

at

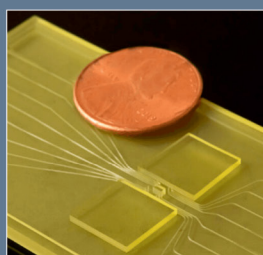
АДДИТИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



Комплексное решение для аддитивного производства: от проектирования и анализа прочности детали до моделирования процесса 3D-печати



mscsoftware.com/ru | hexagon.com |



3D-печать
против
COVID-19
32



Производство
литейных форм
методом
селективного
отверждения
песчаной смеси
38



Аддитивное
формообразование
изделий из
металлов и сплавов
пучком электронов.
Селективное
плавление (часть 2)
44

РЕВОЛЮЦИОННАЯ КОМПАКТНАЯ СИСТЕМА РУЧНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

LightWELD 1500



Мощность лазера
до 1500 Вт

Пиковая мощность
до 2500 Вт

Охлаждение
Воздушное

Ширина шва в режиме Wobble
до 5 мм

Размеры
641 x 316 x 534 мм

Вес
53 кг



**АЛЬТЕРНАТИВА ДЛЯ MIG- И TIG-СВАРКИ
УНИВЕРСАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО СЕКТОРА**

	Традиционные технологии сварки	Технология LightWELD
Скорость	Средняя	До 4-х раз быстрее, чем TIG
Качество	Зависит от опыта сварщика	Стабильные высококачественные результаты
Освоение	В несколько этапов	Стабильно высокие результаты
Гибкость в выборе материала	Ограниченная, требует переналадки	Широкий диапазон материалов без переналадки
Коробление и деформации	Высокие значения	Незначительные
Зона термического влияния	Большая	Малая
Сварка с осцилляцией (качанием) луча	Недоступна	Доступна — расширение шва до 5 мм

НЕПРЕВЗОЙДЁННАЯ НАДЁЖНОСТЬ И ПРОСТОТА ЭКСПЛУАТАЦИИ НОВЕЙШЕЕ РЕШЕНИЕ

Light**WELD** — это максимальные сварочные возможности при минимальном браке

Угловое соединение

Нержавеющая сталь 9 мм и 1 мм



Стыковое соединение

Нержавеющая сталь 1 мм
Медь 1 мм



Стыковое соединение

Низкоуглеродистая сталь 10 мм

Соединение внахлест

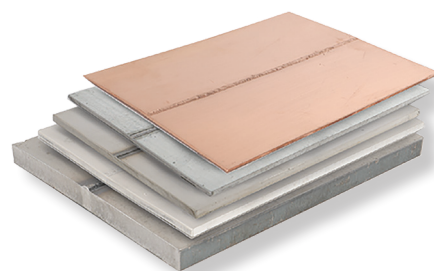
Низкоуглеродистая сталь
1 мм и 2 мм

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ МАТЕРИАЛОВ И ТОЛЩИН



Свариваемые материалы

Металл	Толщина (односторонняя сварка)	Толщина (двухсторонняя сварка)
Нерж. стали	До 4 мм	До 10 мм
Оцинкованная сталь	До 4 мм	До 10 мм
Низкоуглерод. стали	До 4 мм	До 10 мм
Алюминиевые сплавы	До 4 мм	До 10 мм
Медь	До 1 мм	До 2 мм



Возможна сварка толстых, тонких, разнородных высокоотражающих металлов без использования присадочной проволоки, что трудно или невозможно осуществить традиционными методами сварки.

Подробнее обо всех новинках Вы можете узнать у наших консультантов по e-mail и телефону:

+7 (495) 968 99 32; lightweld.online@ntoire-polus.ru

www.lightweld.ru



IRE-POLUS®



СОДЕРЖАНИЕ

- 4** Будущее и тренды 3D-печати
- 6** Аддитивные технологии против предрассудков
- 8** 3D-печать в больницах: шесть трендов 2021 года
- 9** Моделирование аддитивного производства — да!
А что лучше: компьютерное или натурное моделирование?
- 12** Есть ли место персональным FDM 3D-принтерам
в производстве и бизнесе?
- 14** Серийное производство пластиковых компонентов,
изготовленных методом аддитивных технологий,
для автомобильной промышленности
- 16** Порошки, полученные методом PREP,
для аддитивных технологий и ГИП
- 20** Аддитивные технологии SMS group — индивидуальные решения
по всей цепочке создания стоимости
- 24** 3D-принтеры BLT: печать изделий из чистой меди
- 26** INTAMSYS — ведущий производитель промышленных
FDM 3D-принтеров
- 28** Компания Kings 3D printing — более 3000 инсталляций
промышленных SLA-принтеров с 2007 года
- 31** Промышленные 3D-принтеры ExOne /
технология Binder Jetting
- 32** 3D-печать против COVID-19
- 35** Использование потенциала аддитивного производства
с помощью *hyper MILL*[®]
- 38** Производство литейных форм методом селективного
отверждения песчаной смеси
- 44** Аддитивное формообразование изделий из металлов и сплавов
пучком электронов: прямая подача энергии и материала
в зону плавления (часть 2)
- 58** Исследование процесса электронно-лучевого сплавления

Издатель ООО «ПРОМЕДИА»

директор О. Фалина

главный редактор

М. Копытина

отдел редакции:

Т. Карпова, Э. Сацкая

С. Куликова

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

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.

В С Е Г Д А Н А В Ы С О Т Е

МАКС – это ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ!

Ключевые экспонаты:

- Современные и перспективные самолёты МС-21-310 с двигателем ПД-14, Ил-114-300, SSJ, ЛМС «Байкал»
- Вертолеты Ми-171А3, АНСАТ-М, Ка-32А11М
- Двигатели ПД-35 и ВК-650В

Разработки российских научных центров:

- Летящая лаборатория для отработки гибридной силовой установки
- Легкий самолет с электрической силовой установкой
- Прототип самолёта укороченного взлёта и посадки

Глобальные тенденции авиации:

- Электрические и водородные силовые установки
- Коммерческие сверхзвуковые лайнеры
- «Беспилотная революция»

МАКС 2021

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИЙ
САЛОН**

Организаторы



Устроитель



WWW.AVIASALON.COM • 20-25 ИЮЛЯ • ЖУКОВСКИЙ

Будущее и тренды 3D-печати



Максим Канищев, генеральный директор компании «2050AT»

Стремительное развитие аддитивных технологий — один из главных недостатков 3D-печати. Почему? Все так привыкли к заголовкам на грани фантастики, что новые достижения «аддитивки» воспринимаются как будничная формальность. Предлагаем обратить внимание на бизнес-модели аддитивного производства, которые претерпят изменения уже в ближайшем будущем. Тенденции рынка, собственные наблюдения и прогноз на развитие индустрии.

1. Формализация — на первый план

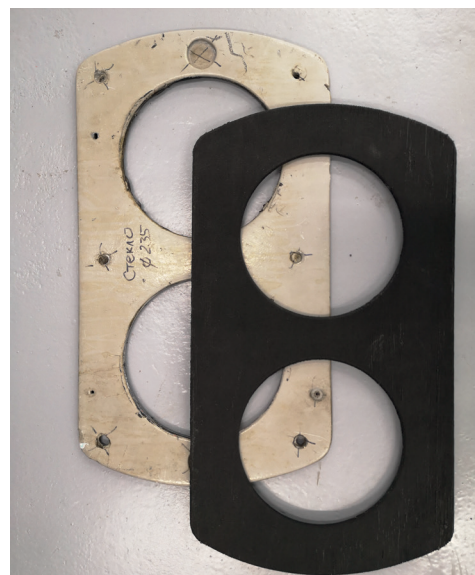
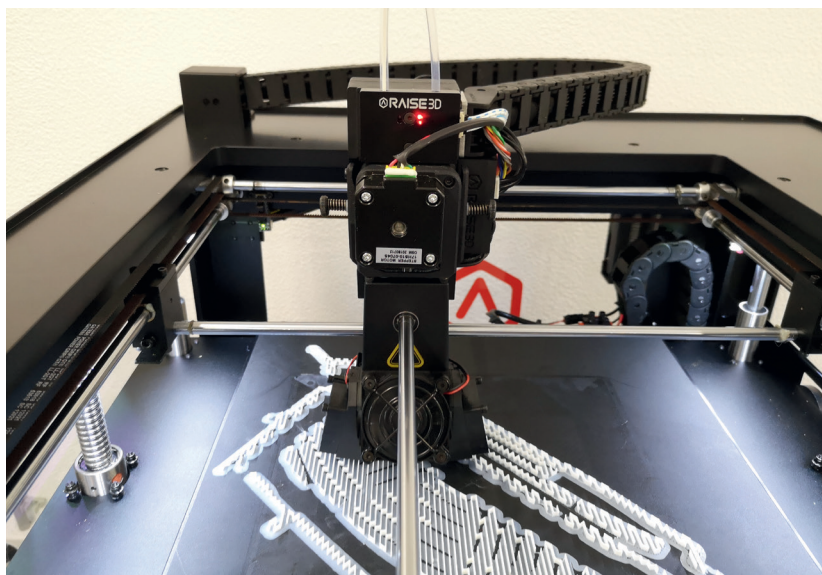
Общеизвестные минусы «аддитивки» постепенно теряются из вида: современное оборудование снимает ограничения на геометрию производства, каталог материалов печати позволяет задать изделию практически любые характеристики. 3D-технологии прошли испытательный срок и убедили бизнес в собственных возможностях. Теперь, когда «аддитивка» стала полноправным субъектом производства, встал закономерный вопрос о её статусе. Внесение напечатанных деталей в конструкторскую документацию, сертификация изделий и техпроцессов — новые будни аддитивных технологий. Вопрос юридического статуса продукции для производителей теперь не менее важен, чем классические «что печатать» и «как окупать инвестиции». Массовое появление специальных конструкторских бюро, специализирующихся на внесении технологий 3D-печати в традиционную конструкторскую документацию, — повестка сегодняшнего дня.

2. «Песочницы» для 3D-печати

Схожая ситуация наблюдается и в IT-индустрии, где регуляторика не всегда успевает реагировать на появление инновационных технологий. Здесь государство пошло бизнесу навстречу, создавая так называемые «песочницы» — особые правовые зоны для тестирования нового продукта с минимальным грузом сертификации. Создание подобных «песочниц» для аддитивных технологий — вопрос ближайших лет. Но для упрощения жизни «аддитивщиков» должно быть выполнено важное условие — признание стратегической важности аддитивных технологий для экономики Российской Федерации, как это было с той же IT-индустрией.

3. Консолидация бизнеса как гарантия качества

Скепсис по отношению к изделиям, произведённым с помощью 3D-печати, остаётся будничным явлением, несмотря на все успехи игроков рынка. Отсутствие единых правил игры, о которых говорилось ранее, —



одна из причин сомнений потенциальных бизнес-партнёров на переговорах об интеграции «аддитивки». Будущее индустрии определят отраслевые союзы, членство в которых станет гарантией качества продукции всех участников такого сообщества. Саморегулируемые организации (СРО) уже в 2021 году начнут задавать вектор отраслевого взаимодействия между «аддитивщиками» и традиционной промышленностью. Постепенно 3D-печать меняет своё позиционирование: формируясь как индустрия с минимальным порогом вхождения, где для производства хватало наличия одного только принтера, технология обретает черты института со сложными правилами игры. Это не значит, что небольшие игроки исчезнут с рынка: напротив, малые предприятия найдут в консолидации новый инструмент конкуренции с крупными хабами. Но и большие производства, конечно, извлекут выгоду из подобных перемен, получая готовый институциональный лифт для интеграции собственных разработок в целые отрасли.

4. Битва за научное сотрудничество

Ещё несколько лет назад солидный каталог материалов для печати являлся главным конкурентным преиму-

ществом в сфере 3D-печати. Но технологии настолько шагнули вперёд, что списком из 10+ позиций уже никого не удивить, и на первый план выходят заданные эксплуатационные свойства напечатанного изделия. С помощью каких материалов подрядчик выполнит требования заказчика — уже внутренний вопрос производства. Только вот задача не всегда решается даже при наличии солидного каталога материалов. Здесь главным союзником бизнеса становится наука — в первую очередь, университеты и прочие учреждения, обладающие значительным научным потенциалом. «Аддитивка», пожалуй, одна из немногих отраслей, где в графе «партнёры» упоминание о Бауманке, Горном или МГУ котируется не меньше, чем логотипы «Газпрома» или «Лукойла». Наш прогноз — ещё большее уплотнение подобного взаимодействия, вплоть до становления коллабораций предприятий и научных центров как нормы рынка. Но количество специалистов, способных разработать материал под заказ вашего производства, ограничено, поэтому в ближайшем будущем мы ожидаем настоящую волну хантинга за университетами и институтами — самыми желанными партнёрами для участников рынка. ■

Революция в ручной сварке

Лидер в области мощных волоконных лазеров IPG Photonics Corporation выходит на рынок ручной сварки, чтобы предоставить простое и универсальное решение для промышленного сектора. Система LightWeld1500 позволяет добиваться максимальной эффективности процесса сварки, что недоступно при применении традиционных технологий.

Отличительные особенности LightWeld1500 — малый размер и вес, уникальная система воздушного охлаждения. Всё это достигается благодаря непрерывным инновациям IPG, которые позволяют увеличивать выходную мощность, при этом уменьшая форм-фактор из года в год. В отличие от сварочных



аппаратов, использующих MIG и TIG-технологии, LightWeld1500 позволяет в разы увеличить скорость и качество сварки при меньших затратах на обучение персонала. LightWeld1500 обеспечивает высококачественные результаты в широком диапазоне материалов и толщин с существенно меньшим тепловложением и минимальной зоной термического влияния, не вызывая короблений, деформаций, подрезов и прожогов.

<https://lasersystems.ipgphotonics.com/>

Аддитивные технологии против предрассудков

Зинаида Сацкая



Начало года ознаменовалось хорошей новостью. Ашхен Овсепян, генеральный директор компании SIU System, назначена амбассадором международной организации Women in 3D printing в России. Г-жа Овсепян — партнер журнала «Аддитивные технологии» практически со дня его основания — любезно согласилась дать интервью и рассказать о целях и практических делах этой организации.

У названия организации отчетливо выражен гендерный оттенок. Аддитивные технологии становятся очередным плацдармом битвы за равноправие женщин?

Мы живем в прекрасное время, когда технологии развиваются с безумной скоростью, и всё, о чем писалось в книгах про будущее, в том или ином виде уже создано. Окружающий нас новый мир — дело рук и интеллекта человека. Чем мы разнообразнее, глубже по развитию, тем красивее и ярче мир вокруг. Аддитивные технологии — один из инструментов, активно меняющих

наш мир. Сейчас модно использовать слово diversity — разнообразие. Для новых слоев прогресса требуются разные взгляды.

Исторически так сложилось, что женщин в промышленности и в инновациях не более 25%, это видно даже у нас в группе Women in 3D printing в России. Будучи представителем традиционной армянской семьи и, безусловно, очень красивой культуры, могу привести много примеров, когда женщины и мужчины в обществе, в выборе профессии, даже во взглядах имеют роли, которые настолько укоренились в сознании, что уже сложно отличить реальное желание человека от устоя. Например, если бы общество исторически не считало технологии мужским бизнесом, то, возможно, мы бы увидели совсем другую статистику распределения женщин в индустрии. Моя личная цель — чтобы каждый мог попробовать себя в сферах, которые ему интересны. Без отвлечения на ограничения, хотя бы гендерные. Хочется, чтобы в нашем мире был минимум предрассудков и максимум новых взглядов.

Women in 3D printing — это организация, которая ставит своей задачей содействие усилению роли женщин в аддитивных технологиях. Миссия организации — устранить гендерный разрыв в аддитивном производстве. Организация, послом которой я являюсь, способствует развитию женского потенциала в этой отрасли, повышению ее узнаваемости и развитию аддитивных технологий в целом.

Существует ли какая-то статистика вовлеченности женщин в тему аддитивных технологий? В мире? В нашей стране? В вашей компании?

Аддитивные технологии — это отрасль промышленности. Исторически в промышленности преобладают мужчины. Четкой статистики нет, но ориентировочно в мире женщины составляют пятую часть всех увлеченных технологией. У нас в России мы как раз начали считать. Думаю, показатели будут сходными. Но, как и в целом в мире, в нашей стране женщины всё активнее вовлекаются во все сферы деятельности. В частности, в нашей компании топ-менеджмент — прекрасные дамы.

Есть ли какая-то динамика в этой статистике?

Women in 3D printing является крупнейшей аддитивной организацией в мире, которая активно растет

и развивается. Поэтому динамика крайне позитивная: открываются представительства в странах и регионах, проводятся общие мероприятия, обнаруживаются точки пересечения в бизнесах, возникают синергии.

На динамику влияют две причины: человек или не хочет пойти в индустрию, или не может. В первом случае все просто: не хочется — и не нужно. Конечно, здесь есть вероятность, что это тоже пережитки нашей истории и культуры, но в рамках организации решить подобный вопрос будет сложно. Во втором случае это скорее страх перед новым/неизвестным: не могу, потому что кажется, что сложно и не получится, что тяжело будет найти поддержку. Вот тогда это к нам. Аддитивные технологии завораживают и при этом просты в понимании. Поэтому, показывая их относительную простоту и реальность, мы поможем многим людям выбрать для себя это направление развития.

Каким образом действует организация, чтобы заинтересовывать женщин темой бизнеса в этой сфере?

Организация Women In 3D Printing повышает узнаваемость женщин-лидеров в индустрии аддитивного производства и поощряет все больше новичков использовать технологии 3D-печати. Ежемесячно проводятся мероприятия, на которых можно и познакомиться, и обсудить насущные вопросы. Например, в прошлом месяце одна из коллег в Британии проводила мероприятие по керамической 3D-печати, и представители организации по всему миру помогли собрать ей всю

необходимую информацию. Можно найти новых друзей. Например, я за последние два месяца познакомилась с интереснейшими людьми, с которыми можно обсудить множество актуальных профессиональных вопросов. Можно предложить свой формат мероприятия, тему или проект и взяться за его реализацию. Можно через биржу труда найти новых коллег или устроиться на работу по всему миру даже в такие компании, как SpaceX. Мы также разместили там свои вакансии.

Что, по вашему мнению, даст отечественной аддитивной индустрии участие в этой организации?

Я считаю, что самым важным в любом деле является пример других и обмен опытом. Данная площадка поможет нам в России ответить на любой возникший релевантный вопрос четко и по теме, без протоколов. Просто обсудить актуальные вопросы, найти друга по увлечению. Я очень рада, что наша страна вошла в эту организацию. Это значит, что на мировой арене достижения России в аддитивных технологиях будут ярче видны. Возможность интеграции в мировую систему аддитивных технологий позволяет не только прочесть о новинках в открытых источниках, но и непосредственно обсудить инновации. А вовлеченность в процесс пробуждает созидательную энергию и способствует рождению новых идей для развития отрасли. И, надеюсь, каждый участник организации сам достроит ландшафт Women in 3D printing как в России, так и в целом в мире. ■

INDUSTRY 3D
аддитивные технологии и 3D-решения

ЭКСПОЦЕНТР
МЕЖДУНАРОДНЫЕ ВЫСТАВКИ И КОНГРЕССЫ
МОСКВА

25-28 мая 2021 г.

ИНДУСТРИЯ-3D

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ И 3D - РЕШЕНИЯМ
на выставке "Металлообработка-2021"

industry3d.ru | info@industry3d.ru

3D-печать в больницах: шесть трендов 2021 года



В 2020 году из-за пандемии коронавируса медицинской отрасли пришлось столкнуться с невероятной нагрузкой, а также нехваткой материалов, оборудования, медикаментов и рабочей силы. Вместе с тем кризис показал, что инновационные технологии, в частности 3D-печать, способны решить ее важнейшие потребности. Поэтому неудивительно, что темпы внедрения 3D-печати в медицинских учреждениях продолжают расти. Рассмотрим важнейшие тенденции этого года, касающиеся 3D-печати в условиях стационаров.

1. Новые возможности 3D-печати в медицине

В 2020 году наблюдалась острая нехватка медицинских материалов первой необходимости. Основная причина — неоднократные нарушения в длинных цепях поставок во время пандемии. Таким образом, стали очевидны преимущества 3D-печати прямо в медицинских учреждениях. Благодаря скорости и универсальности 3D-лаборатории легко и оперативно адаптируются к новым условиям. При необходимости с их помощью можно напечатать что угодно: от анатомических моделей для планирования хирургических операций до средств индивидуальной защиты.

2. Цифровые коммуникации и дистанционное взаимодействие

Сегодня, когда удаленная работа стала неотъемлемой частью нашей жизни, как никогда возросла потребность в новых способах эффективного взаимодействия. Что касается здравоохранения, быстрое развитие цифровых технологий повысит спрос на телемедицину — удаленную диагностику заболеваний и лечение пациентов. Цифровые технологии станут незаменимы для взаимодействия между врачами, пациентами и 3D-лабораториями. Например, с помощью Materialise Mimics Viewer — онлайн-платформы для настольных и мобильных устройств — можно обмениваться анатомическими 3D-моделями пациентов, схемами хирургического планирования и чертежами медицинского оборудования.

3. 3D-печать в сочетании с виртуальной и дополненной реальностью

Когда-то они использовались для создания видеоигр. Теперь же современные технологии визуализации, такие как виртуальная и дополненная реальность, становятся все более востребованы в клинической практике, дополняя процесс 3D-печати.

С развитием аппаратных средств и специализированного программного обеспечения они стали доступнее и их потенциал значительно возрос. Это не только расширит использование виртуальных технологий в обучении и визуализации клинических случаев, но также облегчит 3D-прототипирование устройств и, возможно, даже поможет хирургам проводить операции.

4. Растущая роль систем управления качеством

На территории Европейского союза производители 3D-принтеров для медучреждений смогут работать в рамках статьи 5 «Регламента о медицинских изделиях» на нескольких условиях. Согласно этим условиям, выпущенное с помощью 3D-печати медоборудование может использоваться только создателем его юридическим лицом. Кроме того, организации здравоохранения должны быть оснащены соответствующими системами управления качеством. В США и ряде других стран законодательство, регулирующее использование 3D-печати в медицине, еще недостаточно разработано. Тем не менее с ростом ее популярности потребность в системах управления качеством только растет.

5. Внедрение 3D-принтеров в работу клиник

Обновление стандарта DICOM (включение инкапсулированных STL- и OBJ-файлов) расширило перспективы интеграции 3D-печати и планирования в работу организаций здравоохранения. Файлы для 3D-печати теперь можно легко архивировать и получать из систем передачи и архивации изображений (PACS). Таким образом, упрощается процесс отслеживания данных, поскольку файлы 3D-изображений теперь привязаны к электронным медицинским картам.

STL-файлы, инкапсулированные в DICOM, поддерживаются версией 23-программного комплекса для анатомического проектирования Mimics Innovation Suite (MIS), а новые OBJ-файлы — версией MIS 24, которая будет выпущена в мае 2021 года.

6. Повышение доступности 3D-принтеров

Технологии 3D-печати постоянно совершенствуются. Производители 3D-принтеров стремятся не только улучшить качество своей продукции, но и сделать ее стоимость оптимальной. Повышение доступности аддитивных технологий даст толчок к внедрению 3D-печати прямо в клиниках и откроет новые возможности ее применения в здравоохранении.

<https://blog.iqb.ru/>

Моделирование аддитивного производства — да!

А что лучше: компьютерное или натурное моделирование?

Компьютерное моделирование процесса 3D-печати металлов позволяет лучше контролировать процесс изготовления деталей. Одно из опаснейших явлений — это отрыв от опорной плиты. Не слишком ли поздно узнать об этой проблеме, когда деталь уже прибывает в производственный цех?

