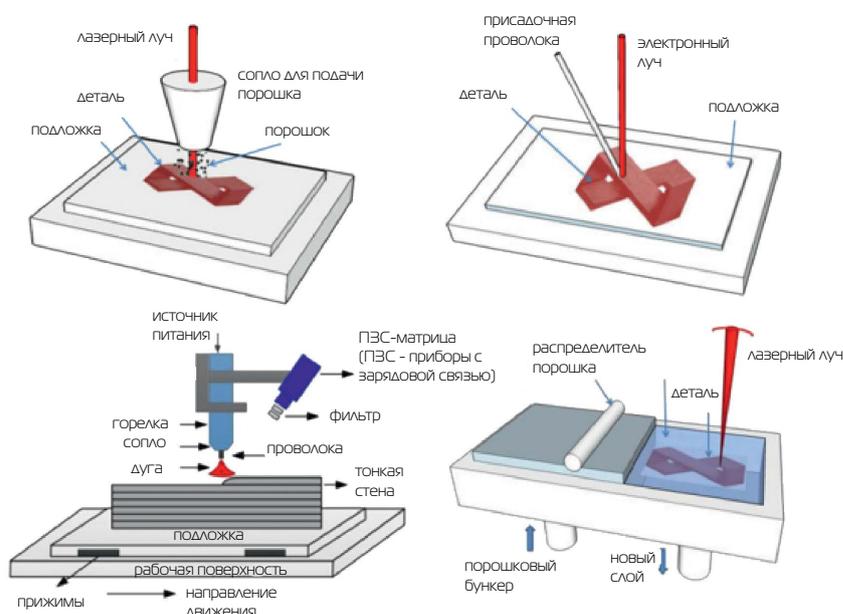
ется крайне низкой, что практически исключает перспективы применения этих технологий для производства крупногабаритных изделий.

Исследовательские работы в области аддитивных технологий, в том числе с использованием проволочных материалов, интенсивно проводятся в фирмах: 3D Systems Corporation (U.S.), 3T RPD (U.K.), Arcam AB (Sweden), Biomedical Modeling, Inc. (U.S.), Envisiontec GmbH (Germany), EOS GmbH Electro Optical Systems (Germany), Fcubic AB

(Sweden), GPI Prototype and Manufacturing Services, Inc. (U.S.), Greatbatch, Inc. (U.S.), LayerWise NV (Belgium), Limacorporate SPA (Italy), Materialise NV (Belgium), Medical Modeling, Inc. (U.S.), Norsk Titanium (U.S.), Sciaky (U.S.).

Согласно стандарту ASTM F2792, процессы аддитивного производства (АП) подразделяются на две категории: Directed Energy Deposition (DED) и Powder Bed Fusion (PBF). В процессе АП используются исходные материалы, такие как порошок или проволока,

Рис. 1. Схематическое представление АТ (a) DED-L, (b) DED-EB, (c) DED-GMA, (d) PBF-L [1,19]



и источники энергии, такие как лазер (Л) – Laser (L), электронный луч (ЭЛ) – Electron Beam (EB), плазменная дуга (ПД) – Plasma Arc (PA) или электрическая дуга (ЭД) – Gas Metal Arc (GMA). На рис. 1 представлены схемы АТ с применением различных исходных материалов и источник нагрева [1, 19].

Прямое осаждение
проволочных материалов
в процессе послойного синтеза
крупногабаритных изделий

Формирование металлических изделий с использованием оплавления проволочного материала является ключевым вектором развития аддитивных технологий. Данное решение позволяет избавиться от проблем, связанных с низкой производительностью существующих методов, высокой стоимостью применяемого оборудования, ограниченностью типов применяемых материалов, обусловленной традиционным использованием в качестве исходного материала для аддитивного формирования изделий порошковых систем, оплавляемых мощным тепловым источником [10–13]. Потенциал развития технологии формирования деталей с оплавлением проволоки очень велик и в настоящее время в мире еще полностью не раскрыт.