При производстве металлических изделий с использованием аддитивных технологий для каждого из методов изготовления могут применяться определенные правила проектирования. Наиболее сложными с точки зрения определения и установки являются правила проектирования, которые связаны с уменьшением термомеханических деформаций и напряжений, возникающих во время технологического процесса. Такие тепловые явления, происходящие во время процесса печати, оказывают серьезное влияние на получаемый результат. Так, титан, который все чаще используют в процессах аддитивного производства, вызывает увеличение количества потенциальных ошибок. Этот материал имеет высокую точку плавления и, кроме того, плохо рассеивает тепло. Он может накапливать энергию, способную деформировать опорную плиту. В таких случаях можно ожидать, что произойдет уменьшение напряжения, если, конечно, производственный цикл не начнется с отрыва детали от пли-

ты... Если этого не происходит, то релаксационная термообработка детали вместе с опорной плитой позволит снять часть остаточных напряжений, но остаточные деформации будут действовать и после отпуска. Будут ли эти деформации находиться в пределах допуска? Можно ли будет выпрямить горячую деталь подобно детали, получаемой формованием? Если мы имеем дело с алюминиевым сплавом, то да; но в случае с титаном все гораздо сложнее.

Необходимый диалог

В начале производства требуется диалог между проектировщиком и производителем. Продолжительность и результат этого диалога будут особенно важны, если проектировщик плохо знаком со средствами разработки. Чем выше уровень компетентности проектировщика, тем быстрее в конечном итоге удастся запустить нужную деталь в производство.

Опасность отрыва, деформации, растрескивания...

Проектируя процесс аддитивного производства, инженер должен представлять позиционирование изготавливаемой детали в камере принтера. Прежде всего он должен будет минимизировать высоту печатаемого слоя, которая определяет

значительную часть стоимостных затрат. Нанесение слоя требует больших затрат времени и средств, особенно если 3D-принтер работает медленно. Нужно также попытаться минимизировать объем поддерживающей структуры, которую очень дорого удалять вручную. Однако такая ориентация детали может оказаться неблагоприятной с точки зрения ее коробления. Учитывая, что мы работаем с трехмерной формой, которая должна соответствовать функциональным требованиям и критериям стоимости, хочется проверить основные характеристики конструкции, смоделировав процесс ее изготовления. Чем раньше будут найдены оптимальные параметры процесса печати детали, тем меньше придется вносить изменений в ее конструкцию. В такой ситуации получение информации о качественной картине коробления детали позволит оперативно контролировать процесс ее проектирования.

Существует множество программных решений

Мы не будем вдаваться в подробности предлагаемых решений, а просто покажем необходимость их использования на этапе проектирования. Нам понадобится решение, которое будет работать быстро, потому что, возможно, придется последовательно вносить изменения,

выполнив несколько итераций проектирования. Для этого мы готовы оставить в стороне вопрос точности и сосредоточиться только на трендах.

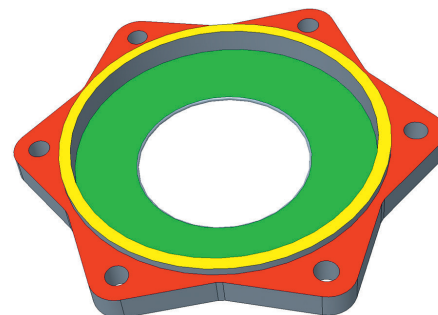
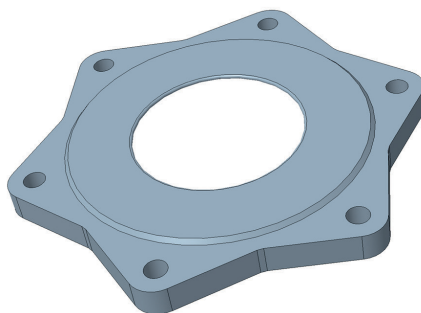
Калибровка программного обеспечения

Программное решение основано на обобщенных моделях работы 3D-принтеров. Калибровку можно выполнить так, чтобы модель лучше отражала природу взаимосвязи «3D-принтер / свойства материала / параметры печати». Этот процесс включает в себя печать «калибровочных образцов» и измерение их деформации на разных этапах производства. Эти измерения затем импортируются в программное обеспечение с целью уточнения поведения модели. При этом такая калибровка будет необходима только тогда, когда потребуется получить точные значения для изготовления 3D-модели с компенсацией искажений формы. Для рассмотрения трендов процесс можно упростить. На рис. 1 простые титановые цилиндрические образцы для растяжения оторваны от пластины. Две трети высоты детали были напечатаны до того, как опоры накопили повреждения и были оторваны. Никто не предполагал такой аварийной ситуации.

Рис. 1. Неудачная попытка изготовления простых цилиндрических образцов для испытания на растяжение



Рис. 2 и 3. Простая деталь со скрытой сложностью поддерживающей структуры



Однако вследствие этого в лучшем случае произойдет остановка производственного процесса, а в худшем – 3D-принтер выйдет из строя, если разравнивающее устройство ударится об деталь. Немного потренировавшись, можно предотвратить этот «эффект банана». До появления специализированного программного обеспечения опыта «специалистов» в проектировании и производстве было достаточно, чтобы ограничить число производственных сбояв. Поскольку опытный образец должен позволять проверить точное направление печати, а количество наносимого материала строго определено, единственным решением является усиление поддержек путем добавления пилонов из сплошного материала с последующим их удалением при механической обработке. Когда начали крепить прямую часть образца, он полностью оторвался от опорной плиты. Из этого можно вывести одно правило: аддитивное производство не любит детали бесконечной длины и непрерывные поверхности.

При возможности нужно разбивать эту непрерывность.

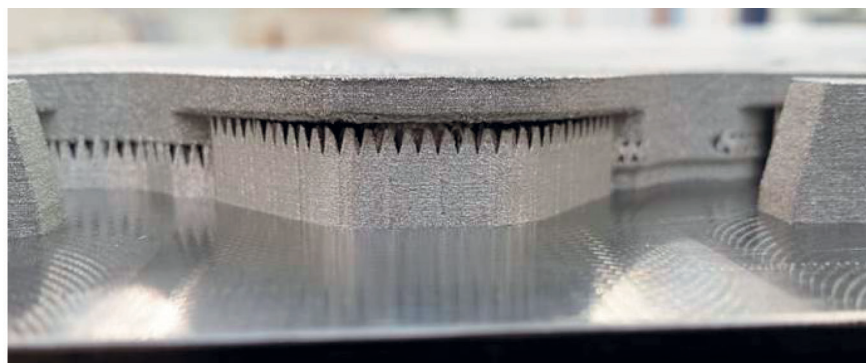
Для более сложных случаев

Кто может предвидеть проблемные области более сложных деталей? Моделирование может обнаружить их, если иметь подходящий инструмент. На рис. 2 и 3 представлена упрощенная конструкция детали, отображающая проблему. Поскольку ориентация детали задана, а последующая механическая обработка не допускается, деталь будет опираться на пластину на участке поверхности, отмеченном желтым, а на поверхностях, отмеченных красным и зеленым, потребуются поддержки.

Непредвиденное локальное разрушение опорной конструкции

На рис. 4 видно, что при печати очень рано произошел подъем фиксирующего кронштейна, что прервало процесс производства.

Рис. 4. Во время печати очень рано произошел подъем фиксирующего кронштейна



По прошествии получаса после ввода данных и начала расчетов были получены результаты, показанные на рис. 5: четко видна зона максимального смещения с риском отрыва детали от опорной плиты.

Как решить эту проблему

Замена поддержек на более жесткие и прочные будет означать необходимость повторной механической обработки, что недопустимо по техническому заданию. Можно убрать часть материала в области повреждения с помощью зенковки. Но будет ли этого достаточно? В этом случае участие проектировщика обязательно. На рис. 6 мы видим, что опасность отрыва значительно меньше. Однако деталь может сместиться вследствие появления трещин по краям слоев... Рис. 6 и 7 — меньшее количество материала и улучшенное распределение предотвращают накопление локальных деформаций. Наилучшим решением будет сокращение количества материала строго до необходимого при ограничении функции фиксации. Следование принципу топологической оптимизации «нужное количество материала в нужном месте и строго по необходимости» приводит к экономии материала. Однако ответственность за это решение несет проектировщик.

Моделирование в проектно-конструкторском бюро

Поскольку поведение детали в общих чертах может быть известно, проектировщик может внести изменения еще до того, как 3D-принтер приступит к работе. После устранения опасности отрыва внимание следует обратить на устранение остаточных деформаций после отделения от опорной плиты. При этом придется работать

Рис. 5. Ясно видимая зона максимальных перемещений

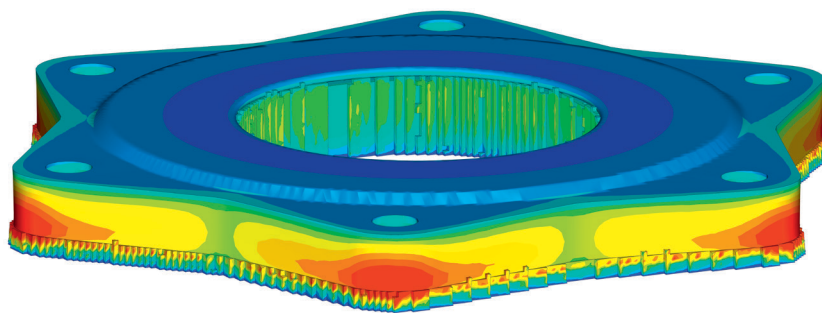
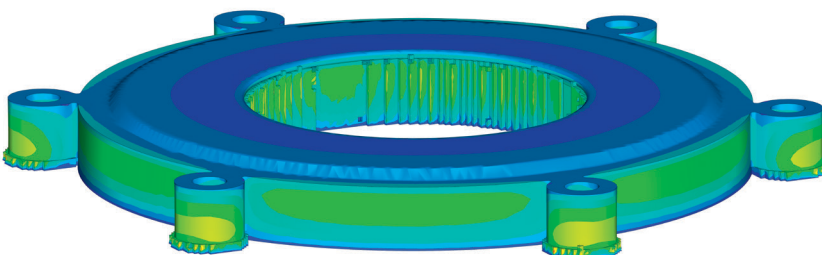
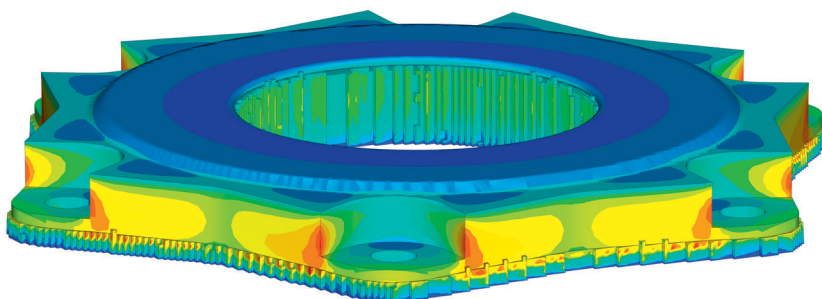


Рис. 6 и 7. Меньшее количество и лучшее распределение материала предотвращают накопление локальных деформаций



с деталями с компенсацией искажений формы, но это уже другая история!

Компьютерное моделирование проводилось с использованием программного комплекса Simufact

Additive компании MSC Software (подразделение Hexagon MI). ■

По материалам журнала компании MSC Software Engineering Reality 2020

MSC Software RUS (Московский офис MSC Software, подразделение Hexagon MI)
г. Москва, 2-я Звенигородская ул., д.13, стр. 43
(+7) (495) 363-06-83
www.mscsoftware.com/ru, Marketing.Russia@mscsoftware.com

Московский офис MSC Software (подразделение Hexagon MI) более четверти века работает на территории России, СНГ, Грузии и стран Балтии.

Предлагаемые услуги:

- Продажа программных комплексов компании.
- Техническая поддержка.
- Обучение специалистов.
- Сервис.

Есть ли место персональным FDM 3D-принтерам в производстве и бизнесе?

Сравнение персональных и промышленных 3D-принтеров

Вопреки множеству мнений о несерьезности персональных FDM 3D-принтеров для производственных задач они активно используются на различных предприятиях. Конечно, в печати высокотемпературными материалами изделий больших размеров они проигрывают промышленным 3D-принтерам, но все же имеют ряд преимуществ.

Первая и самая очевидная — цена и доступность. В сравнении с промышленными гигантами с большими ценниками персональные 3D-принтеры могут себе позволить практически любые предприятия. И это наиболее удачное решение для экспериментов и оценки эффективности идеи. Низкая цена позволяет купить несколько 3D-принтеров, организовав ферму.

Второе преимущество — простота работы и обслуживания. Конструкция и системы в персональных 3D-принтерах проще, а значит, его проще обслуживать и производить ТО.

Третье преимущество — материалы для печати более доступные.

Материалы для печати

Промышленные 3D-принтеры ориентированы для работы со специальными материалами — высокопрочными, высокотемпературными. Такие принтеры оснащены терморегулируемой камерой и высокотемпературным экструдером, что в совокупности и дает возможность печатать изделия больших размеров из специальных материалов. Эти же конструкционные особенности осложняют печать такими простыми и доступными материалами, как PLA, PETG, а ABS должен быть высокого качества.

Но именно из таких материалов печатают первые прототипы перед запуском итогового изделия из специального материала.

Что касается персональных 3D-принтеров, то высокотемпературные экструдеры значительно расширили список материалов для печати, а на некоторых моделях,

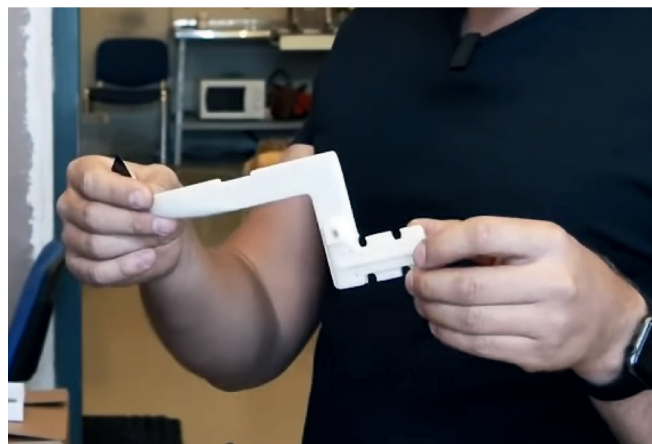
как, например, на Hercules G2, можно печатать и материалом PEKK (полиэфиркетонкетон). И это самый производительный 3D-принтер среди персональных, что подтверждается характеристиками его комплектующих. Кроме того, разрабатываются специальные композитные материалы, характеристики которых отвечают необходимым требованиям различных производств, например, линейка материалов Clotho Filaments. Clotho Filaments — это композиты на основе ABS, PA12, PSU. Отличаются повышенной прочностью, пониженной усадкой, простотой в печати и высокой температурой эксплуатации — до 200 градусов.

Реальные примеры использования персональных 3D-принтеров на производстве и их выгода

Доступная цена и широкий выбор материалов позволяют использовать персональные 3D-принтеры практически в любой сфере и для различных задач:

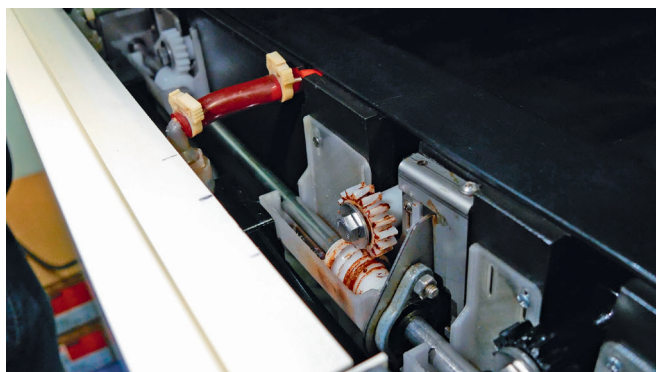
1) Оптимизация станков производства.

Например, компания ShokoBox, используя 3D-принтер Hercules Strong, оптимизировала имеющиеся станки и сэкономила. Например, оригинальный нож для захвата этикетки 1500 евро, печать такого ножа — 1000 рублей.



2) Ремонт станков и другой техники.

«Инжиниринг Сервис СПб». Печать сломанных деталей для станков на 30% сокращает издержки на ремонт и на 46% сокращает время ремонта станков.



3) Изготовление прототипов устройств и готовых корпусов.

Всероссийский научно-исследовательский институт биологической защиты растений.

Печать корпусов позволяет уменьшать стоимость конечного изделия, делая его более конкурентным и доступным.



Стоимость корпуса, напечатанного на 3D-принтере, 2500 рублей, Полная стоимость производимого оборудования 15000 рублей. Стоимость оборудования у конкурентов 36000 рублей.

4) Изготовление мастер-моделей.

ЗАО «Энергия» – производитель трубопроводной арматуры. На 3D-принтере изготавливает мастер-

модели. Сэкономила 750 000 рублей, купив три 3D-принтера Hercules Strong вместо одного ЧПУ-станка.

5) Изготовление конечных изделий или части устройств.

OPERLY занимается проектированием и производством аудиокомпонентов класса High-End. 3D-принтер позволяет изготавливать уникальные устройства, а также оперативно вносить изменения в производимые элементы.



Нельзя утверждать, что каждый персональный 3D-принтер можно использовать на производстве.

При выборе 3D-принтера необходимо учитывать:

- Производительность. Он должен быть быстрым, и указанные параметры должны подтверждаться механикой и электроникой.
- Он должен печатать заявленными материалами.
- Сопла должны быть выполнены с учетом печати заявленными материалами.
- Удобство работы и управления.

Мы производим три модели 3D-принтеров, которые отвечают требованиям производств, и помогаем подобрать оптимальный вариант для решения необходимых задач. ■

 **IMPRINTA**

Контакты:

+7(800) 222-90-20, +7(933)332-90-20

sales@imprinta.ru

imprinta.ru

Москва, Большая Почтовая улица, 55/59с1, офис 327-329

Красноярск, Ястынская, 15А, помещение 76

Серийное производство пластиковых компонентов, изготовленных методом аддитивных технологий, для автомобильной промышленности

Концерн OECHSLER, вероятно, крупнейший в мире производитель пластиковых компонентов, изготовленных методом аддитивных технологий, стал одним из первых клиентов, решивших приобрести новое решение для постобработки S1 от производителя AM Solutions — 3D post processing technology. OECHSLER использует установку для удаления остаточного порошка и струйной очистки. Автоматизированные процессы установки позволяют концерну соответствовать высоким требованиям автомобильной промышленности к качеству, воспроизводимости, отслеживаемости и экономической эффективности благодаря применению автоматизированных процессов.

Концерн OECHSLER со штаб-квартирой в городе Ансбах (ФРГ) является мировым лидером в производстве пластиковых компонентов. С 2017 года он интенсивно занимается аддитивным производством и за это время стал одним из крупнейших в мире производителей пластиковых компонентов, изготовленных методами аддитивных технологий. В кооперации с ведущими производителями 3D-принтеров и поставщиками соответствующих материалов предприятие активно развивает массовое производство компонентов, изготовленных методами аддитивных технологий, в таких отраслях, как автомобилестроение, производство бытовой и промышленной техники, производство спортивных товаров. «Постобработка представляет собой большую проблему в области аддитивного производства. Эта часть производственной цепочки, которой долгое время не уделяли должного внимания, является решающим фактором для рентабельности и качества продукции, изготовленной методами аддитивных технологий. Важной задачей в этом контексте являются разработка и точное определение процедур автоматической постобработки», — объясняет Маттиас Вайскопф, старший вице-президент по глобальному развитию продукта и технологий концерна OECHSLER. «Опыт концерна OECHSLER в серийном производстве и связанные с ним требования к постобработке очень

помогли нам на завершающем этапе разработки оборудования», — добавляет Мануэль Лаукс, руководитель AM Solutions — 3D post processing technology.

Воспроизводимость — важнейший критерий

Концерн столкнулся с этой проблемой, выпустив инновационный продукт для известного немецкого производителя автомобилей. Этот продукт с так называемой решетчатой структурой печатается из недавно разработанного материала. Для того чтобы запустить продукцию в серийное производство, концерну необходимо было найти решение для автоматизированной постобработки, которое среди прочего соответствовало бы требованиям автомобильной промышленности для получения высококачественных и стабильных результатов обработки. «С компанией Rösler на протяжении уже многих лет мы поддерживаем хорошие деловые

Новая установка S1 от AM Solutions — 3D post processing technology для автоматизированного удаления остаточного порошка и струйной очистки пластиковых деталей, полученных методами 3D-печати, гарантирует, что концерн OECHSLER выполняет все требования к воспроизводимости и отслеживаемости, а также к экономической эффективности. Фото: OECHSLER AG





«Постобработка, которой долгое время не уделялось должного внимания, является одним из решающих факторов рентабельности и качества деталей, изготовленных методами аддитивных технологий. В AM Solutions — 3D post processing technology мы нашли партнера, который принял наши требования и вместе с нами разработал оптимальное решение. Поэтому мы видим в нашем партнерстве большой потенциал для будущего развития», — говорит Маттиас Вайскопф, старший вице-президент по глобальному развитию продуктов и технологий концерна OECHSLER. Фото: OECHSLER AG

отношения, и благодаря рекомендации нашего партнера по кооперированию компании HP мы продолжили сотрудничество в новой сфере деятельности AM Solutions — 3D post processing technology, подробно изучив ее новое решение для постобработки — установку S1. Решение в пользу AM Solutions было принято после интенсивных обсуждений и проведения испытаний с различными производителями оборудования в области постобработки деталей, изготовленных методами 3D-печати», — сообщает Маттиас Вайскопф. Установка струйной очистки, специально разработанная для постобработки пластмассовых деталей, изготовленных методом аддитивных технологий, работает по принципу Plug and Play («подключай и работай»). Автоматизированная обработка партий компонентов происходит в поворотной корзине.

Гибкость и стабильность технологического процесса — решающие факторы

Решающим фактором в пользу дробеструйной системы S1, с одной стороны, была возможность обрабатывать разные виды материалов, например, полиамид, полипропилен или термопластичный уретан, и универсальность режима эксплуатации при обработке. Помимо автоматизированной обработки установка легко может быть перенастроена на ручной режим. При этом полностью исключаются требующие времени операции по переоснащению или перенастройке, как это требуется для других установок. Кроме того, убедительными были и различные элементы оснащения, например, такие как антистатическое полиуретановое покрытие установки и поворотной корзины, а также комплектация двигателями и клапанами, соответствующими требованиям АТЕХ. Еще одним фактором была эргономичность загрузки и выгрузки партий деталей. Во время этих операций поворотная корзина остается полностью в установке, что предотвращает попадание загрязнений в окружающее пространство. Другими важными характеристиками явились автоматический контроль и сохранение различных параметров обработки, а также интегрированная система подготовки дробы. «Эти стандартные характеристики необходимы для удовлетворения требований автомобильной и других

отраслей промышленности в отношении безопасности процессов, рентабельности и воспроизводимости результатов обработки. Они незаменимы для преобразования аддитивного производства в технологию массового производства», — сообщает Маттиас Вайскопф.

Конструктивная и открытая совместная работа — для достижения быстрого результата

Проектные группы обеих компаний совместно разработали индивидуальные решения для конкретных технологических требований концерна OECHSLER. Открытая и конструктивная атмосфера между двумя компаниями стала важным фактором для достижения желаемых положительных результатов в удивительно короткие сроки. Это позволило ввести установку S1 в эксплуатацию на предприятии OECHSLER в конце августа 2020 года. «В лице компании AM Solutions — 3D post processing technology мы нашли партнера, который принял наши требования и совместно с нами разработал оптимальное решение. Поэтому мы видим в нашем партнерстве большой потенциал для будущего развития», — отмечает Маттиас Вайскопф. ■

Уже более 80 лет фирма Rösler Oberflächentechnik GmbH работает в области обработки поверхности. Являясь лидером мирового рынка, мы предлагаем широкую линейку оборудования, технологических средств и услуг в области техники галтовки и дробеметного/дробеструйного оборудования для различных отраслей промышленности. В нашем ассортименте около 15000 видов технологических средств, специально разработанных в наших тестовых центрах и лабораториях по всему миру для выполнения индивидуальных требований заказчиков. Под брендом AM Solutions мы предлагаем многочисленные решения и услуги в области 3D-печати/аддитивного производства. Как центральный учебный центр Академия Rösler проводит практические семинары по технике галтовки, дробеметной/дробеструйной технике, бережливому производству и аддитивному производству. К группе компаний Rösler относятся помимо заводов в Германии в Унтермерцбах/Меммельсдорф и Бад-Штаффельштайн/Хаузен 15 подразделений и около 150 торговых представительств по всему миру.