Известны примеры установок, в которых изготовление детали происходит в вакууме с использованием электронного луча, что оказывается весьма производительным решением применительно к целому ряду перспективных материалов, в частности, титану и другим химически активным металлам и их сплавам. Однако электронно-лучевые установки имеют ряд недостатков, к которым можно отнести прежде всего необходимость применения высоковольтных источников напряжения для работы электронно-лучевой пушки, ступенчатых

Рис. 2. Способы дуговой наплавки, применяемые для WAAM [2, 3, 4, 6]

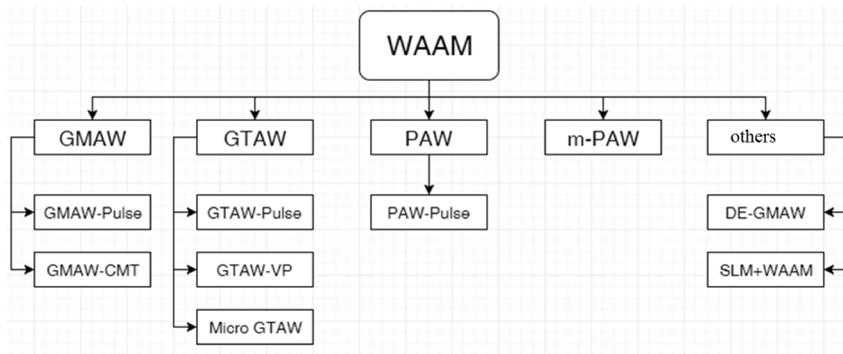


Рис. 3. Процесс получения изделия методом многослойной плазменной наплавки с использованием титановой проволоки. Изображение компании Norsk Titanium



систем откачки для достижения глубокого вакуума, в ряде случаев при электронно-лучевых процессах необходима специальная защита обслуживающего персонала от тормозного рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии электронного луча с обрабатываемым материалом, что значительно усложняет эксплуатацию установок. Несимметричная подача проволоки в зону воздействия обуславливает трудность аддитивного формирования деталей сложной формы. Кроме того, к недостаткам также можно отнести дороговизну как самой установки, так и ее эксплуатации.

Во многих случаях целесообразно создание более простых и практически доступных для всех отраслей промышленности, а главное, более дешевых и универсальных установок для аддитивного формирования изделий в вакууме, позволяющих максимально использовать имеющиеся элементы оборудования и технологии. Одним из наиболее распро-

страненных источников теплоты при сварке и наплавке является электрическая дуга.

На сегодняшний день существует большое разнообразие способов сварки, применяемых в Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Общая схема классификации WAAM по способам, применяемым для послойного синтеза изделий путем дуговой наплавки, показана на рис. 2 [2, 3, 4, 6].

Применение дуговых и плазменных источников для оплавления проволочного материала при реализации гибридных технологий послойного синтеза активно развивается в мире в последние годы. Норвежский стартап Norsk Titanium в 2016 году привлек дополнительные инвестиции в 25 миллионов долларов на сертификацию материала, получаемого плазменным послойным наплавлением титановой проволоки, для использования при изготовлении деталей самолетов Boeing и Airbus (рис. 3).

Необходимо отметить компанию WAAM на базе университета Кранфилд (Cranfield University), которая практикует технологии выращивания крупногабаритных изделий с использованием плазменных технологий или технологии наплавки плавящимся электродом с импульсной подачей проволоки с холодным переносом металла (Cold Metal Transfer — CMT), разработанные фирмой Fronius. В середине 2016 года в Европе стартовал проект LASSIM с бюджетом около 5 миллионов евро на три года, объединивший 16 компаний. Его цель — создание станда для реализации в одном пространстве нескольких процессов при гибридном производстве крупногабаритных заготовок: аддитивное производство; многокоординатная механическая обработка; послойное деформационное упрочнение, измерение; неразрушающий контроль.

Перспективы использования вакуумного дугового разряда в процессе аддитивного формирования металлических изделий

Анализ существующего положения показывает перспективным объединение возможностей технологий Sciaky (рис. 4, 5) и Norsk Titanium (рис. 6), обеспечивающее сочетание эффективности вакуумной защиты и свойств электрической дуги как источника теплоты для создания на их основе дуговых аддитивных технологий в вакууме [5, 9, 10]. Степень разряджения в вакуумной камере может быть значительно меньше, чем при использовании в качестве источника теплоты электронного луча (порядка 10^{-10} – 10^{-1} Па), а качество защиты будет выше, чем при использовании защитных газов или камер с контролируемой атмосферой в традиционных дуговых технологиях (при давлении 1,3 Па содержание примесей меньше, чем в аргоне высшего сорта

в 2...2,5 раза). Также вакуум способствует интенсивной дегазации и рафинированию расплавленного металла, что обеспечивает повышение физико-механических свойств готовых образцов.