Подробная информация на www.rosler.com
www.solutions-for-am.com

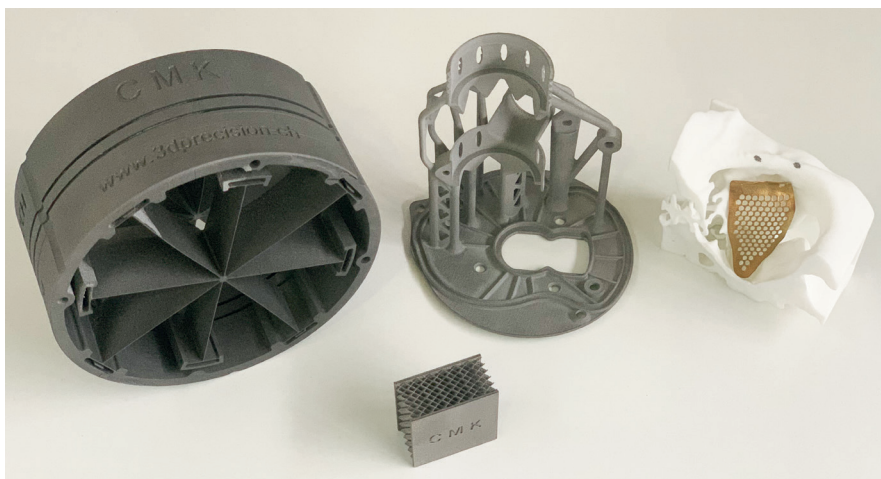
Порошки, полученные методом PREP, для аддитивных технологий и ГИП

Аддитивные технологии — наиболее перспективный метод производства изделий из металлических порошков. Суть метода заключается в послойном спекании порошка заданного фракционного состава с целью получения детали, максимально приближенной к годному изделию по геометрическим параметрам.

При данном процессе достигаются высокие показатели по выходу годного изделия и технологичности процесса, которых невозможно достичь традиционными технологиями. Применение аддитивных технологий открывает новые возможности производства сложноконтурных деталей, повышая коэффициент использования металла (КИМ) и уменьшая цикл производства детали.

Качество металлических порошков играет решающую роль при его использовании как исходного материала для изготовления деталей. В зависимости от вида аддитивных технологий предъявляются требования к фракционному составу и физико-механическим параметрам (текучесть, плотность, сферичность, пористость и т.д.) порошков.

Методы аддитивных технологий представляет собой группу технологий, объединенных на основе принципиально разных технологических подходов. Первая группа представляет собой послойное выращивание деталей на подложке (слой за слоем) с выборочным спеканием слоев порошков лазером, вторая группа — непосредственную подачу порошков в заданное место с практически одновременным их



спеканием лазером, к третьей группе относится изготовление мелких металлических деталей при помощи метода прессования смеси из металлического порошка и наполнителя. Таким образом, можно производить детали с достаточно сложной формой, которые можно практически не подвергать механической обработке. Сырьем для МИМ-технологий служит гранулированная смесь мелкодисперсных порошков с полимерным связующим веществом.

Самым распространенным, производительным и эффективным методом получения порошков для аддитивных технологий является метод распыления расплава газом (атомайзинг).

Для данного способа существует несколько различных установок, позволяющих получать порошок заданного фракционного состава:

- распыление газом из расплава (VIGA);
- оплавление электрода, помещенного в индукционное поле,

и распыление образующегося расплава газом (EIGA).

Однако у данных методов при всех положительных моментах имеются недостатки: порошок имеет неправильную форму частиц; наличие сателлитов; порошок имеет внутригранульную пористость.

Главная причина: столкновение твердых, полутвердых и жидких частиц. Поэтому твердые и жидкие частицы должны присутствовать в одной и той же области распыления (температурный интервал: перегрев и диапазон затвердевания).

Атомайзеры типа VIGA применяются в частности для получения следующих порошков:

- никелевые жаропрочные сплавы (например, Inconel 718, Rene 88 и т.д.) для деталей авиационных и стационарных турбин;
- сплавы на основе кобальта для использования в медицине, стоматологии и производстве мишеней ионного распыления;
- порошки для плазменного напыления (например, NiCrAlY,

CoCrAlY и т.д.) защитных покрытий на детали из жаропрочных сплавов;

- порошки для гранульной металлургии (например, 17-4PH, 316L), используемые в автомобильных деталях массового производства;

- композиции для спекания в порошковом слое (например, кобальтовые сплавы, драгоценные металлы), используемые в АМ-машинах;

- высоколегированные стали (например, инструментальная сталь, быстрорезы) с очень высоким содержанием карбидов;

- цветные металлы (например, медные или оловянные сплавы для различного применения).

Технология EIGA (Electrode induction guide inert gas atomization) — индукционная плавка электрода с распылением газом) является еще одним видом газовой атомизации и разработана специально для получения порошков реактивных металлов — Ti, Zr, Hf, V, Pt, Ir, Nb, Mo и др., поскольку плавка этих металлов в керамических тиглях затруднена, а порой невозможна даже в условиях вакуума, а в холодном тигле связана с высокими затратами энергии.

EIGA-атомайзер применяется для получения металлических порошков методом распыления в струе аргона. Согласно технологии EIGA, прутки (так называемый feed stock — сырье, исходный материал) после предварительной

выплавки в форме электродов проходят индукционную плавку и расплываются без использования плавильного тигля. Плавление производится опусканием медленно вращающегося электрода в конический индуктор. Капли металла стекают с торца электрода в полость форсунки и расплываются инертным газом. Типичными материалами, получаемыми по технологии без использования керамики, являются тугоплавкие и активные материалы, например TiAl, FeGd, FeTb, Zr и Cr. Она может использоваться для многих других конструктивных материалов на основе Fe, Ni, Co также с высокой производительностью за счет полунепрерывного принципа действия и быстрой смены электрода.

Другой вид атомизации — технология плазменного распыления быстровращающегося электрода (PREP — Plasma Rotating Electrode Process). Данная технология характеризуется максимальной сферичностью получаемых гранул и более крупным их размером по сравнению с газовой атомизацией.

АО «СМК» с конца 70-х годов XX века является крупнейшим предприятием по производству порошков из жаропрочных никелевых сплавов. Из полученных методом PREP порошков и последующим HIP получают заготовки дисков и валов для ГТД с высокими прочностными характеристиками.

Метод PREP заключается в центробежном плазменном распыле-

нии быстровращающейся литой заготовки из никелевого или титанового сплава в инертной среде. К ее торцу подается поток тепловой энергии плазмотроном с заданной мощностью и установленным эксцентриситетом по отношению к торцу заготовки. Плазменный факел расплавляет торец заготовки, на котором образуется поверхностная пленка расплава. Под действием центробежных сил расплав в пленке движется от центральной оси заготовки к периферийной части, где скапливается, образуя «венец».

Далее капля расплава срывается и отлетает в камеру распыления, где в процессе падения в среде инертных газов кристаллизуется.

Принято считать, что метод PREP имеет ряд преимуществ перед процессами VIGA и EIGA, основными из которых являются:

- сферичность полученного порошка (более 95%);
- отсутствие внутригранульной пористости;
- отсутствие сателлитов;
- наилучшие показатели текучести и насыпной плотности в сравнении с порошками, полученными газоструйным распылением.

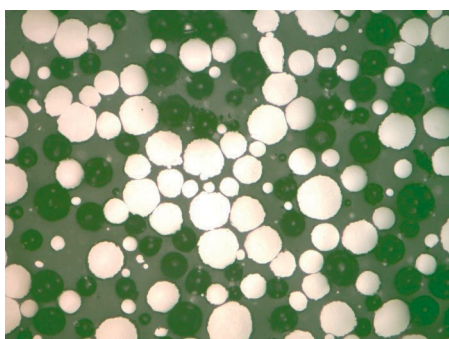
В АО «СМК» непрерывно производится модернизация оборудования, в том числе и установок центробежного распыления. Применение новых технологических подходов и приемов позволили перевести основной рабочий диапазон в область, пригодную для аддитивных технологий, и производить порошки из титановых сплавов с максимально возможным выходом годного.

В данной работе была поставлена задача разработки технологии производства порошков из титанового сплава BT-6 (Ti6-4) фракций (45–105) мкм, (0–40) мкм, (20–45) мкм.

Для выполнения поставленной задачи на производственных мощностях АО «СМК» были изготовлены электроды из сплава

Рис. 1. Изображение порошка BT6, ×100

а)



б)

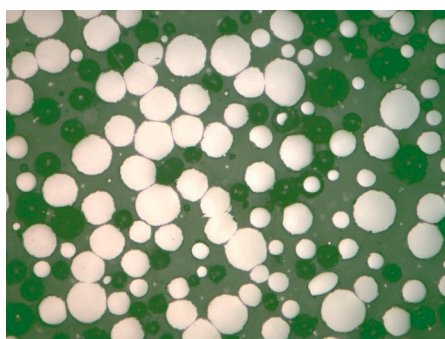


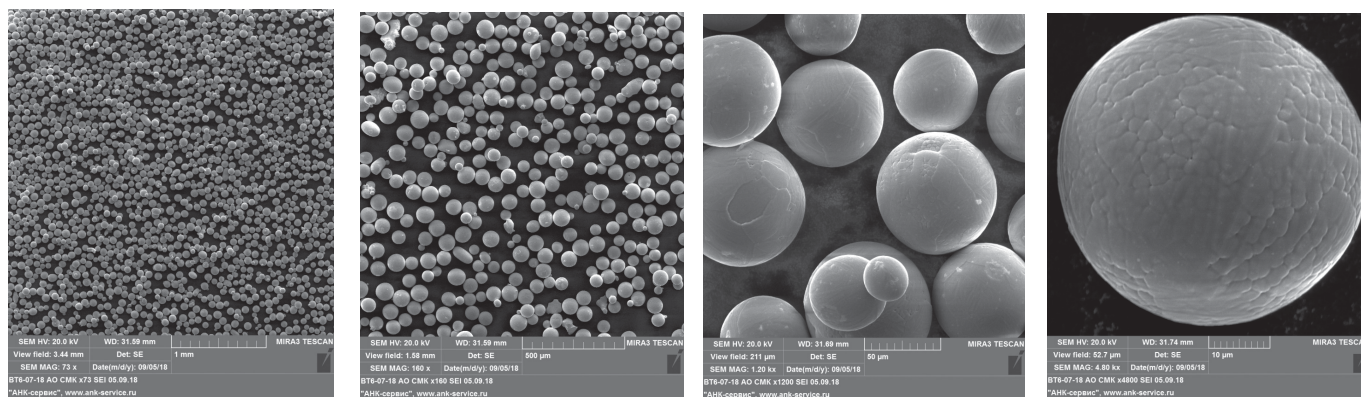
Рис. 2. Вид частиц порошка фракционного состава 45–105 мкм во вторичных электронах

а) ×25

б) ×50

в) ×380

г) ×1500



BT6 для плазменного распыления с узкими интервалами легирования и низким содержанием примесей. Выплавку слитков из сплава BT6 производили методом вакуумно-дугового переплава прессованного расходоемого электрода в условиях АО «СМК». Впоследствии данный слиток подвергали операциям, которые превращали слиток в электрод для центробежного плазменного распыления на установке центробежного распыления.

После процесса распыления были получены три партии гранул следующих фракционных составов: 45–105 мкм; 25–45 мкм; 0–40 мкм.

Рассев порошков на заданные фракции производили по разработанной технологии на АО «СМК».

Затем полученные порошки подвергали исследованиям и испытаниям.

Исследования партий гранул 45–105 мкм, 25–45 мкм, 0–40 мкм проводили в независимых аттестованных лабораториях.

Определение формы гранул порошка из титанового сплава BT6 фракции (45–105) мкм выполняли при помощи компьютерной программы Image Expert Pro 3x. Согласно ГОСТ 25849–83, для описания формы частиц используют фактор формы, представляющий собой отношение максимального линейного размера (l_{max}) частиц к ее минимальному размеру (l_{min}).

Количественный анализ гранул порошка проводили, анализируя не менее 250 гранул на 5 случайных полях зрения. Закрашивание гранул порошка проводили в полуавтоматическом режиме, анализируя только те гранулы, которые видны на изображении полностью, без дефектов и перекрытий.

В порошке из сплава BT6 фракции (45–105) мкм обнаружены частицы сферической формы (l_{max}/l_{min} от 1,0 до 1,2) и округлой формы (l_{max}/l_{min} от 1,2 до 2,0). Объемная доля частиц сферической формы составляет 96,4%, частиц округлой формы – 3,6%. Частиц неправильной формы (вытянутой, игольчатой) не обнаружено.

Фотографии полей зрения, на которых определяли форму гранул порошка, приведены на рис. 1 а, б.

Фотографии вида частиц порошка BT6 фракционного состава (45–105) мкм во вторичных электронах приведен на рис. 2 (а, б, в, г).

Затем подвергли исследованиям партию гранул фракционного состава (25–45) мкм. Исследования проводили методом электронной микроскопии, выполненной независимой лабораторией.

Электронно-микроскопический вид частиц порошка фракции (25–45) мкм приведен на рис. 3.

Исследование гранулометрического состава титанового порошка фракции (0–40) мкм осуществля-

Рис. 3. Вид частиц порошка во вторичных электронах, ×190

а)

б)

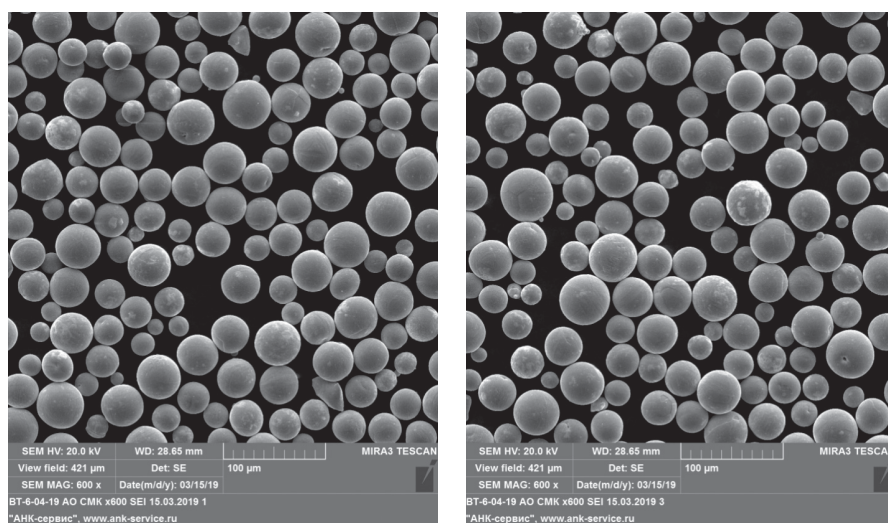
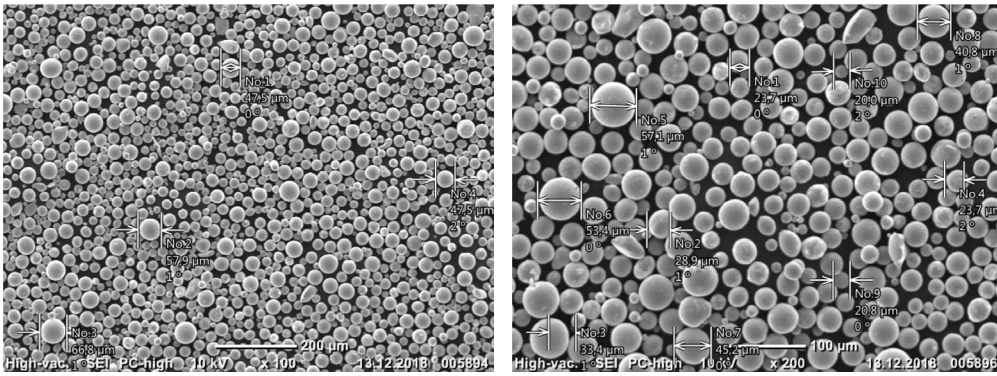


Рис. 4. Фото РЭМ порошка ВТ6 фракции 0–40мкм



лось методом лазерного динамического светорассеяния (DLS) на приборе «Analysette 22».

Из экспериментальных данных следует, что предоставленный с маркировкой «Фракция 0–40 мкм» порошок сплава ВТ-6 фактически имеет размеры частиц в диапазоне от $D_{10} = 20,3$ до $D_{90} = 45,6$ мкм при среднем диаметре частиц $32,8 \pm 0,5$ мкм. Распределение размеров частиц имеет «острый пик», и коэффициент эксцесса положителен, что говорит о полноте и качестве проведенного процесса сепарации частиц по размерам.

Исследование, выполненное при помощи растрового электронного микроскопа «JEOL», подтвердило полученные методом DLS данные о распределении размеров частиц порошка (рис. 4). РЭМ-изображения показывают, что исследуемый порошок имеет в своем составе преимущественно частицы строго сферической формы, а дефекты-сателлиты на поверхности частиц отсутствуют, что характерно для метода центробежного плазменного распыления (PREP).

Все изготовленные фидстоки были подвергнуты технологическим пробам по оценке их форму-

емости при литье под давлением. В настоящее время проводятся испытания полученных фидстоков по МИМ-технологии.

Подводя итог, можно сказать, что более 96% полученного порошка в условия АО «СМК», изготовленного из титанового сплава ВТ6 различного фракционного состава методом плазменного распыления быстровращающегося электрода, имеют сферическую форму, не пораженную сателлитами и без наличия внутригранульной пористости, что крайне важно для применения данных порошков в аддитивных технологиях. ■



АО «Ступинская
металлургическая компания»
142800, Московская область,
г. Ступино, ул. Пристанционная, вл. 2
+7 (495) 598-50-00 доб. 4001/4002
<http://www.cmk-group.ru>

VII Международный технологический форум

**ИННОВАЦИИ.
ТЕХНОЛОГИИ.
ПРОИЗВОДСТВО.**

Тема форума:
«БИЗНЕС-МОДЕЛЬ-2030»
онлайн-формат

г. Рыбинск,
Ярославская область

24-25 МАЯ 2021

ОДК | САТУРН | ОДК | Ростех | СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РУССИИ | РГТУ имени П.А. Соловьева | 20.35 НАЦИОНАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНИЦИАТИВА | ПЛАТФОРМА НТИ

Аддитивные технологии SMS group – ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО ВСЕЙ ЦЕПОЧКЕ СОЗДАНИЯ СТОИМОСТИ

Dr.-Ing. Tobias Brune, вице-президент департамента аддитивных технологий и порошковой металлургии, SMS group GmbH

M. Sc. Yannik Wilkens, разработка материалов, менеджер, SMS group GmbH, Мёнхенгладбах

Dipl.-Ing. Peter Weiland, главный эксперт по научным разработкам, SMS group GmbH, Мёнхенгладбах

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Odenthal, научные разработки, глава отдела моделирования потоков, структурного анализа и материальных технологий, SMS group GmbH, Дюссельдорф

Dr.-Ing. Norbert Vogl, научные разработки, моделирование потоков, SMS group GmbH, Дюссельдорф

Обзор

Центр компетенций SMS group по аддитивным технологиям охватывает всю цепочку создания стоимости в аддитивном производстве. Установка атомизации, разработанная и поставляемая фирмой SMS, отличается экономичностью и высоким качеством производства металлического порошка. Количество дефектов минимизируется благодаря встроенной системе формирования однородных частиц (антисателлитной системе). Гидродинамическое моделирование (метод CFD) процесса атомизации с оптимизированной форсункой компактного монтажа позволяет улучшить свойства порошка и выход годного. Для обеспечения высокого качества порошка SMS group проводит исследования его отдельных свойств и применимых методов измерений.

Центр компетенций аддитивных технологий

SMS group – ведущий мировой партнер в металлургии, предлагающий передовые решения для всей технологической цепочки производства. Как пионер отрасли, SMS group поставляет установки для производства высококачественного металлического порошка высокой степени очистки для аддитивного производства.

Благодаря исследовательской деятельности центра компетенций аддитивных технологий мы непрерывно получаем новый опыт взаимной интеграции каждого из этапов технологической цепочки. На базе накопленных знаний происходит постоянная оптимизация экономических показателей и технических характеристик процесса производства порошка. Сегодня аддитивное производство уже используется для серийного изготовления компонентов различных установок.

Сердцем центра компетенций является установка атомизации, предназначенная для производства вы-

сокачественного металлического порошка (рис. 1). Следующим технологическим этапом является классификация и упаковка порошка перед тем, как он будет использован в аддитивном производстве.

Сырьевые материалы, поступающие на установку атомизации, расплавляются в индукционной печи под вакуумом или в атмосфере инертного газа. Размер плавильной печи варьируется, возможен расплав до 500 кг сырья. Через промковш расплавленный металл подается в блок атомизации. Атомизация выполняется с использованием холодного или горячего инертного газа через форсуночное устройство с компактным соединением. Оптимизируя геометрию форсунки, возможно увеличить выход порошка мелкой фракции, которая необходима для аддитивного производства, а также улучшить форму распыляемых частиц. Для этого проводится моделирование процесса атомизации. Морфология частиц улучшается благодаря встроенной системе формирования однородных частиц (антисателлитной).

Рис. 1. Установка атомизации для производства порошков в центре компетенций SMS group, Мёнхенгладбах



Благодаря интеграции процесса с последующими технологическими этапами, такими как сортировка и упаковка порошка, постоянной атмосфере инертного газа и системе формирования однородных частиц (антисателлитная) гарантируется экономичное производство высококачественных металлических порошков из различных сплавов.

Процесс атомизации

Для оптимизации выхода годного и повышения качества порошка рекомендуется определить влияние технологических параметров, параметров процесса атомизации, определить настройки установки, влияющие на свойства порошка, то есть его гранулометрический состав, форму частиц, насыпную плотность или сыпучесть. Здесь моделирование процесса атомизации, в котором участвуют жидкий металл и окружающий инертный газ, дает возможность реалистично представить и смоделировать влияние большого числа факторов, влияющих на процесс, при помощи метода компьютерной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Метод анализа CFD предусматривает разделение вычисляемой области на большое количество контрольных объемов. Использование соответствующих подходов позволяет численно решить нелинейные связанные дифференциальные уравнения, описывающие физические процессы в потоке.

Сложности для моделирования возникают при экстремальных скоростях, многократно превышающих скорость звука (сжимаемый сверхзвуковой поток), которые возникают во время распыления при температуре примерно от -200 до 1700°C . Кроме того, не все процессы во время распыления могут быть представлены контрольными объемами, поскольку типичная мера физических процессов во время образования капель меньше одного микрометра, но сама распылительная установка на шесть-семь порядков больше; необходимое количество контрольных объемов намного превышает доступные вычислительные мощности. Поэтому для расчета образования капель необходимо разработать эмпирические модели с подсеточным масштабом. Похожие подходы используются для других моделей, например, горения топлива в дизельном двигателе. К сожалению, эти подходы невозможно просто перенести на наш случай. Поэтому в сотрудничестве с кафедрой механики жидкостей и аэродинамики Дармштадтского технического университета был

запущен исследовательский проект с целью разработки таких подсеточных моделей и их валидации с использованием испытательного стенда на воде. На первом этапе результаты расчета потока чистого газа были проверены на данном испытательном стенде, в сотрудничестве с Техническим университетом Дармштадта.

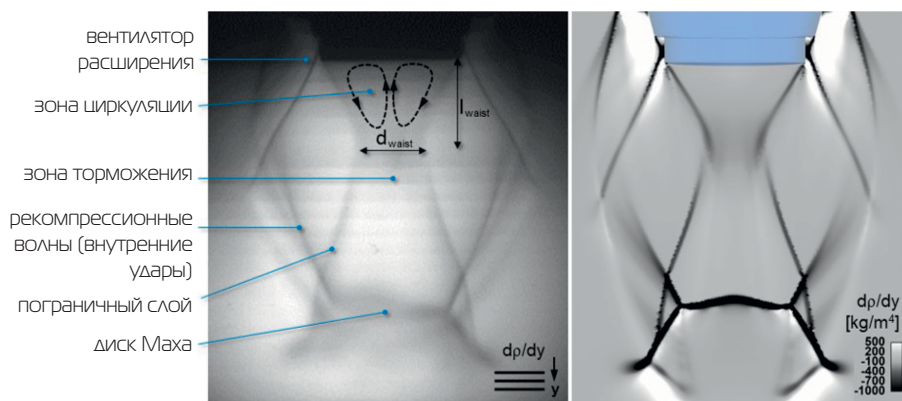
В качестве примера на рис. 2 показано сравнение между вертикальным градиентом плотности dp/dy , определенным с помощью фокусирующего шлирен-метода, и градиентом при $p_{in} = 15$ бар, рассчитанным методом гидродинамического моделирования процесса распыления через сопло атомизатора.

Характерные явления, такие как волны расширения Прандтля–Мейера, волны рекомпрессии, слой свободной струи, зона рециркуляции, точка торможения и перетяжка струи очень хорошо воспроизводятся в числовом виде. В частности, довольно точно прогнозируются дискообразные скачки уплотнения и углы ударного воздействия [1].

Продолжается разработка и проверка моделей каплеобразования. Доступны первые результаты расчетов распыления для испытательного стенда на водной основе (рис. 3). Однако для адаптации параметров моделирующего подхода к широкому набору сфер применения необходимы дополнительные расчеты и соответствующие эксперименты как на водном испытательном стенде, так и на производственной установке.

Кроме этого необходимо моделировать затвердевание металлической капли по ходу ее продвижения в распылительной башне. Поскольку капли очень быстро остывают, они остаются жидкими даже после падения температуры ниже температуры плавления. Только после достижения определенного переохлаждения и появления определенного количества центров кристаллизации в капле происходит фазовый переход, теплота плавления освобождается и капля затвердевает. Цель состоит в том, чтобы рассчитанные и полученные распределения частиц по размерам соответствовали определенным пределам погрешности. Эта цель наклад-

Рис. 2. Сравнение: а) эксперимент (фокусирующий шлирен-метод) в лабораторном атомизаторе ТУ Дармштадта; б) CFD-моделирование $p_{in} = 15$ бар, средний вертикальный градиент плотности dp/dy ($z = 0$)



дывает ограничения на результаты, которые сегодня могут быть получены по методу CFD.

Определение характеристик металлического порошка для аддитивного производства

Для описания не зависящих от типа материала, качественных характеристик металлического порошка, используемого в аддитивном производстве, необходимо знать свойства порошка и требуемые характеристики этих свойств, а также располагать подходящими методами измерения. Необходимы исследования, особенно в отношении последних двух требований. Большинство методов измерений происходят из других областей техники и поэтому в разной степени подходит для определения характеристик порошков в области аддитивного производства металлов [2]. Недавние исследования SMS group показывают, что некоторые методы частично непригодны для определения характеристик порошков в соответствии с действующими стандартами.

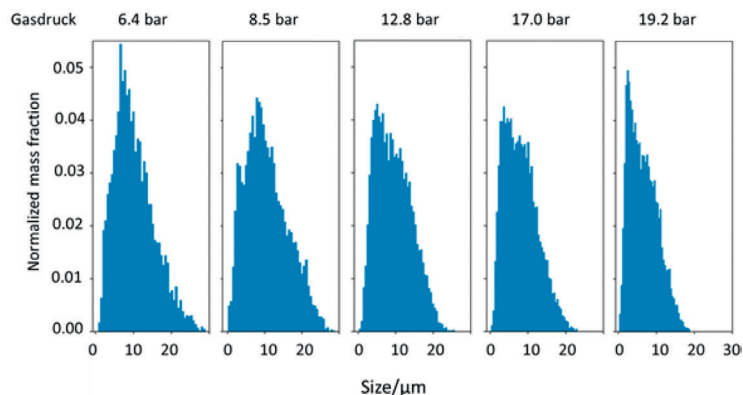
Гранулометрический состав как центральное свойство порошка определяется методом АМ [3]. Порошок классифицируется на этапах просеивания и воздушной сортировки, которые интегрированы в технологическую цепочку производства. Реализация требуемого гранулометрического состава проверяется динамическим анализом изображений в собственной испытательной лаборатории.

Соответствующая текучесть порошка важна для процесса лазерной сварки в порошковом слое (Laser Powder Bed Fusion, LPBF). В процессе нанесения порошка необходима хорошая сыпучесть (растекаемость) для получения тонкого, гладкого, однородного и плотного слоя порошка [4]. Порошки с плохой сыпучестью вызывают проблемы при нанесении и неоднородности в порошковом слое. Кроме этого достаточная текучесть порошка необходима для его транспортировки по установке аддитивного производства. Эти два аспекта поведения потока недостаточно разделены в литературе и стандартизации. Требования к поведению потока различаются, с одной стороны, между технологиями аддитивного производства, а с другой — между разными производителями.

Хорошая текучесть порошков SMS контролируется в собственной испытательной лаборатории путем измерения различных характеристических величин, таких как время истечения Холла или коэффициент Хауснера.

Морфология частиц как характеристика порошка описывает среднюю форму его частиц. Целью производства металлического порошка для процесса лазерной сварки в порошковом слое LPBF является получение как можно более сферической формы. С увеличением сферичности порошка улучшаются характеристики текучести и относительная плотность порошка [4], что дает преимущества в технологическом процессе. Мор-

Рис. 3. Расчетное распределение водных капель по размерам на испытательном стенде водной модели в Техническом университете Дармштадта, полученное на расстоянии 700 мм ниже форсунки распылителя при различных давлениях газа (воздух)

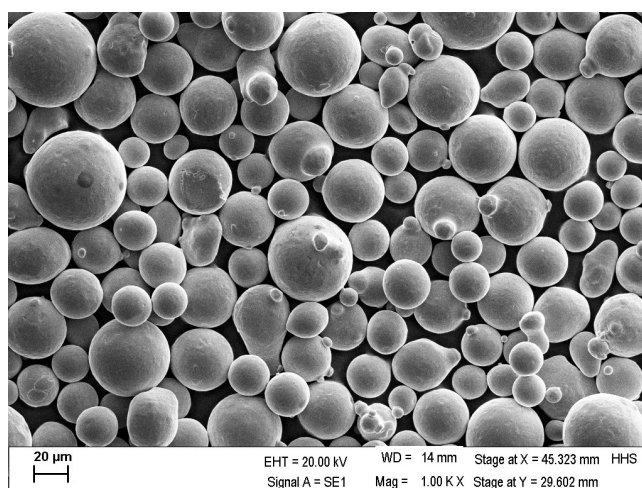


фология частиц распыленного газом порошка лишь немного отличается от сферической формы. Несмотря на то, что дефекты частиц, такие как образование отростков (сателлитов), могут быть уменьшены в процессе производства, полностью предотвратить их нельзя.

Качественная морфология порошка хорошо описывается РЭМ-изображениями. На рис. 4 показано изображение порошка 316L (1.4404) производства SMS group. Частицы демонстрируют высокую сферичность и небольшое количество сателлитов. Количественно средняя морфология частиц может быть указана при помощи различных форм-факторов. Они вычисляются из проекций частиц с использованием математических соотношений [5]. Высокая сферичность металлических порошков SMS контролируется с помощью динамического анализа изображений и расчета сферичности как форм-фактора.

Для полной характеристики определяются дополнительные свойства порошка, такие как химический состав, загрязненность, плотность и содержание влаги.

Рис. 4. РЭМ-изображение порошка 316L (1.4404) от SMS group для аддитивного производства



Наиболее известным и распространенным дефектом частиц в металлическом порошке, распыляемом газом, является образование сателлитов. Сателлиты — это маленькие субчастицы, прикрепленные к более крупным частицам. Если в процессе распыления происходит столкновение между затвердевшей маленькой частицей и полутвердой большой частицей, происходит адгезия и образуется сателлит. Во время производства порошка мелкие затвердевшие частицы распылительного конуса переносятся в виде пылевого облака за счет эффекта рециркуляции из нижней части башни атомизации обратно в зону распыления. Формирование сателлитов в результате внутренней рециркуляции поясняется на рис. 5. Когда мелкие затвердевшие частицы поднимаются в верхнюю часть камеры и возвращаются в зону распыления, они могут прилипнуть к только затвердевающим крупным частицам [6].

Благодаря антисателлитной системе, используемой в качестве модульного блока установки атомизации порошка, образование сателлитов значительно сокращается и, таким образом, улучшается морфология порошка. При использовании антисателлитной технологии создается внешний поток газа, как показано на рис. 5. Этот газовый поток дувается сверху в башню атомизации. В результате в технологической камере создается вторичный поток газа сверху вниз, который подавляет подъем мелких частиц внутри камеры.

Исследования влияния антисателлитной системы на свойства порошка показывают улучшение морфологии с увеличением потока газа в антисателлитной системе [7].

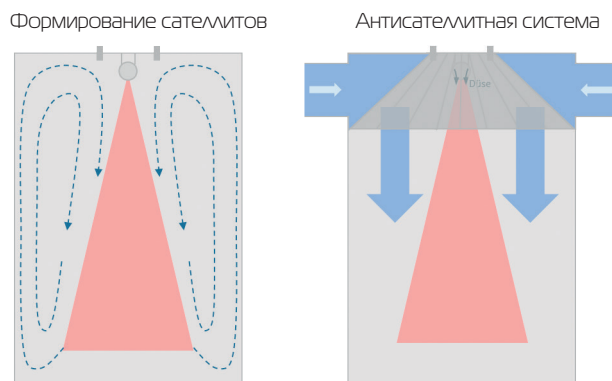
С использованием антисателлитной технологии на установке атомизации возможно производство высококачественного порошка с небольшим количеством сателлитов (рис. 4).

Заключение и перспективы

На основе опыта, накопленного в центре компетенций, SMS group постоянно оптимизирует процесс производства порошков. Ожидается, что благодаря активному участию в различных исследовательских проектах и комитетах в будущем будут получены еще более подробные знания об основах и взаимосвязях как процесса распыления, так и свойств порошка. Кроме того, поддержка при разработке новых сплавов покажет дальнейшие возможности их применения в аддитивном производстве.

Исследование проводилось при финансовой поддержке Федерального министерства образования и исследований Германии (BMBF) и Индогерманского научно-технического центра (IGSTC) в рамках проекта

Рис. 5. Иллюстрация формирования сателлитов и функционирования антисателлитной системы



01DQ19005 «Производство металлических порошков для аддитивного производства». ■

Настоящая статья была опубликована в журнале STAHL + TECHNIK 2 (2020) № 5.

Литература

1. Luh, M. F.; Vogl, N.; Odenthal, H.J.; Roisman, I.V.; Tropea, C.: Focusing Schlieren imaging in close-coupled atomization: Comparison of experimental results with numerical simulations, ICLASS 2018, 14th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Chicago, IL, USA, July 22–26, 2018, S. 1.
2. Seifi, M., et al. Overview of Materials Qualification Needs for Metal Additive Manufacturing [online]. JOM, 2016, 68(3), S. 747–764. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11837-015-1810-0
3. Spierings, A. B. und G. Levy. Comparison of density of stainless steel 316L parts produced with selective laser melting using different powder grades. In: Proceedings of the 20th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, 2009, S. 342–353.
4. Tan, J. H., W. L. E. Wong und K. W. Dalgarno. An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process [online]. Additive Manufacturing, 2017, 18, S. 228–255. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.addma.2017.10.011
5. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN ISO 9276–6:2012–01, Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen – Teil 6: Deskriptive und quantitative Darstellung der Form und Morphologie von Partikeln (ISO 9276–6:2008). Berlin: Beuth Verlag. Verfügbar unter: doi:10.31030/1810488
6. Dunkley, J. J. und B. Telford. Control of "Satellite" Particles in Gas Atomization. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 2002, (3), S. 3–103.
7. Mostaghimi, F., et al. Anti-Satellite System for the Improvement of Powder Quality in Additive Manufacturing Using a FeMnAlSi Alloy. In: European Powder Metallurgy Association, Hg. Euro PM2018 Proceedings: Powder Production & Characterisation, 2018.

Ваше контактное лицо в России и СНГ по вопросам АТ:
Алексей Иванов, менеджер по продажам ООО «СМС груп»
123317, Москва, Пресненская набережная, д. 10, блок А
Тел.: +7 495 777 8005
E-mail: alexey.ivanov@sms-group.com

3D-принтеры BLT: печать изделий из чистой меди



Компания BLT была основана в июле 2011 года.

Сегодня в ней работает более 600 человек, из которых 200 человек заняты исследованиями и разработками и имеют степень магистра или доктора.

Компания является одним из крупнейших в мире производителей индустриальных 3D-принтеров для печати металлом — металлическим порошком методом селективного плавления SLM.

В 2018 году компания ввела в эксплуатацию новый научно-производственный комплекс общей площадью более 40 000 квадратных метров, который расположен в технопарке г. Сиань.



Компания BLT владеет более чем 200 патентами на изобретения в области аддитивных технологий, кроме этого, компания прошла сертификацию по системам качества ISO9001-2015, AS9100D / EN 9100-2018, GJB9001C-2017 и другим стандартам.

Сегодня компания BLT может предложить своим клиентам решение 3D-печати металлом в полном объеме, включая аддитивное оборудование, индивидуальные сплавы металлических порошков (принтеры BLT могут печатать 50-ю видами металлического порошка, включая сплавы титана, алюминия, нержавеющей стали, меди и другие), программное обеспечение и техническое обслуживание.

За последние 10 лет компания наработала огромный опыт аддитивного производства в аэрокосмической отрасли, энергетике, медицине, оборонной, автомобильной и других промышленности.

Компания BLT постоянно совершенствует свое оборудование, помогает клиентам достичь оптимального результата в дизайне



изделий, сократить производственные затраты, улучшить качество продукции, повысить производительность.

Среди сотен клиентов компании ведущие мировые производители:



Продуктовая линейка BLT включает в себя 12 моделей.

Младшая модель BLT A-160 обладает следующими характеристиками:

Вес оборудования, кг	800
Качество лазерного луча, M2	<1,1
Количество лазеров	1
Мощность лазера, Вт	200 (50 Вт опционально)
Область печати, мм	160×160×100
Оптическая система	F-Theta & Scanner system
Поддерживаемые	Нержавеющие материалы, стали, Co-Cr, Ti-сплавы
Программное обеспечение	Magics; BP; BLT-Slice Viewer
Рабочий газ	Азот, аргон
Скорость сканирования, м/с	7
Толщина слоя, max мкм	30
Толщина слоя, min мкм	15
Электропитание	220В, 3 кВт



Применяется во всех отраслях.

Кроме этого, хотелось бы обратить внимание на две модели BLT, которые широко используются при производстве в авиакосмической, автомобильной и других отраслях.

BLT-S310



Вес оборудования, кг	3500
Качество лазерного луча, M2	<1,1
Количество лазеров	1
Мощность лазера, Вт	500
Области применения	Все отрасли экономики
Область печати, мм	250×250×400
Оптическая система	F-Theta & Scanner System
Поддерживаемые материалы	Все возможные материалы для SLM, вкл. медь
Подогрев платформы	Да
Подогрев стола, max °C	200
Программное обеспечение	Magics; BP; BLT-Slice Viewer
Рабочий газ	Азот, аргон
Скорость сканирования, м/с	7
Толщина слоя, max мкм	100
Толщина слоя, min мкм	20
Электропитание	380В, 8 кВт

Вес оборудования, кг	6500
Качество лазерного луча, M2	<1,1
Количество лазеров	1, 2, 4
Мощность лазера, Вт	500
Области применения	Все возможные отрасли
Область печати, мм	450×450×500 для 4-х лазерной системы
Оптическая система	F-Theta & Scanner System
Поддерживаемые материалы	Все возможные материалы для SLM, вкл. медь и вольфрам
Подогрев стола, max °C	200
Программное обеспечение	Magics; BP; BLT-Slice Viewer
Рабочий газ	Азот, Аргон
Размер оборудования, мм	5253×1940×2445
Скорость сканирования, м/с	7
Толщина слоя, max мкм	100
Толщина слоя, min мкм	20
Электропитание	380В, 10 кВт

BLT-S450



Публикуем некоторые примеры изделий, изготовленных на 3D-принтерах BLT.

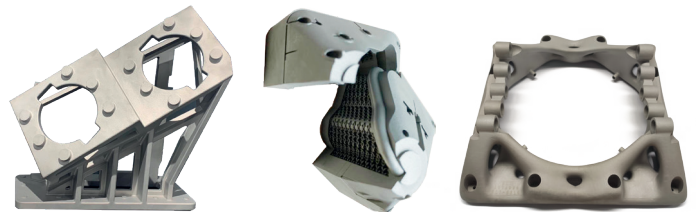
АВИАЦИЯ И КОСМОС



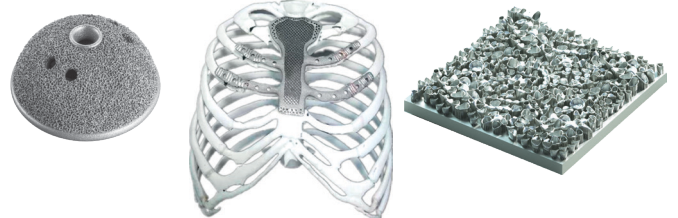
3D-печать изделий камеры жидкостного ракетного двигателя из бронзового сплава



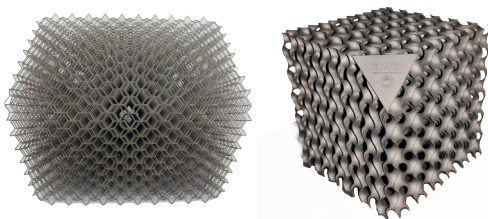
АВТОПРОМ



МЕДИЦИНА



ХИМПРОМ



Используя опыт и наработки компании BLT, будем рады вместе с вами усовершенствовать технологические и производственные процессы изготовления изделий с использованием промышленный аддитивных принтеров, включая топологический дизайн образцов, подбор материала и 3D-печать. ■



ООО «Z-axis» — эксклюзивный дистрибьютор BLT на территории России и в странах СНГ
г. Москва, проспект Маршала Жукова, д. 1, стр. 1
Тел. +7(495) 1396990, www.z-axis.ru

INTAMSYS — ведущий производитель промышленных FDM 3D-принтеров

INTAMSYS (аббревиатура от INTelligent Additive Manufacturing SYStems) — ведущий производитель промышленных 3D-принтеров и поставщик решений для аддитивного производства по технологии FDM.



Технологичные и относительно простые в использовании 3D-принтеры INTAMSYS работают с инженерными многофункциональными материалами в формате решения «всё в одном». При использовании высокопроизводительных инженерных материалов: PEEK, PEEK-CF, PEKK, ULTEM, PPSU и более простых пластиков, таких как PC, PA, PA-CF, ABS, 3D-принтеры INTAMSYS идеальным инструментом для про-

Производительная линейка 3D-принтеров Intamsys включает в себя 4 принтера

изводства изделий малыми и средними сериями для различных отраслей промышленности (авиация, космос, электроника, автомобилестроение, оснастка, медицина, НИОКР и пр.)

Штаб-квартира компании INTAMSYS Technologies находится в Шанхае, европейский офис в Штутгарте, Германия.

Компания INTAMSYS работает с рядом производственных и исследовательских центров и придерживается самых высоких стандартов качества проектирования и изготовления 3D-принтеров.

Среди клиентов INTAMSYS в мире:



Клиенты в России:



INTAMSYS FUNMAT HT

Младшая модель в линейке 3D-принтеров

Технология печати	FDM
Материал для печати	ABS, NYLON 6, NYLON 12, NYLON 12 CF, NYLON 6 CF, PEEK, PEEK CF, PPSU, PC, Карбоно-наполненные, PEI, HIPS, ABS-ESD, PVA, Tough PLA, PLA, PET-G
Область печати, мм	260×260×260
Толщина слоя, min мкм	50
Платформа построения	Легкосъемное керамическое стекло
Электроподключение	220В, 1,2 кВт
Габариты, мм	530×490×645
Масса, кг	46

INTAMSYS FUNMAT PRO 410

FUNMAT PRO 410 — это промышленный 3D-принтер для аддитивного производства и изготовления прототипов, включая детали большого размера, либо небольших изделий малыми и средними сериями из высокотемпературных пластиков (PEEK, ULTEM, PPSU и др.), т.к. подогреваемая камера построения и стол в совокупности с высокотемпературным экструдером



Intamsys Funmat Pro 610 HT

Intamsys Funmat FLEX 510

Intamsys Funmat Pro 410

обеспечивают отсутствие деформации и растрескивание печатаемых деталей больших размеров. INTAMSYS FUNMAT PRO 410 оснащен двойным экструдером, который позволяет печатать пластиком и материалом поддержки.

Технология печати	FDM
Материал для печати	PEEK, PEKK, PEI, PPSU, PC, Nylon, CF, GF, ABS, PLA и др.
Материал поддержек	SP-5000, HIPS, PVA
Область печати, мм	305×305×406
Толщина слоя, min мкм	50
Платформа построения	легкосъемное керамическое стекло
Электроподключение	220 В, 3 кВт
Габариты, мм	720×680×1470
Масса, кг	220

INTAMSYS FUNMAT PRO 610 HT

Новейшая модель в серии 3D-принтеров INTAMSYS FUNMAT. Это промышленный высокопроизводительный принтер, предназначенный для печати функциональных деталей большого размера либо изделий малыми и большими сериями.

Большая рабочая камера 610×508×508 мм позволяет печатать детали большого размера.

Полноценная высокотемпературная камера построения 3D-принтера имеет постоянную температуру до 300°C, печатный стол с подогревом до 300°C и экструдер с температурой нагрева материала до 500°C.

FUNMAT PRO 610 HT идеально подходит для печати больших изделий любыми высокопроизводительными функциональными материалами (PEEK, ULTEM (PEI), PPSU и других) с высочайшей точностью с минимальной толщиной слоя в 50 мкм.

Технология печати	FDM/FFF
Материал для печати	PEEK, PEEK+CF, PEKK, ULTEM (PEI), PPSU, PC, PC Alloys, PA, PA+CF, ABS, карбонаполненные, металлонаполненные, стеклонанополненные, ASA, PETG, ESD-Safe, HIPS, TPU, PLA, PVA.
Область печати, мм	610×508×508
Толщина слоя, min мкм	От 50
Платформа построения	Вакуумная система
Габариты, мм	1700×1350×2150
Масса, кг	1700

3D-ПЕЧАТЬ В 10 РАЗ ДЕШЕВЛЕ, ЧЕМ ОРИГИНАЛЬНЫЕ ДЕТАЛИ

3D-принтер INTAMSYS FUNMAT HT был довольно простым решением, которое помогло компании ABIGO Medical из Швеции оперативно решить проблему медленной доставки запасных частей и избежать остановки производственной линии. К удивлению ABIGO Medical, печатные детали оказались примерно в 10 раз дешевле оригинальных запасных частей, хотя надо признать, что срок службы оригинальных деталей дольше.

Тем временем команда ABIGO Medical напечатала на 3D-принтере другие детали для замены изношенных, в том числе корпус подшипника для конвейерной ленты. «Затраты за печать получились примерно в 40 раз

ниже, чем на закупку оригинальной запасной части. Мы напечатали корпус подшипника конвейерной ленты из поликарбоната за 100 евро, в то время как оригинальная деталь из алюминия стоит 4 000 евро, — поясняет Линус Гёле, главный инженер предприятия. — Подшипники сели в корпус как влитые».