С экономической точки зрения вакуум как защитная среда имеет ряд преимуществ по сравнению с инертными газами и прежде всего — возможность получения его непосредственно на рабочем месте только при затратах электроэнергии. Расчеты показывают, что использование вакуумной камеры объемом свыше 1 м^3 оказывается почти в 2 раза дешевле камер с контролируемой атмосферой. При использовании вакуумной защиты отпадают расходы, связанные с транспортированием баллонов высокого давления или криогенных емкостей. Таким образом, разработанная технология и оборудование позволят выращивать металлические заготовки из сталей, алюминиевых сплавов, а также, за счет вакуумной защиты, из сплавов активных металлов, таких как титан, магний и других химически активных, тугоплавких и редких металлов.

Развитие данной технологии осложнено рядом факторов как практического, так и теоретического характера. Во-первых, это отсутствие математических моделей, связывающих технологические параметры с геометрическими характеристиками наплав-

ленных валиков, обусловленное комплексным характером и нелинейностью протекающих процессов. Кроме того, следует отметить низкую стабильность существования дугового разряда в вакууме; трудности управления формированием при нестационарной температуре заготовки в процессе послойного синтеза; металлургические особенности при послойном синтезе, в особенности при наплавлении разнородных материалов в процессе формирования заготовок с функционально-градиентными свойствами. Относительно небольшое тепловыделение на изделия при большом объеме электродного металла с малым теплосодержанием может привести к появлению подрезов и несплавлений (при использовании плавящегося электрода).

Таким образом, возникает целый ряд новых задач, требующих решения. Для повышения стабильности существования разряда целесообразно исследовать возможность применения импульсной подачи проволоки с использованием обратной связи по потенциалу на ней. Это позволит идентифицировать моменты замыкания-размыкания проволоки и погасания дуги. При замыкании проволоки на изделие она отдергивается до размыкания, при размыкании проволоки или погасании дуги включается подача проволоки в направлении основ-

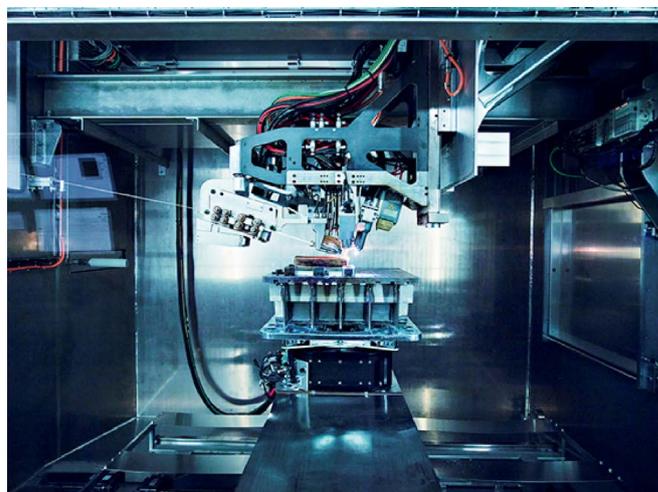


Рис. 4. Технология Sciaky's EBAM. Изображение компании Sciaky [9,10]

Рис. 5. Система Sciaky EBAM 110 [9, 10]



Рис. 6. Система плазменной наплавки с использованием проволоки Norsk Titanium [5]



ного металла. Преимущества данного процесса выражаются в его саморегулировании, минимальном тепловом воздействии, минимальном образовании брызг и исключительно стабильной дуге. При наплавке в вакууме данный процесс ранее не исследовался. Дополняющим или альтернативным решением для повышения стабильности дуги и обеспечения качественного формирования может являться применение плазменного источника с использованием плазмообразующего газа или системы с полым катодом.