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СПУТНИКА-КУБА

Недавно Европейское космическое агентство приступило к реализации программы QB50 по исследованию низкотемпературных слоев атмосферы. Миссия QB50 включает в себя группировку из 50 мини-спутников «КубСат», которая разрабатывается совместно рядом университетов и будет запущена недорогой ракетой-носителем для проведения исследований низкотемпературных слоев атмосферы на высотах 200–380 километров от поверхности Земли.

В связи с коротким сроком проведения программы и ее низкой стоимостью спутники, изготовленные при помощи традиционных технологий, не вписываются в бюджет проекта, поэтому было принято решение изготовить мини-спутники при помощи 3D-печати на INTAMSYS FUNMAT PRO 410.

PEEK ИЛИ МЕТАМ?

Высокая прочность таких материалов, как PEEK, позволила многим компаниям заменить металлические детали на детали, напечатанные PEEKом на 3D-принтерах Intamsys. Как и все полимеры, PEEK обеспечивает огромную экономию веса изделий, а также обладает выдающимися трибологическими характеристиками.

Специалисты компании Z-axis наблюдают, что в течение последних нескольких лет количество изделий, изготовленных с помощью 3D-печати с использованием PEEK, продолжает расти, и мы ожидаем, что эта тенденция продолжится по мере того, как все новые секторы экономики осознают преимущества и потенциал этого материала. Сегодня клиенты из самых разных областей стали серьезно интересоваться 3D-печатью материалом PEEK для замены металлических изделий, изготовленных традиционными методами производства. И пандемия здесь выступила катализатором, когда из-за закрытых предприятий и границ стало трудно или даже невозможно получить запасные части к машинам и оборудованию, в этой ситуации инженеры все чаще прибегают к реверс-инжинирингу, т.е. копированию и печати деталей и их изготовлению из инженерных пластиков, включая корпусные изделия, шестерни, валы, редукторы и прочие. ■



ООО «Z-axis» — эксклюзивный дистрибьютор Intamsys на территории России и в странах СНГ
г. Москва, проспект Маршала Жукова, д. 1, стр. 1
+7(495) 139 6990, www.z-axis.ru

Компания Kings 3D printing — более 3000 инсталляций промышленных SLA-принтеров с 2007 года



Компания Kings 3D активно занимается разработкой и продажей 3D-принтеров, печатающих по технологии SLA.



Вид на предприятие KINGS3D

Сегодня компания Kings 3D printing является высокотехнологичным предприятием, поставщиком современных и эффективных решений для 3D-печати и уже несколько лет входит в лидеры продаж промышленных 3D-принтеров SLA в КНР (наряду с UnionTech) и мире с инсталляционной базой более 3000 печатных систем.

В феврале 2019 г. компания переехала в новое здание, где под одной крышей расположился офис, демозал, конструкторский отдел и производственный модуль.

За 14 лет компания Kings3D создала не только крупнейшую научно-исследовательскую и производственную базу для производства 3D-печатных машин и расходных материалов в Китае, но и одну из крупнейших сетей печатных 3D-центров в КНР, занимающейся технологической поддержкой клиентов.

С 2015 года компания начала активную международную экспансию в Азию, Европу и США.



Сборочные цеха



Зона тестирования оборудования и опытное производство

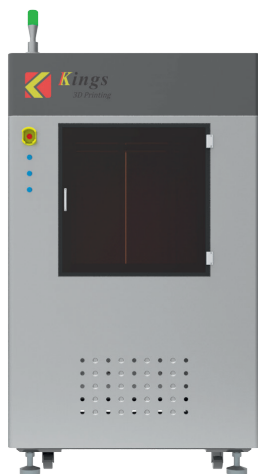


Демозал



МОДЕЛЬНЫЙ РЯД KINGS3D

Компания производит одну из самых широких линеек промышленных 3D SLA-принтеров в мире, которая включает в себя 12 (!) моделей. Самая младшая модель KINGS 3035 с камерой построения изделий 300×350×350 мм, самый большой SLA 3D-принтер – KINGS 1700 Pro с объемом камеры построения 1700×800× 600 мм.



KINGS 600 Pro

Среди флагманских моделей Kings3D хотелось бы выделить две модели: **KINGS 800 Pro**

Вес оборудования, кг	1900
Материал для печати	Фотополимер
Номинальная рассеиваемая мощность, кВт	1,8
Область печати (XxYxZ), мм	800×800×500
Производитель	KINGS3D
Размер оборудования: ШxГxB, см	140×149×247
Технология печати	SLA
Страна производства	Китай
Гарантия	2 года



KINGS 800 Pro

и **KINGS 600 Pro**

Вес оборудования, кг	1200
Материал для печати	Фотополимер
Номинальная рассеиваемая мощность, кВт	1,5
Область печати (XxYxZ), мм	600×600×400
Производитель	KINGS3D
Размер оборудования: ШxГxB, см	118×129 ×224
Технология печати	SLA
Страна производства	Китай
Гарантия	2 года

3D-принтеры Kings положительно зарекомендовали себя во многих отраслях, включая автомобильную, аэрокосмическую и тяжелую промышленность, производство обуви, медицину, архитектуру, художественный промысел и другие. Kings одним из первых сделал технический прорыв в производстве пресс-форм, применив для их изготовления высокопрочные полимеры вместо металла.

Кратко расскажем об основных применениях 3D-принтеров King3D.

ПРОТОТИПИРОВАНИЕ

Активно применяется во всех отраслях промышленности для того, чтобы избежать ошибки в конструкторской работе и при изготовлении изделий.



Прототип аэропорта

Часть впускного коллектора



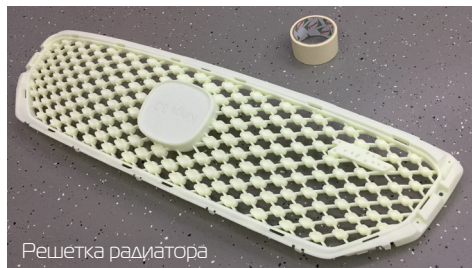
Прототипы памятников



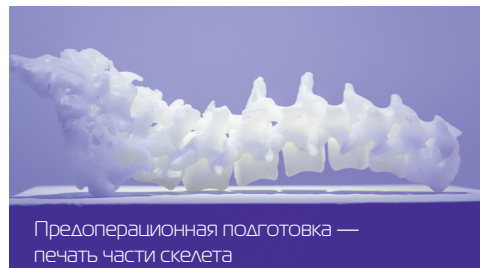
Прототип мотоцикла



Прототип фена



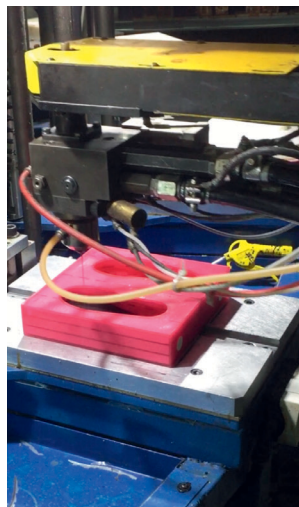
Решетка радиатора



Предоперационная подготовка — печать части скелета

ЛИТЬЕ ПОЛИУРЕТАНА В ФОТОПОЛИМЕРНУЮ ФОРМУ

Литье подошвы в термостойкую фотополимерную форму, напечатанную на принтере KINGS 3D 3530 за 19 часов. В КНР около 100 принтеров работают в обувной промышленности.



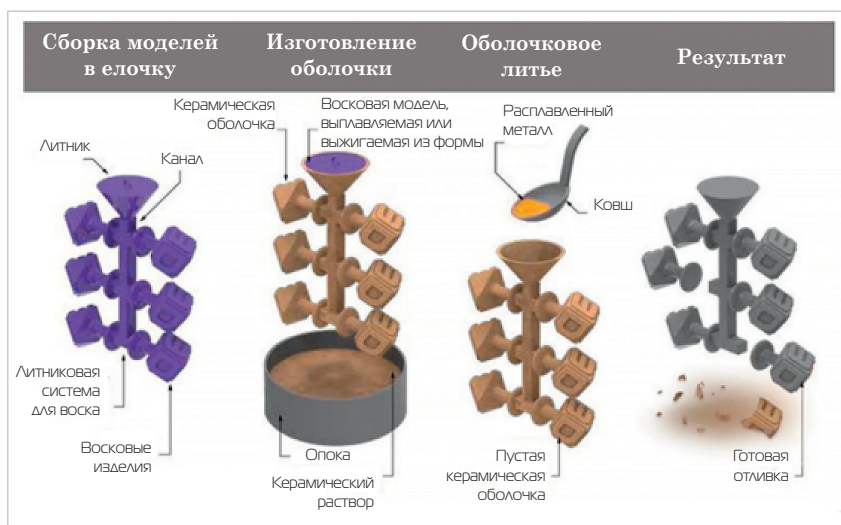
ЛИТЬЕ ИЗ МЕТАЛЛА ПО ВЫЖИГАЕМЫМ 3D-МОДЕЛЯМ

Благодаря наличию фотополимеров с малой остаточной зольностью и низким коэффициентом температурного расширения SLA используется для выращивания литейных выжигаемых моделей. Модель окунают в мелкодисперсный керамический раствор, а затем наносят еще один или несколько слоев зернистого песка или керамики — в зависимости от конструктивных требований. Полученную форму помещают в печь, где происходит выжигание фотополимера и прокалка оставшейся керамической оболочки. Правильно подобранный материал модели выгорает почти без зольного остатка, что очень важно для некоторых областей применения. Теперь форма для литья металла готова. Модели, напечатанные на 3D-принтере, — более современное решение для литья, которое ускоряет процесс производства и повышает качество отливок.

Отлитые из металла изделия из напечатанных на Kings3D моделей



Схема литья



Используя многолетний опыт и наработки Kings3D вместе с вами, мы будем рады усовершенствовать ваши технологические и производственные процессы с использованием промышленных аддитивных принтеров. ■

axis

ООО «Z-axis» — эксклюзивный дистрибьютор Kings3D на территории России и в странах СНГ
г. Москва, проспект Маршала Жукова, д. 1, стр. 1
Тел. +7(495) 139 6990
www.z-axis.ru

Промышленные 3D-принтеры ExOne / технология Binder Jetting



Технология Binder Jetting используется в промышленных 3D-принтерах для изготовления литейных песчаных форм и стержней сложной геометрии и серийного производства функциональных изделий из металлов, жаропрочных сплавов, керамики, неметаллических и композитных материалов.

Аддитивная технология Binder Jetting предназначена для 3D-печати функциональных изделий, моделей, технологической оснастки любой геометрической сложности непосредственно по их цифровым (CAD) моделям и заключается в последовательном формировании заготовки в результате послойного отверждения особым образом подготовленного мелкодисперсного твердого материала и избирательно нанесенного на него связующего агента. В качестве мелкодисперсного твердого материала используется широчайший перечень сыпучих материалов для 3D-печати: традиционный и синтетический литейный песок, практически любые металлы и их сплавы, жаропрочные металлические и неметаллические композиции, керамики и композиционные материалы с заданными свойствами.

Ниже приведены основные области применения принтеров ExOne.



Печать песчано-полимерных литейных форм и стержней
Материал 3D-печати: литейный песок, фурановая смола



Печать металлических волноводов
Материал 3D-печати: нержавеющая сталь



Печать песчаных литейных стержней
Материал 3D-печати: литейный песок, фенольная смола



Печать металлических композитных изделий
Материал 3D-печати: нержавеющая сталь/бронза (90% Cu / 10% Sn)



Печать графитового сердечника ротора
Материал 3D-печати: графит



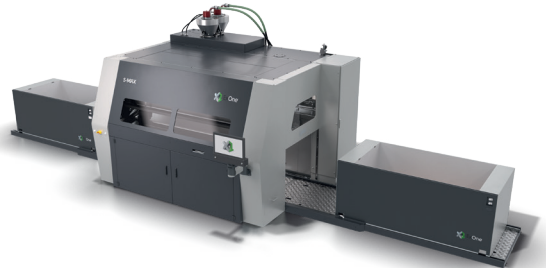
Печать кремниевого корпуса для электроники
Материал 3D-печати: карбид кремния SiC



Печать металлокерамических электронных компонентов
Материал 3D-печати: оксид циркония Zr_2O_3

Компания ExOne (www.exone.com) является лидером в области производства 3D-печатных систем по технологии binder jetting. Линейка принтеров ExOne включает в себя печатные 3D-системы, которые печатают песком, они используются прежде всего для печати литейной оснастки / песчано-полимерных литейных форм и стержней.

Основной печатной системой здесь является S-Max®



с следующими характеристиками:

Виды связующего компонента	Фуран Фенол
Внешние размеры оборудования, м	10,40×3,52×2,86
Максимальная скорость печати	105 л/час
Максимальные размеры 3D-изделий, мм	1800×1000×700
Объем напечатанного изделия, л	1260
Производитель	ExOne
Толщина слоя печати	0,26–0,38 мм
Страна производства	Германия

Среди принтеров ExOne, печатающих металлом и керамикой по 3D-технологии binder jetting, лидером является печатная система X1 25Pro®.

X1 25Pro® имеет следующие характеристики:

Виды связующего компонента на основе воды / растворителя / фенола	
Внешние размеры оборудования, м	2,300×1,800×2,300
Максимальная скорость печати	3600 см ³ /час
Максимальные размеры 3D-изделий, мм	400×250×250 — изменяемый размер по оси Z
Минимальный размер порошка, мкм	5
Объем напечатанного изделия, л	25
Производитель	ExOne
Толщина слоя печати	30–200 мкм
Страна производства	США



3D-технология ВJ является для России относительно новой и безусловно, как у любой другой технологии есть свои преимущества и недостатки в производстве изделий.

Будем рады оказать технологическую поддержку, поделиться своими наработками в области производства литейной оснастки, а также производстве изделий из металла и керамики с применением оборудования ExOne. ■

Хотелось бы еще отметить ключевых клиентов ExOne в мире:



ООО «Z-axis» — эксклюзивный дистрибьютор ExOne на территории России и в странах СНГ
г. Москва, проспект Маршала Жукова, д. 1, стр. 1
+7(495) 139 6990
www.z-axis.ru

3D-печать против COVID-19

Евгений Андреевич Кузьмин, TopStanok

Все чаще для медицинского анализа используют микрофлюидные чипы. Эти чипы позволяют ученым и медикам измерять какие-то биомаркеры (такие как содержание в плазме крови определенных белков) и исследовать по этим данным биологические процессы в нормальном состоянии, во время болезни или при воздействии лекарственных средств. С технологической точки зрения микрофлюидика — набор методик, которые позволяют управлять потоками небольших порций жидкости. В последнее время эти технологии используют для производства диагностических медицинских устройств. В таких микрофлюидных чипах можно параллельно измерять несколько различных биологических показателей, и делать это быстро. Таким образом, можно делать устройства в том числе и для тестов на коронавирусную инфекцию COVID-19.

В любой микробиологической лаборатории всегда много связанных друг с другом приборных блоков — и только при согласованной работе всех устройств лаборатория будет работать исправно. Возможность быстро менять характеристики хотя бы одного из приборных модулей позволит сэкономить лаборатории миллионы рублей, но заменять на приборном уровне блоки, связанные, например, со сложной электроникой или фотоникой, очень дорого и сложно. А вот подстроить параметры микрофлюидного модуля с помощью изготовления новых чипов — и дешево, и быстро.

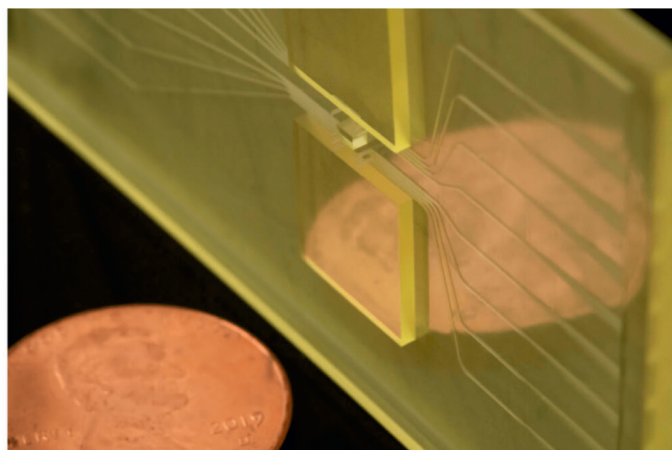
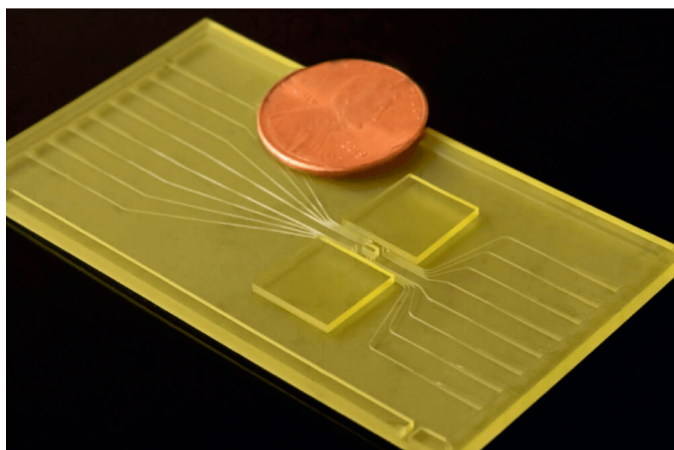
На одном микрофлюидном чипе можно совмещать элементы с различными функциями для параллельного анализа нескольких показателей. Например, на чипе для

тестов на ковид одни каналы на чипе необходимы для транспорта антител, а другие — для обнаружения вирусной РНК. Таким образом, одно небольшое микрофлюидное устройство превращается в своеобразную микролабораторию (отсюда и еще одно название технологии: «лаборатория-на-чипе»). С помощью микрофлюидных устройств исследователи могут проводить биомедицинский анализ большого количества проб с высокой скоростью. Однако до сегодняшнего дня у методов их производства были довольно существенные ограничения, и дело не только в том, что их производство традиционными методами — очень долгий и дорогостоящий процесс, но еще и в том, что многие изделия со сложной формой внутренних каналов в принципе невозможно получить с помощью традиционных методов.

Уменьшение диаметра каналов и ускорение производства

Сейчас для производства микрофлюидных чипов чаще всего используют фотолитографию. У этой технологии есть свои недостатки, в частности — сам процесс представляет из себя большое количество довольно сложных ручных операций. Такая особенность может приводить к возникновению дефектов в геометрии готового устройства и, соответственно, к проблемам с воспроизводимостью методики.

Кроме этого, традиционная фотолитография предназначена для создания структур с постоянной высотой, то есть все элементы в микрофлюидном чипе оказы-



ПРОМЫШЛЕННАЯ МИКРО 3D-ПЕЧАТЬ

Уникальная технология
3D-микропечати,
позволяющая создавать
изделия с разрешением до
2 мкм



Победитель премии SPIE 2021 Prism Awards
в категории «Лучшее решение для производства»

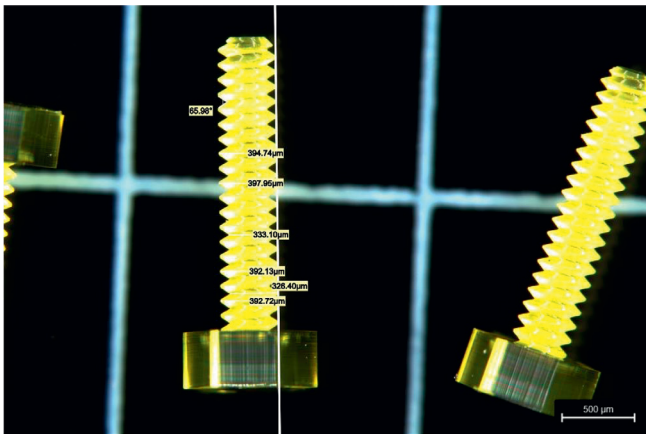


Более подробная информация доступна в статье.

Запас фотополимера на полгода
по промокоду «**3D**» БЕСПЛАТНО!

stanok@topstanok.ru 8 (800) 500-33-91

topstanok.ru



ваются одинаковой глубины и находятся в одной плоскости — это, естественно, накладывает ограничения на архитектуру чипа и сокращает разнообразие аналитических возможностей конечного изделия. Другой недостаток технологии — не очень высокое разрешение. Доступные устройства для фотолитографии позволяют создавать надежные чипы с каналами диаметром около ста микрометров и больше. В принципе, с помощью фотолитографических методов можно получать и более тонкие каналы, но тогда увеличивается вероятность возникновения дефектов в их структуре и их исправление еще сильнее удлинит и без того долгий процесс производства. Ученые из-за этого лишаются возможности получать более точные и компактные устройства.

Изменить ситуацию помогла новая технология микропечати — проекционная микростереолитография (projection micro stereolithography, PμSL), которую в 2020 году представила компания Boston Micro Fabrication. Их установка микропечати позволяет создавать изделия размером в несколько десятков микрометров с разрешением 2 микрометра, при этом включая в архитектуру чипов внутренние каналы и полости любой формы. Уже в первом тестовом чипе, напечатанном по технологии PμSL, удалось сделать канал диаметром 50 микрон — это вдвое меньше, чем можно было получать ранее. В результате на микрофлюидном чипе, на котором раньше умещались четыре канала, удалось сде-



лать сразу восемь. Компактность устройства позволяет расширить его возможности, при этом не увеличивая, а, наоборот, уменьшая размер. По оценке ученых, если использовать установку BMF S130 — самую точную на сегодняшний день, то на чипе такого же размера можно будет разместить до 20 каналов диаметром 15 микрометров. К тому же 3D-микропечать позволяет тестировать различные вариации устройств и быстро вносить правки в дизайн изделия.

Скорость производства — наряду с широкой вариативностью геометрии микроканалов и возможностью при необходимости быстро ее корректировать — важное достоинство 3D-микропечати. Технология традиционной фотолитографии на первой стадии включает получение маски для облучения с помощью высокоточных дорогостоящих приборов, и, как правило, только на это уходит не меньше недели. А полный цикл производства изделий занимает месяц или более. Технология 3D-микропечати тоже включает в себя несколько стадий постобработки, но даже с учетом этого исследователь сможет получить готовое изделие уже через несколько дней после заказа. При этом большинство стадий производства автоматизировано и не требует от человека никакого вмешательства.

Производство чипов с помощью технологии BMF 3D

Таким образом, технология 3D-микропечати PμSL позволяет делать любые изделия с микрометровой точностью без необходимости заказывать их у подрядчиков, заметно снижая риски, связанные с удлинением цепочек поставок. Еще одно преимущество технологии — значительная экономия средств и времени, крайне важных при проведении передовых разработок. Кроме того, пятикратное увеличение числа микроканалов в медицинском чипе фиксированного размера резко увеличивает потенциальный объем данных, которые можно на нем получить. А возможность при 3D-печати выйти из плоскости позволяет исследователям размещать на чипе каналы в несколько слоев, контролируя при этом их форму и наклон.

Кроме микрофлюидики технология 3D-микропечати зарекомендовала себя и для изготовления изделий для микромеханики, микроэлектроники и медицины. ■



OPEN MIND предлагает решение CAM для 3D-печати

Использование потенциала аддитивного производства с помощью *hyperMILL*®

OPEN MIND представляет значительное расширение своего пакета CAD/CAM *hyperMILL*®: *hyperMILL*® ADDITIVE Manufacturing расширяет функции одного из ведущих в мире решений CAD/CAM для промышленной 3D-печати. Будучи цельным программным решением, *hyperMILL*® с этим расширением позволяет одновременно выполнять на одном станке эффективную гибридную обработку, которая включает в себя аддитивную и субтрактивную обработку.

hyperMILL® ADDITIVE Manufacturing открывает гибкие возможности комплексной 5-осевой синхронной обработки для технологии прямого подвода энергии и материала в место построения (DED) и аддитивного

электродугового выращивания (WAAM). С помощью программного обеспечения компании OPEN MIND можно удобно программировать и автоматически моделировать с предотвращением столкновений как управление лазерными обрабатывающими головками с соплами для подачи флюса, так и электродуговую сварку для точечного нанесения материала.

Заключительная обработка и гибридное производство в одном процессе

Теперь благодаря *hyperMILL*® можно полностью использовать имеющийся потенциал и в сфере аддитивного производства с использованием технологии



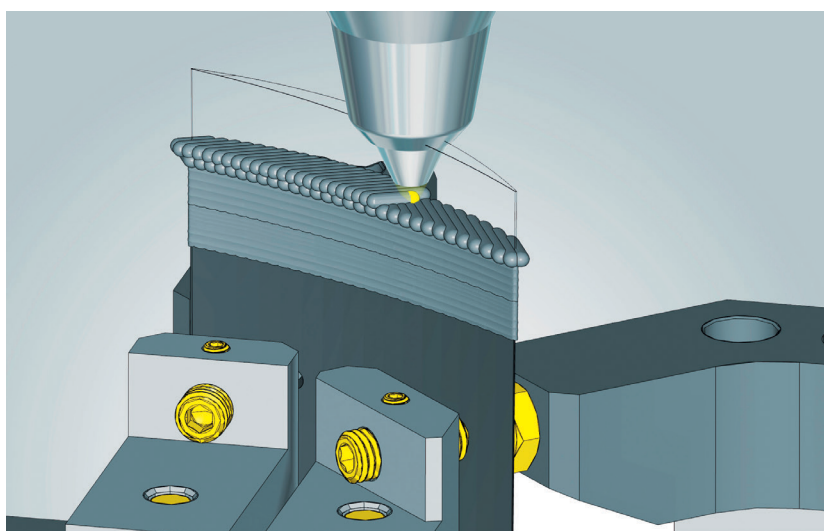
***hyperMILL*®**
ADDITIVE Manufacturing

Лучшее из двух миров:
Аддитивное производство
с *hyperMILL*®

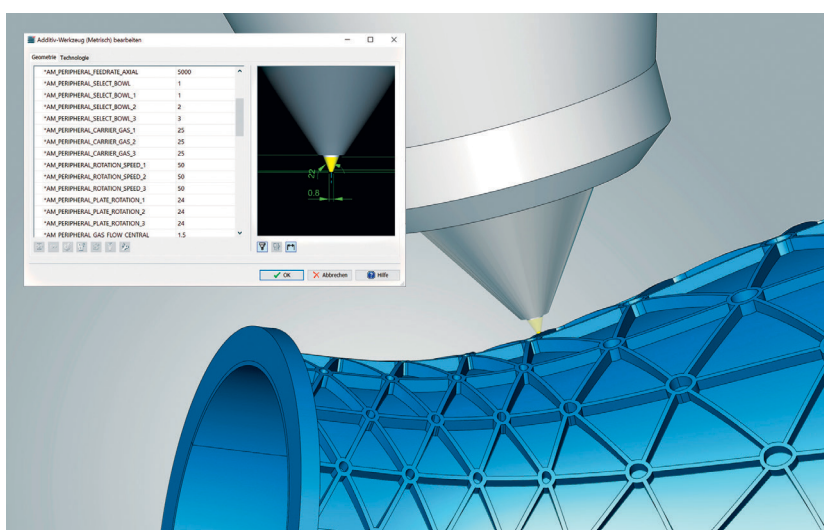


OPEN MIND
THE CAM FORCE
www.openmind-tech.com

Гибридная обработка с hyperMILL® ADDITIVE Manufacturing: ремонт турбинной лопатки. Источник: OPEN MIND



Детальное изображение лазерной обрабатывающей головки в hyperMILL®. Источник: OPEN MIND



hyperMILL® может совместно программировать сварку наплавлением и фрезерную обработку. При этом тщательная имитация процесса нанесения и снятия материала, а также отслеживание заготовок между отдельными операциями обработки гарантирует максимально возможную надежность технологических процессов.

Эффективность и надежность технологических процессов

«Наш ранний интерес к промышленным технологиям аддитивного производства сейчас приносит плоды. С помощью hyperMILL® ADDITIVE Manufacturing мы повышаем эффективность, точность и надежность процессов аддитивного и гибридного производства. Благодаря интеграции этих новых технологий в зарекомендовавшие себя технологические цепочки мы повышаем их эффективность и возможности применения», — говорит Фолькер Незенхёнер, президент компании OPEN MIND Technologies AG.

Компонент соплового аппарата турбины, изготовленный с помощью hyperMILL® ADDITIVE Manufacturing. Источник: OPEN MIND

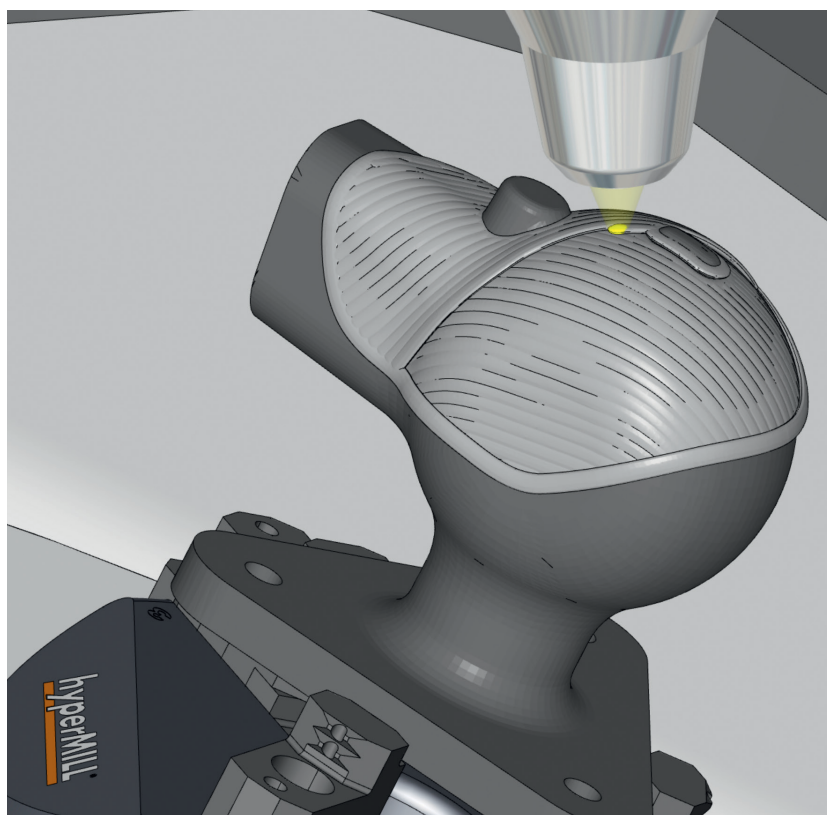


синтеза на подложке (Powder Bed Fusion — PBF). Если детали, полученные методом 3D-печати, не обладают необходимой точностью или если нужно удалить опорные структуры, возможна окончательная 5-осевая обработка резанием. hyperMILL® позволяет надежно обрабатывать даже труднодоступные области. Являясь неотъемлемой частью технологической цепочки, система CAD/CAM компании OPEN MIND поддерживает такую окончательную обработку: напечатанные детали анализируются, фрезеруются в размер и проверяются.

Однако компания OPEN MIND, специализирующаяся на САМ, продвигает реализацию интегрированных технологических цепочек еще дальше. В рамках гибридного производства (Hybrid Manufacturing) в одном станке комбинируются процессы аддитивного и субтрактивного производства. Теперь пользователь с помощью

Процесс аддитивной обработки: нанесение материала на основание.
Источник: OPEN MIND

О компании
OPEN MIND Technologies AG



«Мы уверены, что тем самым мы поспособствуем большому количеству инновационных решений и значительно расширим возможности применения новых технологий».

Важной сферой применения станет ремонт поврежденных деталей, например, при производстве форм и инструментов, или ремонт лопаток турбин, например, в аэрокосмической промышленности. Кроме того, открываются совершенно новые возможности при сочетании различных материалов, например, при нанесении слоев высококачественных материалов на материалы подложки.

На нашем YouTube-канале доступны следующие видеоматериалы:
<https://youtu.be/TyFDUSzS4nk>



OPEN MIND Technologies AG является одним из самых востребованных в мире производителей высокоэффективных САМ-решений для программирования оборудования с ЧПУ любой сложности.

Решения OPEN MIND очень удобны и включают в себя целый спектр инновационных технологий, позволяющих повысить эффективность программирования и последующей фрезерной обработки. *hyperMILL*® – среда для подготовки программ ЧПУ, включающая стратегии 2,5D-, 3D-, 5-осевого фрезерования, фрезерно-токарной обработки, HSC и НРС. Благодаря совместимости практически со всеми САМ-решениями и высокой степени автоматизации программирования *hyperMILL*® позволяет решать практически любые задачи.

Согласно отчету «NC Market Analysis Report 2020» от CIMdata, OPEN MIND входит в пятерку крупнейших мировых производителей САМ-решений. Системы САМ от OPEN MIND способны удовлетворить высочайшие требования автомобильной, аэрокосмической и машиностроительной промышленности, находят применение при изготовлении инструментов, пресс-форм и медицинского оборудования. OPEN MIND имеет широкую сеть филиалов в Азии, Европе и Северной Америке и входит в группу компаний Mensch und Maschine. ■

Главный офис:
OPEN MIND Technologies AG, Argelsrieder Feld 5,
82234 Weßling, Германия
Тел.: +49 8153 933-500
Факс: +49 8153 933-501
Эл/почта: Info@openmind-tech.com
адрес в интернете: www.openmind-tech.com/de

Обратная связь
Тел.: +49 5258 210 98 0
Тел.: +7 499 918 3218
Факс: +49 5258 21098-49
Эл. почта: Info.Russia@openmind-tech.com

Производство литейных форм методом селективного отверждения песчаной смеси



По просьбе редакции журнала «Аддитивные технологии» уникальным опытом производства литейных форм методом селективного отверждения печатной смеси делится технический директор «Центра цифровых технологий» города Казани Илья Вячеславович Микрюков.

— В профессии я с 2000 года. Карьеру начал в должности техника-технолога на литейном заводе КАМАЗа. С 2002 начал заниматься компьютерным моделированием литейных процессов, с 2006 — проектированием оснастки для малых серий для широкой номенклатуры литья, 2013-й год — разработка концепции производства с применением аддитивных технологий, 2014 — запуск производства в Казани.

Идея использовать аддитивные технологии для решения задач по изготовлению малых серий пришла в 2005 году. Оптимальной для ЛЗ КАМАЗа была технология получения форм методом селективного отверждения песчаной смеси (печать форм из кварцевого песка), технология представляет собой последовательное нанесение слоя песка, перемешанного с кислотой (активатором), и последующую печать смолой (биндером). Напечатанный слой уходит вниз, поверх него наносится новый, выполняется печать, нанесение рисунка и т.д. Там, где выполнена печать, формируется фигура — будущая литейная форма или ее часть. Огромным плюсом данной технологии является возможность изготавливать части форм с исключительно сложной геометрией, что, в свою очередь, позволяет значитель-

но расширить возможности технологии изготовления отливок. Печать бункера объемом почти в 2 м³ выполнялась двое суток при толщине слоя печати 0,28 мм и разрешении печати 0,1 мм.

В 2005 казалось, что эта технология «вот прямо сейчас» сможет решить все проблемы. С 2005 по 2013 проект не удалось запустить на КАМАЗе. Стоимость машины S15 была сопоставима с вертикально-фрезерными станками ЧПУ, в которых также остро нуждалось производство литейной оснастки ЛЗ КАМАЗа, и раз за разом при выборе машины для модернизации парка выбор падал именно на станки ЧПУ для производства оснастки, т.к. в это время активно применялась технология изготовления оснастки из модельных пластиков, что позволяло достаточно быстро, точно не дешево, но очень эффективно изготавливать модельную оснастку, а также использовать изготовленные для ручной формовки модели при изготовлении форм на автоматических формовочных линиях. При этом в 2007 году разработанная концепция участка с применением печати литейных форм заняла 1-е место на конкурсе среди молодых специалистов КАМАЗа.

В 2013 году была разработана новая концепция инжинирингового центра по изготовлению отливок с применением аддитивных технологий. В качестве машин для получения форм были выбраны vx1000 — печать ПММА (выжигаемая модель) и SMAX — печать песчаных форм. Проект современного литейного производства с применением аддитивных технологий был поддержан президентом Республики Татарстан, выделено финансирование. Однако резкий рост курса евро при закупке оборудования привел к значительному удорожанию проекта, от части оборудования пришлось отказаться. При выборе принтера и технологии получения формы остановились на SMAX (рис. 1), именно эта машина (фактически это обновленная и переосмысленная S15) закрывала большую часть потребностей рынка литья в песчаные формы. Таким образом сформировался в нынешнем виде Центр цифровых Технологий — самое современное литейное производство в Казани.

Теперь подробнее о технологии селективного отверждения песчаной смеси, реализованной на площадях Центра цифровых технологий.

В 2014–2015 годах все расходные материалы поставлялись из Германии, себестоимость получаемой продукции была запредельная, и только сложность получаемых форм могла быть конкурентным преимуществом при выборе варианта изготовления отливок заказчиками. Выбор материалов был обусловлен гарантийными обязательствами, которые мы несли перед компанией ExONE. Гарантия для нас оказалась исключительно полезной. В период гарантии был заменен управляющий компьютер, а также блок воздушных клапанов. Компания ExONE оперативно (в течение двух недель) заменила их на новые.

Однако надо сказать, что сразу был запущен механизм по поиску материалов отечественного производства — песка и химии. Значительную роль и поддержку в этом вопросе оказали «специалисты» институтов Казани, опять же при поддержке руководства республики. Практически сразу мы имели представление о химии, которую мы покупали в Германии, и неожиданно для нас оказалось, что себестоимость изготовления для наших объемов практически сопоставима с фирменной химией. Уже через год после проведения опытных работ с большой осторожностью был выполнен переход на альтернативного поставщика, что позволило в 10 (!) раз снизить себестоимость печати. Истории о загубленных головках/убитых печатающих модулях не рассказывал только ленивый. И надо сказать, что они имели под собой достаточно много печальных примеров.

Основная проблема и причина — тотальный дефицит информации о применении химии в процессе, закрытые сервисные функции управления машиной, отсутствие развитого сервиса. Настройка и подбор режимов и понимание процессов выполнялись методом научного тыка, в процессе значительного количества итераций. Казалось бы, простая для понимания технология (визу-

Рис. 1. 3D-принтер SMAX



ально очень похожая на то, что мы видим при печати на бумаге — рис. 2, 3), на самом деле является совокупностью достаточно большого количества параметров, часть из которых должны быть исключительно стабильны (например, влажность и размер зерна песка), постоянны для разных партий материалов.

Рис. 2. Тестовый брусок



а — плохое качество

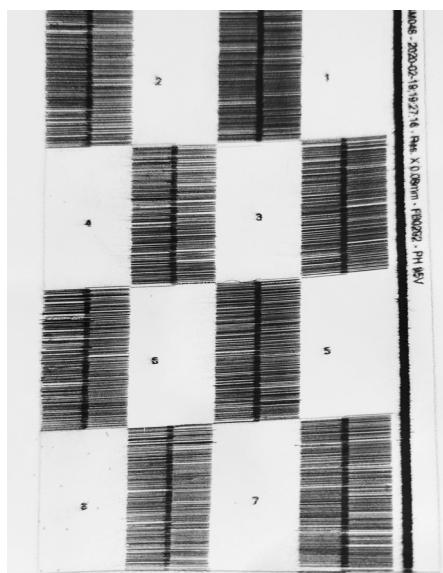
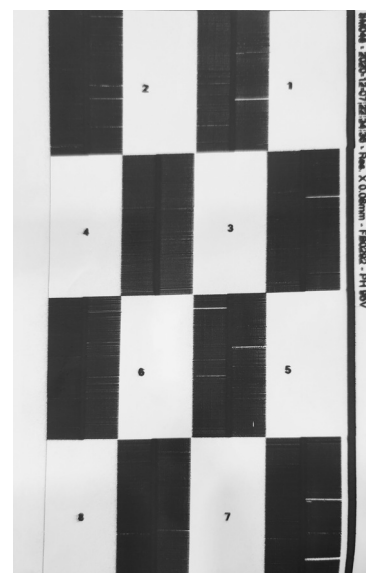


Рис. 3. Тесты печати:
б — отличное качество



Самым сложным периодом был период начала введения санкций и период начала пандемии. Оперативно приходилось решать задачу поиска поставщиков запасных частей, расходных материалов. Часто это сказывалось на качестве печати. Выход из строя печатающих головок (в нашей машине их 8 штук) происходит не одновременно. Плановая оперативная замена была исключена: компания—производитель оборудования в период санкций так усложнила процедуру закупки, что фактически она стала невозможной. Были затрачены значительные усилия и средства для приобретения новых головок. Планирование и финансирование ремонтов выполнялось с запасом на 6 месяцев. Надо отметить, что при должном уходе машина SMAX показала себя очень надежной. За весь период эксплуатации менялись в основном расходные материалы, к которым в итоге были зачислены и печатающие головки.

Формы, полученные на SMAX (рис. 4), обеспечивают точность сборки в 0,3 мм, на весь габарит печати — длина бункера 1800×1000×700 мм, эти цифры проверены и подтверждены путем многократной сборки. Машина формирует форму с допуском на линейные размеры 0/−0,2 мм, безусловно, качество отпечатка сильно зависит от состояния машины и материалов.

После изготовления формы на поверхности наблюдается характерный рисунок — ступеньки, формируемые слоями печати (минимум 0,28 мм). Это отдельная и постоянная тема для обсуждения качества поверхности с заказчиками, т.к. понятие «шероховатость» для таких поверхностей не совсем приемлемо, это скорее особенность технологии, которую необходимо «понять и простить», в крайнем случае, поверхность формы можно загладить вручную, но чем технология становится популярнее, тем меньше заказчиков обращают внимание на эти нюансы.

Рис. 4. Большая форма



Технология печати песком дает возможность проектировать и изготавливать литейные формы, которые невозможно получать другими способами. Однако эта возможность не всегда может быть реализована на практике, формы перед сборкой необходимо очистить, покрасить, собрать, что не всегда возможно, если форма спроектирована с очень сложными поверхностями/разъемами/сопряжениями поверхностей. Со временем мы пришли к следующему золотому правилу: количество частей форм должно быть минимально возможным с учетом того, что этот конструктор «лего» будет удобно обслуживать и собирать.

В целом проектирование форм аналогично проектированию оснастки, часто значительно быстрее, т.к. нет необходимости вводить формовочные уклоны. Однако для хорошей и удобной собираемости, для эффективного удаления продуктов горения, планирования зон

Рис. 5. Очистка форм



разрушения формы, для сложного подвода питания с целью уменьшения габаритов формы часто приходится значительно повозиться... и это все для получения, например, одной отливки. Поэтому вопрос о компьютерном моделировании литейных технологий становится еще более актуальным. Часто вы обращали внимание в расчетах, на какую глубину прогревается форма после заливки? Теперь это важная информация, которая позволит оптимально подбирать толщину стенок формы при ее проектировании. Использование холодильников и жеребеек — это новые супервозможности по управлению фронтом кристаллизации, т.к. сложности по установке отходят на второй план. Задача заполнения формы и размеров литниковой системы выходит на новый уровень, ведь мало получить качественную отливку, необходимо это сделать в минимальном объеме формы для экономии материалов/машинного времени, что составляет значительную часть себестоимости литья. Экономическая целесообразность проведения расчетов становится очевидной.

Вторым наиболее трудоемким процессом после проектирования при изготовлении форм является разгрузка бункеров после печати. Несвязанный песок удаляется пылесосом (рис. 5), небольшие формы разгружаются вручную, крупные, а их вес может достигать 1,5 тонн, — при помощи ГПМ. Далее с поверхности формы удаляются остатки несвязанного песка, кисточкой удаляется песок только в рекламных роликах (и в случаях плохой настройки параметров процесса печати), в основном все поверхности чистятся сжатым воздухом, это быстро и позволяет наиболее качественно удалить свободный песок даже из труднодоступных мест.

Средний выход «годного» с 1 бункера — 35%. Этот показатель был получен в результате анализа печатей за 5 лет. Лучший показатель загрузки — около 50%, худший — около 12%. Чем плотнее разложены формы в бункере, чем сложнее геометрия форм, тем более трудоемкой становится разгрузка, необходимо

Рис. 6. Упаковка форм



учитывать возможность перемещения форм при удалении песка пылесосом, это наиболее частая причина разрушения форм. Транспортировка форм также относится к основным рискам потерять формы, тряска и вибрации очень быстро их разрушают, однако при должной упаковке наши формы успешно преодолевали расстояния до 2000 км автомобильным транспортом (рис. 6).

Отдельно необходимо рассказать об особенностях непечатанной формы, которые обязательно должны быть учтены при проектировании; например, о газотворной способности формы. Абсолютные цифры приводить не буду, т.к. они сильно зависят от разрешения печати, «свежести» головок (разница в расходе смолы на полный бункер может достигать 8 литров, т.е. почти 90%), однако для понимания приведу два параметра процесса, которые говорят сами за себя: размер зерна песка 0,1 мм, что примерно в 3 раза меньше обычно используемого,

Рис. 7. Сырой песок



Рис. 8. Засорение рекоатера влажным песком



Рис. 9. Дефект расслоения



Рис. 10. Дефект «просечка»



количество смолы, подаваемой в зону печати, в 2 раза больше. Только эти два значения уже говорят о том, что газотворная способность у формы выше, чем в традиционных технологиях ХТС, поэтому при разработке технологии и проектировании формы расположение отливки в форме преимущественно таково, чтобы обеспечить направленную эвакуацию продуктов горения. Сушка формы дает хорошие результаты. Прочность формы аналогична стандартным ХТС, однако и здесь есть своя специфика — мелкий кварцевый песок. Он плохо пропекается, хорошо расширяется при нагреве. Прочность формы часто избыточна. Так, например, для высокопрочных алюминиевых сплавов и сталей действует обязательное правило — опустошение и разрежение форм, толщина стенок формируется эквидистантными поверхностями для равномерного пропекаания,

разупрочнения. Введение специальных добавок для снижения склонности к просечкам, а также повышению термостойкости на SMAХ возможно, однако эксперименты с введением добавок через дозатор (предназначен для ввода ингибитора для литья магниевых сплавов) положительных результатов пока не дали.

Практически все продавцы при продаже оборудования забывают упомянуть о тех проблемах (дефектах/браке, рис. 7–13), с которыми придется обязательно столкнуться. Отметим наиболее часто встречающиеся и объясним причины их возникновения.

— Отклонение линейных размеров. Обычно этот дефект связан с качеством печати — настройкой/состоянием оборудования, качеством материалов, окружающей средой (иногда такие параметры, как влажность, температура могут испортить всю печать).

Рис. 11. Сдвиг-смещение геометрии части формы



Рис. 12. Плохое состояние печатающей головки — «полосит»



Рис. 13. Засорение рекоатера



– Непропечатанные слои. Дефект расслоения возникает при нарушении подачи смолы в зону печати, верхние и нижние слои не склеиваются. Причина — обычно отказ или сбой в работе оборудования. Наиболее частая — состояние печатающих головок, в зону печати подается недостаточное количество смолы.

– Низкая прочность. Обычно возникает при недостаточном количестве смолы в зоне печати или при значительном отклонении параметров печати (соотношение смола/активатор/влажность/разрешение печати/температура).

– Полосы/борозды/ямы. Возникают при попадании посторонних предметов (камушки, фрагменты материалов мешка, сырой песок) в рекоатер, что мешает правильному нанесению слоя песка.

– Несоответствие геометрии. Самый загадочный и очень неожиданный дефект. Возникает достаточно редко. Возможно, связан с качеством файлов STL и конфликтом программного обеспечения.

В настоящее время изготовлены отливки различной сложности из сплавов на основе алюминия и железа: от силуминов до нержавеющей стали. Технология позволяет получать качественные отливки, которые проходят все необходимые виды контроля. Самая тяжелая отливка: из чугуна около 1000 кг, стали — 700 кг, алюминиевого сплава — 300 кг. Самая большая форма — 4000×3000×2000 мм. Наибольшее количество частей форм — около 60 шт. Наименьшая толщина стенки отливки — 2 мм.