Для разработки научно-технологических основ формирования заготовок из специальных конструкционных материалов методом локального оплавления проволоки электрической дугой в вакууме, обеспечивающих достижение физико-механических свойств материала на уровне материалов существующих машиностроительных изделий, необходимо объединение экспериментальных и аналитических методов, основанных на построении физических и математических моделей, описывающих изучаемые механизмы. Потребуется формализация исследуемых процессов аддитивного формирования в виде математического

описания горения электрической дуги в вакууме и аддитивного синтеза образцов, формирования и стабильного существования электрической дуги в вакууме, нагрева, плавления, тепломассопереноса с последующей кристаллизацией проволоочного материала. Формирование дугового разряда в вакууме характеризуется возникновением неравновесной плазмы с температурой электронов, на порядки превышающей температуру нейтральных атомов [11, 16, 17]. Математическая модель может быть основана на решении системы уравнений переноса для концентрации и средней энергии электронов [7, 8]. Электрическое поле определяется из уравнения Пуассона. Для описания массопереноса тяжелых частиц плазмы (ионов, нейтральных невозбужденных и возбужденных атомов) может быть использовано уравнение переноса массы для многокомпонентной смеси [14–17]. По мере удаления от зоны воздействия дуги на металл плазма становится бесстолкновительной, и диффузионные уравнения вырождаются в уравнение непрерывности для заряда, массы и энергии. Кроме термоэмиссионных процессов нужно учитывать эффект Шоттки при расчете величины элект-

ронной эмиссии с поверхности нагретого металла. Математическая модель тепло- и массообмена в процессе аддитивного формирования изделий путем наплавления проволоки электрической дугой в вакууме будет учитывать фазовые и структурные переходы, неоднородные теплофизические свойства материалов и распределения примесей.

Экспериментальные работы должны включать исследование влияния полярности тока, формы и материала электрода, степени разряда в камере, использования плазмообразующего газа и импульсной подачи присадочной проволоки с обратной связью по напряжению на формирование, устойчивость горения дуги и качество наплавленного слоя. Также коллективом авторов предполагается проведение серии многофакторных экспериментов. Варьируемыми параметрами будут являться: скорость подачи материала, мощность, скорость перемещения источника тепла. Фиксированными параметрами будут являться: полярность тока дуги, химический состав и геометрические характеристики подаваемого материала и способ подачи (перед источником нагрева, после источника нагрева, верти-

кальная или горизонтальная подача). Контролируемыми показателями качества оценки результатов экспериментов являются: физико-механические свойства синтезированного наплавкой материала (предел текучести, предел прочности, твердость, ударная вязкость), а также отсутствие недопустимых внутренних дефектов (пор, трещин, несплавлений т.д.) и соответствие требуемым геометрическим размерам. Для оптимизации технологических процессов возможно также использование статистических методов анализа.

Выводы

В работе представлено обоснование целесообразности развития нового технологического процесса – формирования слоистых однородных материалов в вакууме с применением в качестве источника нагрева электрической дуги и цельнометаллической проволоки в качестве присадочного материала. Сформулированы задачи, требующие решения для использования предложенной технологии. Сформулированы возможные решения. Показано, что данный подход, по сравнению с известными технологическими решениями в практике мирового промышленного производства, будет способствовать повышению производительности формирования слоистых материалов, а также позволит устранить ряд недостатков существующего оборудования, применяемого для реализации аддитивных технологий. ■

Поддержка

Настоящая статья подготовлена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ № 18–08–01016 А), а также при поддержке проекта «Международные исследовательские группы» Министерством образования Пермской области (С-26/787 Дата: 21.12.2017).