Откровенно слабых мест у технологии селективного отверждения песчаной смеси нет, но есть значительные преимущества, которые необходимо уметь использовать и развивать. Основным конкурентом технологии, как и в 2005 году, остаются фрезерные станки и оснастка, изготовленная из пластика или фанеры. По скорости изготовления одной литейной формы для отливок средней сложности фрезерные станки, скорее всего, проиграют, однако если требуется партия сразу в десятков отливок, то здесь оснастка даст фору выращенным формам, но значительно проиграет в случае, если повышается сложность геометрии отливок/форм. Один из рациональных способов изготовления отливок малых серий — изготовление оснастки, которая формирует геометрически простые части форм, а наиболее сложные изготовлены на принтере. Этот вариант наиболее экономически целесообразен. Более того, при таком рациональном подходе любое литейное предприятие может освоить выпуск исключительно сложной продукции небольших серий, успешно конкурируя ценой.

Планы центра на будущее связаны с дальнейшим развитием технологии селективного отверждения песчаной смеси, повышения надежности машин и производительности. Вопросы доступности сервиса 24/7 уже решены для машин отечественного производства на уровне разработчика технологии, производство химии также организовано и успешно работает. ■



Центр цифровых технологий — современный инженеринговый центр, оснащенный высокотехнологичным оборудованием для решения широкого спектра производственных задач

420127, г. Казань, ул. Дементьева, 1
Телефон / факс: 8(843) 204-75-05
E-mail: info@kcdt.ru
www.kcdt.ru

Аддитивное формообразование изделий из металлов и сплавов пучком электронов: прямая подача энергии и материала в зону плавления (часть 2)

Е.В. Краснова, Б.П. Саушкин, Московский политехнический университет

Введение

Технологии изготовления и ремонта деталей машин, основанные на процессе наращивания материала с использованием того или иного метода или способа, известны давно [1]. Эти технологии, в частности, обеспечивают восстановление конструктивных элементов изношенных деталей и продление их ресурса. Большинство технологий наплавки при соответствующей модернизации может использоваться для целей аддитивного производства.

Анализ показывает, что модернизация сводится, по сути дела, к реализации двух принципиальных технических решений: обеспечение перемещения области плавления в соответствии с цифровой моделью изделия путем согласования CAD/CAM-файлов функционирования станочной системы и миниатюризация размеров ванны плавления. Первое из указанных решений обеспечивает получение заданной конфигурации изделия, а второе — получение заданной точности размеров, формы и взаимного расположения генерируемых поверхностей и качества поверхностного слоя. Эти принципы реализованы в ряде технологий аддитивного производства изделий из металлов и сплавов [2–4].

Применение электронного луча с энергией электронов до 60 кэВ в качестве концентрированного потока энергии позволило разработать и эффективно использовать два основных метода АП: селективное электронно-лучевое сплавление СЭЛС (SEBM, EBM) и электронно-лучевое плавление с подачей проволоки в ванну плавления ЭЛПП (EBFF3, EBAM, WEBM). Состояние и развитие первого метода рассмотрены в работах [5, 6]. Ниже обсуждаются основные особенности и перспективы развития второго метода, в котором в качестве исходного материала используют мерную проволоку.

История создания и область применения

Эффект плавления металла под воздействием электронного пучка известен с 1879 г. (В. Крукс). Первое технологическое применение электронного луча для плавления металлов датируется 1905 г. (М. Пирани). В 1934 г. электронный луч, сфокусированный магнитными линзами, впервые использован для прошивки отверстий (фон Ардене), в 1952 г. Карл Штайгервальд построил первую промышленную установку для перфорации отверстий. К настоящему времени технологии

электронно-лучевой обработки (ЭЛО) получили значительное распространение и развитие, мировой парк соответствующего оборудования включает в себя около 4,5 тысяч единиц. Технологии ЭЛО применяются в производстве наукоемкой продукции на предприятиях авиационного и ракетно-космического машиностроения, приборостроения.

В 1995 г. V. Dave в своей диссертации, выполненной в Массачусетском технологическом институте, предложил использовать основные принципы электронно-лучевой сварки для процесса аддитивного формообразования [7, 8]. Процесс был назван изготовлением твердой свободной формы электронным лучом (EBSFF).

Эта идея была развита в Национальном управлении по авиатехнике и исследованию космического пространства США, в Langley Research Center (К. Taminger, В. Braun and al) (рис. 1 [9]). К началу 2000-х здесь разработана и запатентована технология EBF³ (Electron Beam Freeform Fabrication), предназначенная для аддитивного производства сложных ажурных изделий авиационно-космической техники [10–13]. Это процесс аддитивного производства, в котором из твердого монолитного сырья (проволока)

Рис. 1. Главный технолог LaRC В. Браун участвует в отладке процесса EB³ на экспериментальном стенде [3]



изготавливаются детали почти окончательной формы и размеров, требующие меньшего количества исходного сырья и объема окончательной обработки, чем традиционные способы производства. В качестве источника нагрева используется сфокусированный пучок электронов в вакуумной среде для создания расплавленной массы на металлической подложке.

LaRC ориентирован на решение задач ракетно-космического машиностроения, в том числе на разработку технологий производства в условиях космоса. Применение электронного пучка, адаптированного к условиям вакуума и обеспечивающего формирование концентрированного потока энергии, стало естественным

Рис. 2. Инженеры NASA испытывают EBSS-систему в условиях невесомости (2007 г.) [8]



путем создания первых космических технологий изготовления металлических изделий (рис. 2 [14]). EB³ — это процесс, с помощью которого НАСА планирует строить металлические детали в условиях невесомости.

В работе [13] сформулированы основные принципы метода и технологии EB³, акцентированы их достоинства и недостатки, предложена область эффективного применения.

Значительный вклад в развитие технологий аддитивного производства с применением электронного пучка для плавления проволоки внесла компания Sciaky (Чикаго, Иллинойс, (США) (дочерняя компания Phillips Services Industries, Inc.). Она основана в 1930 г. и является известным поставщиком передовых сварочных систем и сварочных услуг на мировом рынке промышленного производства [9, 15].

В 1957 г. Sciaky создает свою первую систему электронно-лучевой сварки и к 70-м годам становится известным производителем этого оборудования. В 1995 г. компания начинает исследования нового производственного процесса с использованием электронного луча и проволоки и в 2009 году внедряет процесс аддитивного производства электронным лучом (EBAM) для крупных металлических деталей. Был открыт, по сути дела, новый сегмент рынка АП, так как с 2014 г. оборудование компании стало доступным на рынке.

В 2011 году компания Lockheed Martin Aeronautics привлекает Sciaky для участия в программе Mentor-Protégé Министерства обороны США, в рамках которой основное внимание уделяется аддитивному производству изделий для программы Lockheed Martin F-35 [10]. В 2014 году Sciaky начинает поставлять на коммерческий рынок системы электронно-лучевого аддитивного производства

(EBAM[®]), а в 2016 году компания поставляет Airbus систему 3D-печати по металлу EBAM[®] промышленного масштаба. В 2017 году Sciaky получает президентскую премию за экспорт систем 3D-печати из металла EBAM[®].

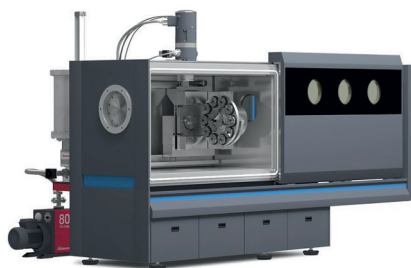
В 2018 году процесс EBAM[®] Sciaky получил сертификацию Lockheed Martin Space на изготовление спутниковых топливных баков, напечатанных на 3D-принтере [17].

Столь значительный успех Sciaky в области технологий и оборудования для аддитивного формообразования электронным пучком, по-видимому, можно объяснить значительным опытом, накопленным компанией в области электронно-лучевой сварки, так как указанные технологии и оборудование имеют много общего. Сегодня технология и промышленное оборудование EBAM Sciaky является самым надежным, полностью программируемым средством получения деталей из целого ряда металлов и сплавов. Компания достигла значительных успехов на американском рынке наукоемких технологий и расширяет свое присутствие на мировом рынке.

Это подтверждается аналогичными техническими решениями других организаций, известных в качестве разработчиков оборудования для электронно-лучевой сварки. Так, в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины предложена идея создания оборудования для электронно-лучевого сплавления как порошковых, так и проволочных материалов на базе установок для электронно-лучевой сварки типа СВ-212М и KL-209 соответственно [18].

Для выращивания изделий из металлических порошков проведена модернизация вакуумной камеры установки, разработана система управления приводами перемещения стола по вертикали и

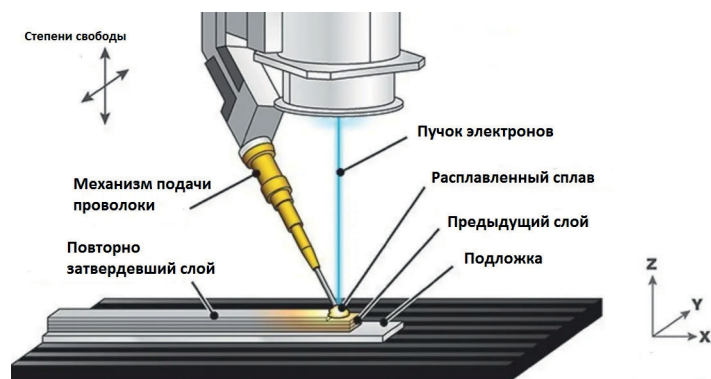
Рис. 3. Установка TETA 6E800M2 фирмы «ТЭТА» с рабочей камерой 800×800×1460 мм, мощность луча — 6 кВт, ускоряющее напряжение 20–60 кВ (фото: www.tetacom.ru)



узлом распределения порошка в камере, а также соответствующее программное обеспечение для аддитивного процесса. Габаритные размеры изделий, выращиваемых на данных установках, составляют 250×250×250 мм, а производительность не превышает 0,3 кг/час.

На лабораторном оборудовании для электронно-лучевого плавления металлической проволоки получены круглые и прямоугольные образцы удовлетворительного качества, которые можно комбинировать между собой. Толщина стенок образцов варьировалась от 6 до 10 мм при использовании четырех типов проволок [18]. Следует отметить, что Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины имеет значительный задел НИОКР по системам управления электронно-лучевых технологических установок [19], и лишь неблагоприятная соци-

Рис. 4. Схема процесса ЭЛПП



ально-экономическая среда сдерживает успешное продвижение в области аддитивных технологий.

Российский разработчик и производитель современных установок для электронно-лучевой сварки компания «ТЭТА» в 2017 г. создала перспективное оборудование для аддитивного формообразования изделий из металлов и сплавов электронным лучом с подачей материала в виде проволоки [20] и продолжает развивать линейку оборудования (рис. 3).

Технология аддитивного формообразования электронным пучком с подачей и плавлением проволоки, ЭЛПП (ЕВАМ)

Технология многопроходной электронно-лучевой наплавки основана на использовании эффекта концентрации энергии электронного пучка в объеме жидкометаллической ванны, формируемой на поверхности наплавляемого изделия, куда порошковым дозатором или механизмом подачи проволоки подается наплавочный материал. Этот метод производства изделий произвольных форм позволяет создавать металлические детали высокой прочности, плотности и жесткости [13, 21, 22]. Изделия создаются на основе трехмерных цифровых моделей с настолько высокой точностью, что иногда не требуется их последующая механическая обработка.

Для плавки металлической проволоки используются элек-

тронные излучатели высокой мощности, расположенные в вакуумной камере. Для создания ванны расплава на подложке используют сфокусированный электронный пучок в вакуумной среде (рис. 4). В пятно контакта пучка с поверхностью подложки со скоростью v_{np} через направляющую втулку и державку, соединенную с фокусирующей головкой, подается проволока, диаметр которой в зависимости от технологической задачи обычно выбирают в диапазоне 0,2...2 мм. Пятно контакта перемещается относительно подложки по заданной траектории в плоскости XOY (соответствующие движения показаны на рис. 4), в результате чего перемещается соответственно и ванна расплава, объем которой формируется преимущественно путем подачи и плавления проволоки. При перемещении пятна расплава, находящийся за его задним фронтом, очень быстро затвердевает (скорость охлаждения $10^4...10^5$ К/с), формируя валик наплавленного материала (трек).

Форма и размеры поперечного сечения валика зависят от мощности электронного пучка, скорости его перемещения, диаметра пятна контакта электронного луча с подложкой, скорости подачи проволоки, теплофизических свойств материала проволоки и других факторов. Формирование заданного слоя осуществляется путем наложения совокупности параллельных треков с некоторым перекрытием. После завершения

Рис. 5. Фотография наружной и внутренней поверхности полусферы, изготовленной из титанового сплава: толщина стенки ~ 6 мм, высота слоя ~ 3 мм

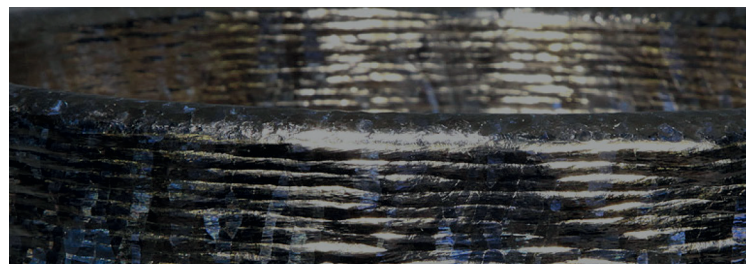
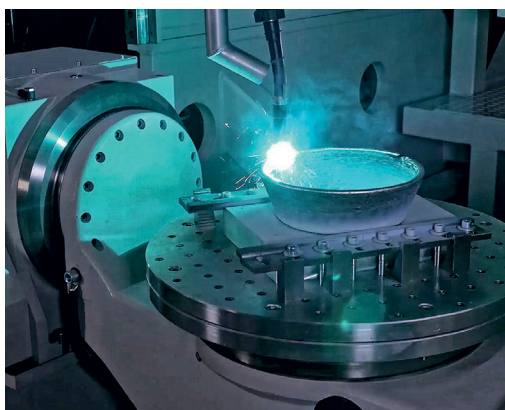
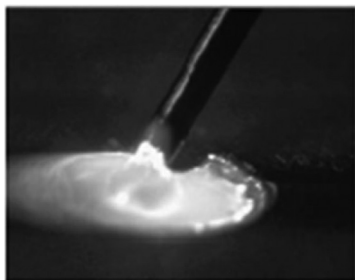


Рис. 6. Ванна расплава с проволокой (слева) и процесс выращивания тонкостенной оболочки методом ЭЛПП



построения заданного слоя рабочая головка поднимается на один шаг по оси Z и наплавляет следующий слой, обеспечивая переплав предыдущего слоя на некоторую глубину. В результате формируется прочная и плотная связь между слоями.

На рис. 5 показана фотография наружной и внутренней поверхности полусферы, изготовленной по технологии ЭЛПП. Как видно, макроструктура стенки формируется путем последовательного наложения отдельных слоев металла, что обуславливает характерный рельеф боковой поверхности стенки.

На рис. 6 показаны ванна расплава с проволокой и процесс выращивания тонкостенной оболочки методом ЭЛПП. Заметим, что при подаче проволоки к ванне расплава используют три разных способа: подача проволоки в ванну расплава: со стороны передней кромки ванны, задней ее кромки и сбоку. В некоторых публикациях рекомендуется первый из перечисленных способов подвода проволоки.

В результате построения получают металлическую пространственную форму, которая в той или иной степени приближения соответствует исходной цифровой модели. Концепция технологии EBF³, развитая в LaRC, заключается в создании металлической детали в виде пространственной сетчатой структуры непосред-

ственно из файла автоматизированного проектирования (CAD). Современные методы автоматизированной обработки начинаются с CAD-модели, которая численно разрезается на слои. Затем с помощью постпроцессора записывается G-код, определяющий траектории осаждения и параметры процесса для EBF³-оборудования. Созданный файл определяет режим обработки и достигаемые технологические характеристики процесса осаждения материала.

Фирменной особенностью технологий EBAM компании Sciaky является возможность создания крупногабаритных изделий с высоким качеством материала из тугоплавких металлов и сплавов. Заметим, что стандартное оборудование Sciaky предусматривает нанесение полос шириной от 1 до 10 мм и высотой от 0,3 до 3 мм. Разрешение можно улучшить за счет подбора параметров режима и диаметра проволоки. Установки EBAM Sciaky способны работать практически с любыми, даже наиболее тугоплавкими металлами в виде проволоки.

Технологические характеристики процессов ЭЛПП

Производительность, оцениваемая по массовой (объемной) скорости построения, определяемой параметрами режима, может изменяться в широких пределах в зависимости от размеров изде-

лия и технических требований к его изготовлению. Так, на этапе разработки скорость осаждения Sciaky EBAM® была заявлена на уровне 6,8 кг/ч (1511 см³/ч). За счет интенсификации параметров скорость наплавки была увеличена до 11,4 кг/ч (2533 см³/ч), и это не предел — по некоторым данным, можно достигнуть значений скорости построения 20 кг/ч (4444 см³/ч). В скобках указана объемная скорость для титанового сплава плотностью 4,5 г/см³.

Таким образом, рассматриваемая технология обеспечивает достижение весьма высоких скоростей осаждения. Однако не следует забывать два важных обстоятельства. Во-первых, повышение производительности сопровождается, как правило, снижением точности обрабатываемого изделия и качества его поверхностного слоя. В нашем случае это приведет к увеличению объема механической обработки в технологическом процессе изготовления изделия. Во-вторых, наличие мощного источника тепла в рабочей зоне предполагает дополнительные меры по тепловой защите элементов оборудования, увеличивает время остывания изделия.

При оценке производительности по количеству изделий, производимых на данном рабочем месте в единицу времени, необходим анализ нормы времени [23] с учетом ее структуры и особенностей работы оборудования. Так, наличие вакуумной камеры в оборудовании для ЭЛПП предполагает учет времени, затрачиваемого на создание вакуума и разгерметизацию камеры, поскольку шлюзовые устройства в оборудовании данного функционального назначения пока не применяют.

Точность обработки является проблемной темой при анализе технологий AP, особенно технологий производства металлических изделий с применением концентрированных потоков энергии.

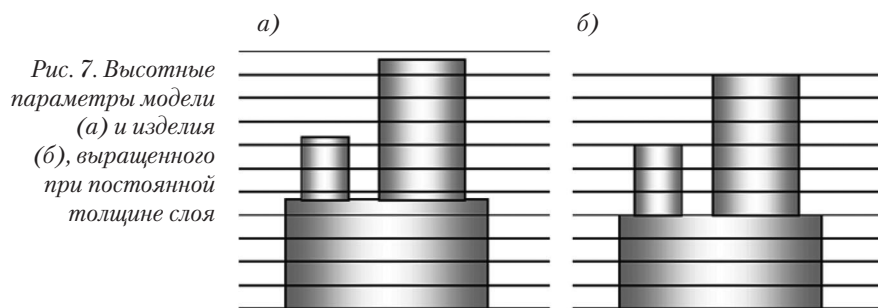


Рис. 7. Высотные параметры модели (а) и изделия (б), выращенного при постоянной толщине слоя

Дело в том, что производители оборудования часто понятие точности обработки подменяют понятием точности позиционирования инструмента (рабочей головки). Вместе с тем понятно, что высокие температуры, сопровождающие процесс формообразования металлических изделий, приводят к температурным деформациям элементов технологической системы, в частности, объекта построения, формируют в нем остаточные напряжения, приводящие к деформациям [5, 24]. Хотя остаточные напряжения могут быть минимизированы с помощью технологий постобработки, деформации, вызванные ими, являются основной причиной потери точности. Поэтому лучшим способом ограничения искажений является контроль над накоплением остаточных напряжений во время осаждения [22]. Для реальных инженерных приложений, связанных с оценкой деформаций построенного изделия, обычно используются конечно-элементные модели для прогнозирования остаточных напряжений и деформаций [25].

Кроме остаточных напряжений еще одним значимым фактором, влияющим на точность детали, является послойный характер построения, который проявляется в следующем [22]. Обычно сплошная деталь создается с постоянной толщиной слоя (рис. 7). Поэтому размер высоты многослойной детали, построенной с постоянной толщиной слоя, может не соответствовать высоте модели, если

рассматриваемый размер не кратен толщине выбранного слоя, что приводит к появлению первичной погрешности этого размера. Эффективным способом решения этой проблемы является адаптивная стратегия построения [26], в которой толщина слоя может быть в определенном диапазоне скорректирована автоматически.

Послойный характер построения приводит также к эффекту «лестничной ступени», который проявляется в том, что гладкие фасонные контуры профиля цифровой модели аппроксимируются кусочно-ломаными линиями реально выращенного изделия. При достаточно большой толщине слоя соответствующие размеры контура могут выходить за пределы допуска, а при малых толщинах формируется характерный микрорельеф. В дополнение к сказанному шероховатость поверхности достигает значительных величин (Rz до 80...100 мкм), а на боковых поверхностях формируется волнистость (рис. 5). Их значения определяются параметрами режима, толщиной слоя и коэффициентом перекрытия.

Отметим также, что в литературе практически отсутствует оценка показателей точности по отклонениям размера, формы и взаимного расположения поверхностей, что затрудняет методический подход к оценке точности.

Все сказанное осложняет эту оценку и приводит порой к некорректным выводам о возможности построения точных изделий, соответствующих техническим тре-

бованиям и пригодных к эксплуатации. Показано, что для модели наложения буртиков с перекрытием невозможно достичь идеально плоской поверхности [22].

Материалы

ЭЛПП-технологии способны создавать аддитивные формы из следующих материалов: титан и титановые сплавы, хромо-никелевые сплавы (Inconel 718, 625), тантал, вольфрам, ниобий, коррозионностойкая сталь (300), легированная сталь 4320, алюминийевые сплавы (2319, 4043), циркониевые сплавы, сплавы медно-никелевые (70Cu-30Ni и 30Cu-70Ni).

По мнению многих авторов, способы аддитивного производства, в которых в качестве расходного материала используется порошок, на данный момент шире внедрены по сравнению со способами, использующими в качестве расходного материала проволоку [27]. Однако каждый из этих методов обладает рядом преимуществ и недостатков, учитываемых при определенных условиях производства.

Так, способ, в котором в качестве расходного материала используется проволока, обеспечивает гораздо большую производительность и коэффициент использования материала по сравнению с порошком и позволяет получить непористый монолитный материал, механические свойства которого сравнимы с изготовленными традиционными методами литья иковки [27]. В то же время для него, как показано выше, характерны более низкая точность формообразования, волнистость и высокая шероховатость поверхности получаемых изделий [28].

Кроме того, применение мелкодисперсных порошков требует повышения уровня безопасности транспортировки и жизнедеятельности. Наблюдается неоднородность свойств порошков различ-

ных производителей. На основе анализа рынка материалов компания — разработчик установок для электронно-лучевого сплавления «Sciaky Inc.» (www.sciaky.com) отмечает, что порошковые материалы в 2–3 раза дороже проволочных.

Микроструктура материала, пористость и механические свойства

Исследования, направленные на изучение структуры деталей, полученных электронно-лучевым сплавлением порошковых материалов и переплавом проволоки, свидетельствуют о схожести микроструктуры образцов, выполненных разными способами [29]. В то же время отмечается некоторая пористость металла изделия, выполненного с использованием порошка в качестве исходного сырья [22].

В процессе оплавления проволоки протекают сложные процессы тепло- и массопереноса, которые существенно влияют на микроструктуру, размер зерна и могут привести к образованию целого ряда дефектов: трещин, межслойных полостей или каверн, пор или пустот в материале и пр. [30].