Литература

1. W. R. Morrow, H. Qi, I. Kim, J. Mazumder and S. J. Skerlos, Environmental Aspects of Laser-Based and Conventional Tool and Die Manufacturing, *J. Clean Prod.*, 2007, 15, P. 932–943.
2. P. Wray, Additive Manufacturing: Turning Manufacturing Inside Out, *Amer. Ceram. Soc. Bull.*, 2014, 93, 3, P. 17–23.
3. D. H. Freedman, Layer by Layer, *MIT Tech. Rev.*, 2012, 115, 1, P. 50–53.
4. W. E. Frazier, Metal Additive Manufacturing: A Review, *J. Mater. Eng. Performance*, 2014, 23, 6, P. 917–19–28.
5. Louvis E. et. al. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*. Department of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, United Kingdom. – 2011. – Vol. 211. – P. 275–284.
6. 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]. URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/12285/InTech-Capabilities_and_performances_of_the_selective_laser_melting_process.pdf
7. Безобразов Ю. А. и др. Анализ структуры образцов, полученных DMLS- и SLM-методами быстрого прототипирования. – Екатеринбург, 2012.
8. Chunlei Qiu, Chinnapat Panwisawas, Mark Ward, Hector C. Basoalto, Jeffery W. Brooks, Moataz M. Attallah. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting, *Acta Materialia*, Volume 96, 1 September 2015. Pages 72–79, ISSN 1359–6454, <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.004>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645415003870>)
9. Sciaky Inc. Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) – Advantages of Wire AM vs. Powder AM. URL: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebamadvantages-of-wire-am-vs-powder-am/>
10. Sciaky Inc, Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). URL: <http://www.sciaky.com/images/pdfs/product-sheets/Sciaky-EBAM-Technology.pdf>
11. Jhavar S., Jain N. K., Paul C. P. Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications//*Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – Т. 214. – №. 5. – С. 1102–1110.
12. Spencer DJ, Dickens PM W. C. Rapid prototyping of metal parts by three dimensional welding//*Mech E J. Eng. Manuf.* 1998. Т. 212. P. 175–182.
13. Ding J. и др. Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture//*J. Mater. Process. Technol.* 2015. P. 99–105.
14. Song Y. A., Park S. Experimental investigations into rapid prototyping of composites by novel hybrid deposition process//*J. Mater. Process. Technol.* 2006. Т. 171. № 1. С. 35–40.
15. Ding J. и др. A computationally efficient finite element model of wire and arc additive manufacture//*Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014. Т. 70. С. 227–236. <http://doi.10.1007/s00170-013-5261-x>.
16. Aiyiti W. и др. Study on the Veritable Parameters Filling Method of Plasma Arc Welding Based Rapid Prototyping//*Key Eng. Mater.* 2012. Т. 522. С. 110–116.
17. Song Y.-A. и др. Welding and Milling Direct Prototyping of Metallic Parts//*C. 495–502*. <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/1998/1998-55-Song.pdf>
18. Zhang Y. M. и др. Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study//*J. Mater. Process. Technol.* 2003. Т. 135. С. 347–357.
19. Ding D. и др. Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part//*CAD Comput. Aided Des.* 2016. Т. 73. С. 66–75.

Исследование прочностных характеристик модельного материала, получаемого методом FDM-печати

*Н.В. Камоничкина, И.В. Кочешков, к.т.н., доцент, кафедра «Технологии обработки материалов»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

Актуальность работы и цели исследований

Аддитивные технологии в настоящее время являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений цифрового производства, имеющим большие перспективы при производстве машиностроительных изделий и проведении ремонтных работ. Аддитивные технологии основаны на использовании 3D-принтеров [1]. Из семи базовых принципов процесса 3D-печати, отмеченных в [1], сегодня наибольшее распространение имеет экструзия материала, который выборочно подаётся через сопло или жиклёр. Этот вид 3D-печати в технической литературе принято называть FDM-печатью (Fused Deposition Modeling).

Широкое распространение FDM-печати объясняется относительной дешевизной 3D-принтеров для данной технологии и возможностями при производстве различного вида изделий. Однако нельзя утверждать, что прочностные характеристики материала деталей, получаемых с использованием FDM-печати, соответствуют прочностным свойствам материала нитей, которые при этом используются. Нанесение чередующихся слоёв последовательным наплавлением нитей ведёт к образованию многоуровневой физической структуры материала. Формируемая структура может

отличаться анизотропией свойств относительно направления укладки нитей, различием толщин укладываемых слоёв, наличием различного вида дефектов, своеобразием механизмов разрушения материала. Перечисленные выше факторы отражаются на прочностных характеристиках получаемых материалов.

Наиболее распространёнными материалами для получения изделий методом FDM-печати являются пластики, например, часто применяемый АБС-пластик. Поэтому целью данной работы является исследование прочностных характеристик материала, получаемого FDM-печатью с использованием АБС-пластика.

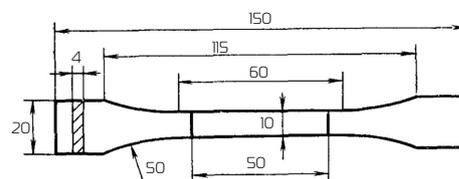
Описание методики и условий изготовления образцов

Материал, получаемый FDM-печатью, может иметь разную структуру, но она обязательно будет состоять из совокупности объёмов с однонаправленно уложенными нитями. Это определяется технологическими особенностями реализации FDM-печати. Для того, чтобы оценить прочностные характеристики материала и анизотропию свойств, испытания необходимо провести вдоль и поперёк направления укладки нитей.

Форма и размеры образцов для испытаний на растяжение принимались в соответствии с ГОСТ 11262–80 «Пластмассы. Метод

испытания на растяжение». Для проведения исследований был выбран образец второго типа (рис. 1). 3D-печать производилась с использованием мононити из пластика ABS+ производителя «СтримПласт», поставляемой по ТУ 2291–001–24687042–2016. В соответствии с этими техническими условиями мононить должна обладать прочностью при растяжении не менее 47 МПа и печать должна осуществляться в интервале температур 220–250 °С.

Рис. 1. Эскиз образца для проведения испытаний на растяжение



3D-печать позволяет сразу изготавливать образцы для проведения испытаний на прочность при растяжении, минуя этапы получения первичной заготовки и последующей вырезки из неё образцов. Порядок укладки нити (G-код) готовился в программе Simplify3D версии 4.0 по ГОСТ 20999–83 «Устройства числового программного управления для металлообрабатывающего оборудования. Кодирование информации управляющих программ» с учетом, расположения нитей в рабочей части образца вдоль или поперек направления растяже-

ния. FDM-печать осуществлялась на 3D-принтере Picaso Designer Pro250 с диаметром сопла экструдера 0,3 мм.

Перед печатью для улучшения адгезии материала стол покрывался специальным связующим марки The3D. Температура стола составляла 110°C, а температура сопла экструдера – 240°C. Печать осуществлялась по трём режимам:

✓ **Режим 1:** скорость движения сопла экструдера $V_c = 30$ мм/сек, толщина укладываемого слоя нити $h_{cl} = 100$ мкм;

✓ **Режим 2:** скорость движения сопла экструдера $V_c = 45$ мм/сек, толщина укладываемого слоя нити $h_{cl} = 150$ мкм;

✓ **Режим 3:** скорость движения сопла экструдера $V_c = 60$ мм/сек, толщина укладываемого слоя нити $h_{cl} = 200$ мкм.

Полученные образцы испытывались на растяжение при скорости раздвижения зажимов испытательной машины, соответствующей $1 \pm 0,5$ мм/сек (минимальная скорость раздвижения зажимов испытательной машины, предусмотренная ГОСТ 11262–80).

Обсуждение полученных экспериментальных данных

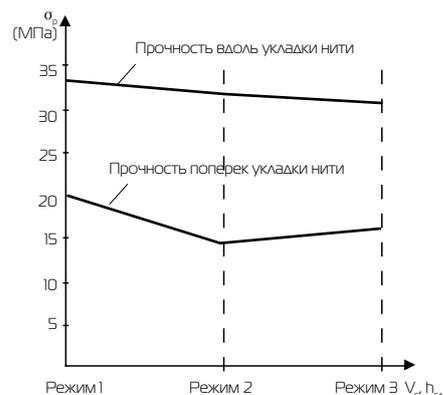
Экспериментальные данные по результатам испытания материала, полученного FDM-печатью с использованием АБС-пластика вдоль и поперёк укладки нитей, представлены на рис. 2. Из них видно, что прочность на растяжение материала, полученного по всем трём режимам 3D-печати в направлении укладки нитей, близка по своим значениям и находится на уровне 31–33,5 МПа. Если использовать данные производителя по прочности используемой при FDM-печати мононити (47 МПа), то эти значения примерно на 31% ниже. Однако для проведения более корректного сравнения уровней прочности этих двух материалов необходимо уточнить, насколько условия

испытания мононитей совпадают с условиями их нагружения в модельном материале.

Прочность модельного материала поперёк укладки нитей существенно ниже и сильнее зависит от режимов FDM-печати (рис. 2). Скорость движения сопла экструдера в совокупности с толщиной укладываемого слоя влияют на прочность сцепления нитей. Связано это с распространением тепла от сопла в материал. При большой скорости печати в любой момент времени в конкретной точке пластику передается меньше тепла, нежели при малой скорости. Если производить печать малого слоя на низкой скорости, то тепла может отдаваться слишком много. Это увеличит адгезию, но возникнет вероятность образования дефектов в виде наплывов пластика. И наоборот: если производится 3D-печать с большей толщиной слоя на высокой скорости, тепла может быть недостаточно для образования хорошей адгезии между нитями.

Высказанное предположение подтверждается полученными экспериментальными данными (рис. 2). На режиме 1 (минимальная скорость печати и толщина укладываемого слоя) прочность модельного материала поперёк укладки нитей максимальна и составляет 20,2 МПа (67% от прочности материала вдоль укладки нитей), на режиме 2 – 14 МПа (41% от прочности материала вдоль укладки нитей) и на режиме 3 – 15,9 МПа (51% от прочности материала вдоль укладки нитей). То есть при переходе от режима 1 к режиму 2 3D-печати происходит снижение прочности на растяжение образцов с поперечной укладкой нитей в результате более сильного влияния увеличенной толщины укладываемого слоя нитей, чем увеличение скорости печати. А при переходе от режима 2 к режиму 3 преобладающее влияние оказывает увеличение

Рис. 2. Зависимость прочности на растяжение σ_r модельного материала с продольной и поперечной укладкой нитей, полученного при разных режимах 3D-печати (Режим 1: $V_c = 30$ мм/сек, $h_{cl} = 100$ мкм; Режим 2: $V_c = 45$ мм/сек, $h_{cl} = 150$ мкм; Режим 3: $V_c = 60$ мм/сек, $h_{cl} = 200$ мкм.)



скорости печати, что приводит к небольшому повышению прочности материала (рис. 2).

Образцы модельного материала с продольной и поперечной укладкой нитей имеют разный вид диаграммы растяжения и поверхности разрушения. Если диаграмма растяжения образцов с поперечной укладкой нитей имеет характерный вид для хрупкого разрушения, то на диаграмме растяжения образцов с продольной укладкой волокон после небольшого снижения усилия растяжения, после достижения максимума, наблюдается постепенное его падение до момента разрушения образца.

Образцы с поперечной укладкой волокон (рис. 3а) имеют абсолютно плоскую поверхность разрушения, а у образцов с продольной укладкой волокон (рис. 3б) наблюдается развитая

Рис. 3. Характер разрушения образцов с поперечной (а) и продольной (б) укладкой нитей

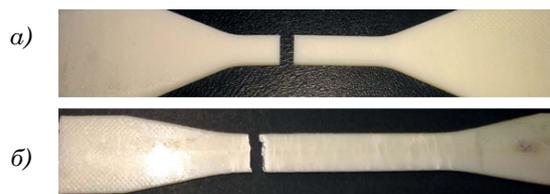
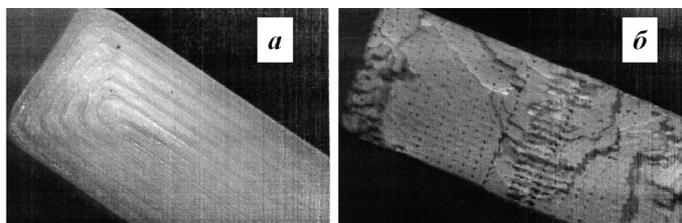


Рис. 4 Вид излома образцов с поперечной (а) и продольной (б) укладкой нитей



поверхность разрушения. При исследовании этих изломов на оптическом микроскопе видно, что разрушение материала с поперечной укладкой волокон происходит в одной плоскости (рис. 4а) по поверхности уложенных нитей. Излом модельного материала с продольной укладкой волокон (рис. 4б) имеет развитый характер. Разрушение идет в разных плоскостях, и на изломе наблюдаются как участки накопления повреждений, так и плоские зоны, характерные для магистрального распространения трещин.

Заключение

✓ Для модельного материала, полученного FDM-печатью с использованием АБС-пластика, при укладке нитей вдоль направления приложения нагрузки не выявлено зависимости прочности на растяжение от режимов 3D-печати. Прочность на всех режимах печати составила 31–33,5 МПа, что примерно на 31% ниже прочности мононитей, заявленной производителем.

✓ Прочность модельного материала с поперечной укладкой нитей составляет 41–67% от прочности, полученной при испытании вдоль укладки волокон, и зависит от режимов 3D-печати. Максимальное значение – 20,2 МПа – получено на режиме 1, при скорости движения сопла экструдера $V_c = 30$ мм/сек и толщине укладываемого слоя нити $h_{cl} = 100$ мкм, а минимальное значение – 14 МПа – наблюдается на режиме 2, при $V_c = 30$ мм/сек и $h_{cl} = 100$ мкм.

✓ Образцы модельного материала с продольной и поперечной укладкой нитей имеют разный характер и вид поверхности разрушения:

- при их поперечной укладке наблюдается абсолютно плоская поверхность разрушения по стыку наплавленных нитей, и, следовательно, величина адгезии между ними является важнейшим фактором, влияющим на значение прочности;

- при их продольной укладке излом материала имеет развитый характер как с участками накопления повреждений, так и с зонами магистрального распространения трещин. Материал с продольной укладкой нитей при дальнейших исследованиях целесообразно рассмотреть как пучок связанных волокон, что может позволить раскрыть механизмы разрушения подобного материала. ■

Литература

1. ГОСТ Р 57558–2–017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы» .

IV семинар «Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий»

29–31 октября 2018 г., Томск,
Политехнический университет

ТЕМЫ СЕМИНАРА

- Синтез материалов в совмещенных технологиях
- Свойства изделий, полученных по аддитивным технологиям, их испытание и контроль
- Материалы для аддитивных технологий
- Аддитивные технологии для авиации и космоса
- Аддитивные технологии в машиностроении
- Моделирование сопутствующих явлений и процессов создания материалов в аддитивных технологиях
- Рабочий язык семинара русский и английский

По итогам конференции будет выпущен сборник докладов

ВАЖНЫЕ ДАТЫ:

- ✓ Окончание регистрации и принятия тезисов: **17 сентября 2018 г.**
- ✓ Уведомление о приеме доклада: **23 сентября 2018 г.**
- ✓ Срок оплаты регистрационного взноса: **29 октября 2018 г.**
- ✓ Семинар **29–31 октября 2018 г.**
- ✓ Дата представления полных текстов докладов до **30 ноября 2018 г.**

Телефон: +7 (3822)60-61-59

E-mail: add.tech_tpu@mail.ru

<http://portal.tpu.ru/science/seminar/at>

2018



ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
ISO - 9001 ufi



КАЗАНСКАЯ
ЯРМАРКА

9-11 АВГУСТА



9 - я МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

АКТО

Авиа
Космические
Технологии, современные материалы и
Оборудование

Выставка АКТО и проводимые в рамках нее мероприятия будут приурочены:

- 130-летию со дня рождения А.Н. Туполева,
- 50-летию со дня первого полета Ту-144
- 55-летию со дня полета в космос первой в мире женщины-космонавта **В. В.**

12+

ОРГАНИЗАТОРЫ ВЫСТАВКИ

Кабинет Министров Республики Татарстан
Министерство промышленности и торговли РТ
Мэрия города Казани
ОАО «Казанская ярмарка»

При поддержке Президента Республики
Татарстан Р.Н.Минниханова

ОРГКОМИТЕТА:

Руководитель проекта:
Аминова Айгуль Фаридовна

Тел/факс: +7 (843) 202-29-03,
E-mail: expo-kazan@mail.ru,
www.aktokazan.ru, www.expokazan.ru

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ARMY

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ «АРМИЯ-2018»**

**21–26 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО**

WWW.RUSARMYEXPO.RU

ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР



МКВ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ

4^я международная специализированная выставка
пластмасс и каучука
в рамках Татарстанского Нефтегазохимического Форума



4 – 6 СЕНТ
2018
КАЗАНЬ
РОССИЯ



www.interplastica.ru/kazan

ЧАСТЬ ВСЕМИРНОЙ СЕТИ МЕЖДУНАРОДНЫХ ВЫСТАВОК
В ОБЛАСТИ ПЛАСТМАСС И КАУЧУКА



YOUR GLOBAL GATE
FOR PLASTICS AND RUBBER

При поддержке:



22–25.10.2018

ТЕХНОФОРУМ



МИНПРОТОРГ
РОССИИ



ЭКСПОЦЕНТР

Организаторы:

ЭКСПОЦЕНТР
МОСКВА



Российская Ассоциация
производителей
станкоинструментальной продукции
«Станкоинструмент»

При поддержке
Министерства промышленности
и торговли РФ

Под патронатом ТПП РФ

Международная
специализированная
выставка «Оборудование
и технологии обработки
конструкционных
материалов»



Реклама 12+



Россия, Москва,
ЦВК «Экспоцентр»

www.technoforum-expo.ru

РИТМ

МАШИНОСТРОЕНИЯ

www.ritm-magazine.ru
ritm@gardesmash.com



ritmmagazine

rhythm_of_machinery