В общем случае затвердевание при оплавлении присадочного материала зависит от геометрии ванны расплава, которая, в свою очередь, зависит от параметров процесса. Важным фактором управления процессом является соотношение между величиной энергии электронного пучка и скоростью его сканирования. Правильный подбор такого соотношения позволяет получить плотные, практически бездефектные структуры, механические свойства которых сопоставимы со свойствами отливок и поковок [31].

Высокие скорости охлаждения, характерные для ЭЛПП, способствуют получению мелкозернистых структур и соответствующему улучшению механиче-

ских характеристик [20]. С другой стороны, быстрое охлаждение затрудняет «рассасывание» газовых пор [32].

Учитывая сказанное, можно сделать вывод, что контроль и оптимизация микроструктуры является одной из важных областей при получении новых сплавов с помощью аддитивных технологий в связи с сильным влиянием ее на механические свойства [33].

Несмотря на значительное число работ в этой области, термомеханические и микрометаллургические процессы, протекающие при плавлении проволоки и отвечающие за формирование микроструктуры и механических свойств материалов, изучены недостаточно из-за уникальности наблюдаемых тепловых циклов и сложности их описания.

В одной из первых обобщающих работ [34] по структуре и механическим свойствам материалов, полученных при EBF³, исследовались образцы из материалов: алюминиевого сплава 2219 (Al-6Cu, мас.%) и титанового сплава Ti-6-4 ELI (Ti-6Al-4V, мас.%), которые поставляются в том числе в виде проволоки.

Линейные образцы длиной 25 см, шириной в один проход (~1 см) и высотой 2,5 см, сформированные из нескольких слоев, использовались для металлографического анализа и испытаний на растяжение. Применялась проволока диаметром 1,6 мм из сплава 2219 и 2,4 мм из титанового сплава. Типичные объемные скорости осаждения, выбранные для этих исследований, составляли от 178 до 594 см³/ч для сплава 2219 и 434 см³/ч для Ti-6-4. Проволока подавалась со стороны передней кромки ванны расплава.

Металлографические образцы, полученные по стандартным методикам, исследовали средствами оптической микроскопии. Прочность на растяжение при комнатной температуре определяли с

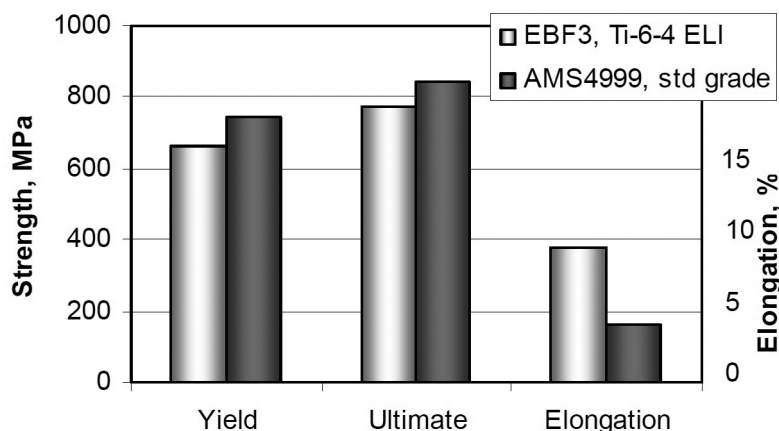
использованием стандартных образцов в соответствии с ASTM E8.

Процесс EBF³ имеет множество параметров, которые определяют получаемую микроструктуру осадка. Три наиболее важных из них, которыми легко управлять, — это скорость поступательного перемещения, скорость подачи проволоки и мощность луча.

В работе была проведена оценка микроструктур полученных отложений при варьировании указанных параметров режима. Для сплава 2219 полученные микроструктуры изменялись от мелкозернистой равноосной до структуры с более крупными размерами зерен и ростом дендритов. Дендриты образовывались преимущественно в области перекрытия треков, где часть предыдущего слоя переплавляется во время нанесения следующего слоя. Эксперименты, проведенные с Ti-6-4, указывают на образование крупных столбчатых зерен с типичной ($\alpha + \beta$)-структурой, растущих от подложки. Показана возможность управления размерами столбчатых зерен путем ограничения подвода тепла в процессе осаждения.

Как для сплава 2219, так и для Ti-6-4 установлена возможность управления микроструктурой материала путем изменения указанных выше параметров режима. Более мелкозернистые, равноосные микроструктуры получаются при менее интенсивных условиях ввода тепла, которые обычно соответствуют более узким осадкам и низким скоростям осаждения. Более крупные зерна в Ti-6-4, включая эпитаксиальный их рост из базовой пластины-подложки и развитые дендритные микроструктуры в зернах и в областях перекрытия треков сплава 2219, развиваются при более интенсивном подводе тепла, обычно для достижения более высоких скоростей осаждения.

Рис. 8. Прочностные свойства сплава Ti-6Al-4V ELI по сравнению со свойствами стандартного материала



Сказанное указывает на компромисс между высокой скоростью осаждения и мелкозернистой микроструктурой для материалов, осажденных с использованием процесса EBF³. Показано, что в условиях данного эксперимента изменения микроструктур, полученных в условиях обработки с различной интенсивностью подвода тепла, практически не влияют на механические свойства исследованных материалов.

На рис. 8 показаны прочностные свойства титанового сплава (предел текучести, предел прочности и относительное удлинение) по отношению к свойствам образца, соответствующего указанному стандарту [35].

К настоящему времени структурно-фазовый состав титановых сплавов, полученных при ЭЛПП, влияние параметров режима на конечную микроструктуру и остаточные напряжения в материале, исследованы в ряде работ [24, 29, 32]. Так, в работе [36] показано влияние термообработки на структурно-фазовое состояние, микроструктуру, механические свойства и поглощение водорода сплавом Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si, изготовленным методом электронно-лучевого сплавления. Показано, что термообработка способствует снижению внутренних напряжений в образцах титанового сплава и приводит к умень-

шению скорости поглощения водорода при высокотемпературном наводороживании из газовой среды.

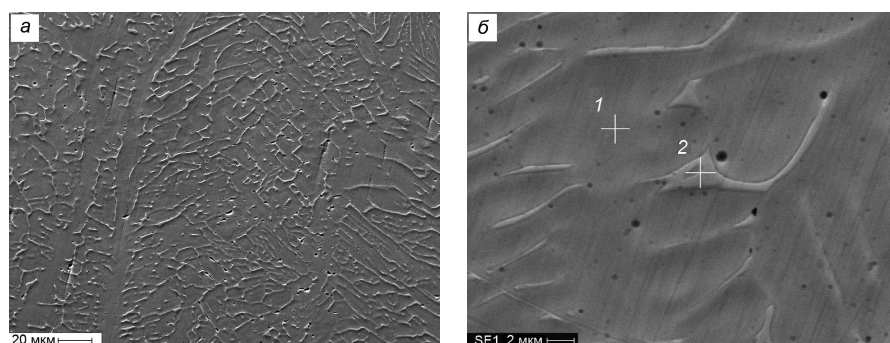
В [37] исследована эволюция микроструктуры, кристаллографической текстуры и механических свойств образцов из IN 718, изготовленных по технологии EBF³ и прошедших термообработку. Использовались сканирующая электронная микроскопия (SEM), дифракция обратного рассеяния электронов (EBSD), и выполнены оценки модуля упругости, прочности на разрыв и твердости. Авторы отмечают, что образцы материала, выращенные по EBF³-технологии, имеют сильно неоднородную микроструктуру и текстурированную структуру зерен.

Установлено, что механические свойства материала, полученного по EBF³-технологии, сильно зависят от текстуры, о чем свиде-

тельствует их зависимость от ориентации относительно направления изготовления EBF³. Отмечено снижение механических свойств по сравнению к кованому IN 718. Сделан вывод о том, что высокотемпературная термообработка приводит к значительному повышению прочности и модуля упругости и изотропии механических свойств этого материала.

В работе [38] рассмотрены особенности структурообразования образцов из нержавеющей стали 12X18H9, полученных с помощью электронно-лучевой аддитивной технологии. Послойное формирование образца в форме кольца с толщиной стенки 5 мм осуществлялось электронно-лучевой наплавкой хромоникелевой проволоки 12X18H9 с применением компьютерной программы, управляющей приводами перемещения и вращения с циклом круговой интерполяции. Определены оптимальные параметры режима, обеспечивающие стабильное протекание процесса наплавки: ускоряющее напряжение 40 кВ, ток 15 мА, скорость подачи проволоки 10 мм/с, скорость перемещения изделия относительно электронного луча 0,18 м/с. Смещение по координате Z (толщина наносимого слоя) составляло 0,5 мм. Диаметр развертки луча 2 мм, частота развертки 1кГц. Использовались методы оптической и электронной сканирующей микроскопии и рентгеноструктурного анализа. По результатам вы-

Рис. 9. Субзеренная структура металла (а) и тонкая структура субзерен (б)



полненной работы можно сделать следующие выводы.

Показано, что структура наплавленного металла имеет сложное гетерогенное строение независимо от исследованного участка изделия. Образуются колонии крупных и мелких дендритов, не ориентированные относительно друг друга. Колонии дендритов имеют разные размеры и ориентацию в зависимости от высоты участка, где проводилось исследование.

Дендриты состоят из субзерен размером ~3–10 мкм с хорошо видимыми границами (рис. 9). Микроанализ разных участков субзеренной структуры (указаны на рис. 9б) свидетельствует о том, что субзерна имеют состав, близкий к составу наплавленной проволоки, тогда как на границах выделяется фаза с большим содержанием хрома.

При анализе микроструктуры выявились поры, размеры которых не превышали 1 мкм. Авторы предполагают, что их природа связана с образованием пузырьков газа в результате реакции между оксидами и находящимся в расплаве углеродом. В отдельных областях кольца, преимущественно в центре, поры практически отсутствуют. Причиной этого может быть температурно-временной режим формирования дендритной структуры, когда в центральной части кольца процесс кристаллизации растягивается во времени из-за снижения теплоотвода и газовые поры выходят к боковой поверхности.

Установлен фазовый состав материала, полученного напла-

кой (аустенит+феррит), причем в нижней части кольца объемная доля феррита равна ~17%, а в верхней части изделия ~41%, что авторы объясняют существенно различными условиями теплоотвода.

Величина микротвердости и в верхней, и в нижней части кольца оказалась одинаковой и равной ~1,7 ГПа, что соответствует твердости стали 12Х18Н9 в литом состоянии. Этот результат свидетельствует о высокой плотности полученного изделия.

Суммируя изложенное, отметим, что одним из основных достоинств аддитивных технологий производства изделий из металлов и сплавов по технологии ЭЛПП является возможность существенного повышения качества материала за счет последовательной термической обработки микрообъемов материала в одинаковых условиях, обеспечения его однородности, изотропности и минимизации дефектов структуры.

Технологическое оборудование

Исследовательский центр NASA в Лэнгли создал и апробировал 2 системы EBF³ [13, 34]. Наземная система представляет собой коммерчески доступный аппарат для электронно-лучевой сварки, адаптированный для разработки процесса EBF³. Эта система включает в себя электронно-лучевую пушку с ускоряющими напряжениями 42 кВ и 60 кВ, вакуумную систему, систему позиционирования и сдвоенные устройства подачи проволоки,

способные работать независимо и одновременно.

Два механизма подачи проволоки могут быть загружены либо проволокой разного диаметра для построения конструктивных элементов различного размера и точности, либо проволокой из различных материалов для построения изделий из специальных сплавов и материалов с градиентным составом. Позиционирование программируется по шести осям координат: X, Z, Y, угол наклона электронно-лучевой пушки, две поворотные оси стола. Вакуум в рабочей камере размером 2,5×2×2,7 м составляет ~5×10⁻³ Па.

Вторая (мобильная) система EBF³ является портативной и имеет небольшую вакуумную камеру, фиксированную мало-мощную электронно-лучевую пушку, четырехосевую систему управления движением стола (X, Y, Z и вращение), механизм подачи проволоки, а также систему контроля и управления. Эта система EBF³ размещается в вакуумной камере кубической формы размером 1×1×1 м с возможностью изготовления компонента размером 30×30×15 см. Она прошла адаптацию в условиях невесомости, предназначена для изготовления относительно небольших деталей сложной формы и обладает более высокой точностью системы позиционирования.

Компания Sciaky разработала модельный ряд установок для реализации EBAM®-технологий. В табл. 5 показаны геометрические характеристики некоторых из них. Как видно, наибольший размер получаемого изделия составляет

Таблица 5. Геометрические характеристики рабочей камеры и зоны построения

Геометрические характеристики	Модель				
	300	150	110	88	68
Размеры камеры: (ширина, глубина, высота), м (дюймы)	7,6×2,7×3,4 (300×108×132)	3,8×3,8×3,8 (150×150×150)	2,8×2,8×2,8 (110×110×110)	2,2×2,2×2,8 (88×88×110)	1,7×1,7×2,8 (68×68×110)
Размеры зоны построения, м (дюймы)	5,8×1,2×1,2 (228×48×48)	2,8×1,6×1,6 (110×62×62)	1,8×1,2×1,6 (70×47×63)	1,2×0,9×1,6 (48×35×63)	0,7×0,63×1,6 (28×25×63)

Рис. 10. Установки для ЭЛПП крупногабаритных изделий компании Sciaxy
ЕВАМ 300 ЕВАМ 110



5,8 м, а высота построения — 1,6 м. Компания идет по пути кастомизации оборудования и готова к поставке специализированных и специальных машин под конкретные изделия.

На рис. 10 показаны фронтальные изображения установок ЕВАМ 300 и ЕВАМ 110, представленных на рынке [39]. Как видно, рабочая камера установок представляет собой конструкцию в виде прямоугольного параллелепипеда повышенной жесткости, характерную для установок электронно-лучевой сварки. На рис. 11 показана внутренняя полость камеры и рабочая зона. Палета перемещается по координате Y. На ней смонтирован двухкоординатный поворотный стол, обеспечивающий поворот изделия относительно двух линейных осей. Траверса перемещается по горизонтальным направляющим по координате X, а установленный на ней кронштейн с рабочей головкой перемещается относи-

тельно траверсы по координате Z. Сообщается, что все установки модельного ряда работают при остаточном давлении в рабочей камере $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па.

Рабочая головка жестко связана с устройством подачи проволоки, которое состоит из корпуса и направляющей втулки (рис. 12). Корпус крепится к головке с помощью системы хомутов, кронштейнов и регулирующих элементов. Установки оснащаются одним или двумя устройствами подачи проволоки. В последнем случае удастся повысить производительность построения, создавать изделие из двух материалов или изделия из разных материалов, осуществлять легирование расплава в процессе построения.

Управление технологическим процессом на оборудовании ЕВАМ® компании Sciaxy осуществляется специально созданной системой управления IRISS® — Interlayer Realtime Imaging & Sensing System («Межслойная систе-

ма визуализации и зондирования в реальном времени»). Многие системы аддитивного производства изделий из металлов имеют аналогичные системы контроля, например, запись и хранение видеозаписи построения. Ключевой особенностью платформы Sciaxy IRISS® является ее адаптация в реальном времени. Эта система динамично отслеживает и изменяет параметры процесса по мере создания геометрии изделия для поддержания химического состава, микроструктуры и механических свойств материала в заданных пределах. Кроме того, электронный луч Sciaxy может генерировать настраиваемый растровый узор вместо одного луча, как в некоторых машинах для электронно-лучевой сварки и машинах для селективного лазерного плавления (SLM). Один из менеджеров компании О'Хара описывает функцию IRISS® следующим образом: «Мы стремимся к тому, чтобы каждый грамм металла испытал одинаковый переход от твердого состояния к плавлению и последующему затвердеванию» [40].

IRISS™ является единственной системой мониторинга и контроля в режиме реального времени на рынке, которая может воспринимать в цифровом виде результаты зондирования и сама настраивать осаждение металла с высокой точностью и повторяемостью, обеспечивая постоянный контроль процесса формирования геометрии детали, механических свойств, микроструктуры и химического состава металла для крупномасштабных изделий. Это инновационная система с обратной связью, которая вносит коррективы в параметры процесса на протяжении всего процесса построения изделия (рис. 13).

Собранные данные оцениваются и обрабатываются программными алгоритмами IRISS. Выходные данные программного

Рис. 11. Рабочая зона установки

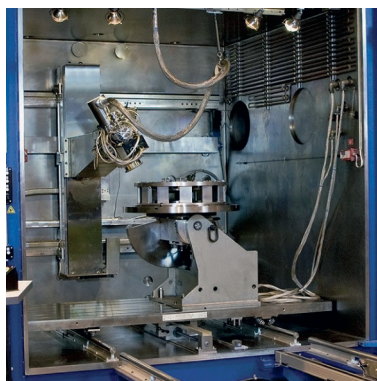
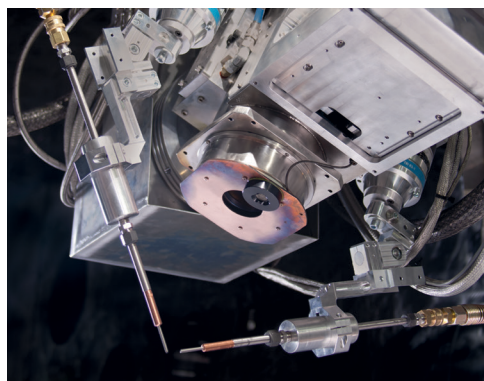


Рис. 12. Устройства для подачи проволоки



обеспечения изменяют параметры наплавки, такие как мощность электронного луча, скорость подачи проволоки и траектории движения. Эти регулировки выполняются десятки раз в секунду, чтобы гарантировать, что каждый грамм наплавленного металла претерпевает одинаковый переход от проволоки к жидкости и твердому телу. Результатом является стабильное производство деталей высокого качества и обеспечение высокой производительности построения.

Компания расширяет модельный ряд своих установок, стремясь к кастомизации любого агрегата под нужды заказчика, совершенствует методы и средства производственного контроля, справедливо полагая, что гарантия качества изготавливаемых моделей является главным фактором ее продукции.

В России проводятся исследовательские работы по созданию систем управления процессом ЭЛПП [41]. Основными входными параметрами процесса электронно-лучевой послышной наплавки являются мощность луча, размеры пятна нагрева, скорость перемещения изделия или пушки, скорость подачи проволоки. Все приведенные каналы управления обычно охвачены отрицательными обратными связями, кроме канала скорости подачи проволоки, поэтому актуальной задачей

является исследование канала управления подачей присадочной проволоки.

Показано, что канал управления скоростью подачи проволоки в установке электронно-лучевого аддитивного формообразования необходимо рассматривать как один из основных каналов управления процессом. Предложен оптический датчик скорости подачи проволоки, позволяющий производить измерение скорости поступательного движения проволоки и отслеживать ее проскальзывание в процессе подачи. Проведены испытания предложенного датчика, оценены динамические характеристики канала управления скоростью подачи проволоки и подтверждена возможность его применения в составе системы управления с обратной связью.

Компания Sciaky не представляет развернутую характеристику своих установок. Однако в результате исследований, проведенных НИУ «МЭИ» [42], были определены диапазоны значений параметров процесса электронно-лучевого сплавления. Установлено, что мощность луча, необходимая для сплавления присадочной проволоки диаметром 0,6...2,4 мм, варьируется в диапазоне 0,5...2,5 кВт. Производительность процесса может изменяться от 3 до 12 кг/час нанесенного металла для крупногабаритных изделий, а для деталей меньших габаритных

размеров поддерживают скорость наплавки в диапазоне 5...10 мм/с, что соответствует производительности процесса 0,75...1,5 кг/ч [14].

Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники представлена малогабаритная установка для электронно-лучевого выращивания, в которой предусмотрено расположение источника наплавленной проволоки снаружи вакуумной камеры, для чего была разработана специальная система подачи проволоки [43]. Кроме этого, в установке апробирован источник электронов с плазменным катодом, имеющий определенные преимущества перед термокатодом. Система испытана в реальных условиях построения изделий из коррозионностойкой стали размерами до 100 мм. Точность построения составила $\pm 0,2$ мм, скорость построения 1 кг/ч. Характеристика электронного пучка: энергия электронов — до 60 кэВ, ток пучка — до 100 мА, диаметр пучка — до 200 мкм, плотность потока мощности — до 10^6 Вт/см².

Научные разработки и исследования

Анализ информационных потоков указывает на расширение фронта научных исследований в области технологий ЭЛПП.

Так, в работе [44] разработана модель теплопередачи и переноса металла, основанная на численном решении уравнения теплопроводности для твердофазного металла и системы уравнений Навье – Стокса для расплава, позволяющая анализировать движение свободной поверхности расплава, поле скоростей и температурное поле при наплавке металла с заданными теплофизическими свойствами. Предложен алгоритм численной аппроксимации движения свободной поверхности расплава и обсуждаются результаты моделирования плавления эле-

Рис. 13.
Визуализация
данных
системы IRISS®



мента проволоки, локализованного над подложкой.

Проведены расчеты режима переноса металла при ЭЛПП с подачей проволоки из коррозионно-стойкой стали 316L диаметром 1,2 мм. Показана преобладающая роль сил поверхностного натяжения при формировании валика и выявлен ламинарный режим течения расплава без формирования вихревых потоков. Расчеты проведены при кратковременном (0,1 с) воздействии электронного пучка мощностью 6 кВт.

Предложен алгоритм численной аппроксимации движения свободной поверхности расплава и обсуждаются результаты моделирования плавления элемента проволоки, локализованного над подложкой (рис. 14).

Наряду с теоретическими исследованиями опубликованы интересные экспериментальные исследования процесса ЭЛПП в [45].

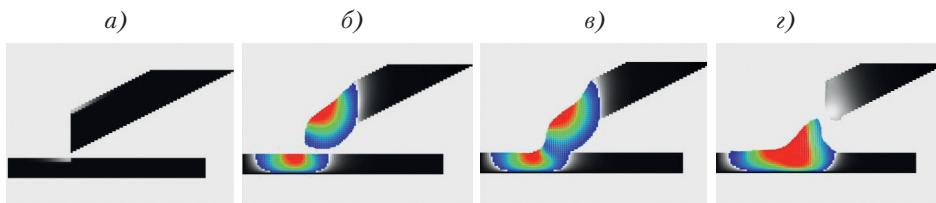
Интегрированные технологии

В [6] отмечалась перспективность работ по созданию интегрированных систем для производства изделий в вакууме. Многие из проектов, разрабатываемых в этом направлении, не опубликованы из-за режима секретности.

Так, компания Sciaky сообщила о применении сдвоенного процесса, основанного на применении технологий ЭЛПП и электронно-лучевой сварки. При необходимости и определенной модернизации оборудования можно будет, на наш взгляд, интегрировать такие технологии, как ионно-плазменное нанесение покрытий, электронно-лучевую перфорацию, резку, и реализовать другие процессы, протекающие в вакууме.

Следует ожидать, что технологии и оборудование с высоким уровнем интеграции появятся на более высоком уровне космических исследований и реальной космической индустрии.

Рис. 14. Результаты численных экспериментов: а) начальная фаза нагрева, б) формирование капли расплава, в) смыкание капли с подложкой, г) отрыв капли



Область эффективного применения технологий ЭЛПП

Под эффективностью применения технологий аддитивного изготовления твердых тел произвольной формы понимают снижение издержек производства наукоемких изделий за счет таких факторов, как повышение производительности и уровня автоматизации, сокращение времени разработки и выполнения заказов, улучшение качества продукции.

Как утверждает компания Sciaky Inc., EBAM® — это крупномасштабный процесс. Так, по этой технологии изготовлены титановый лонжерон крыла самолета длиной 3,7 м, титановая переборка диаметром 2,6 м и титановый прототип для аэрокосмической промышленности массой 1360 кг, на создание которого ушло 120 часов. Отмечается, что минимальный размер изделий, для которых целесообразно использовать EBAM®-технологию равен 0,2 м.

Компанией разработана технология изготовления шарбаллонов — деталей, к прочности и герметичности которых предъявляются очень высокие требования. Получены изделия в виде тонкостенных тел вращения, протяженные изделия со сложным рельефом, детали пространственно сложной формы, например, шнеки, изделия с низким коэффициентом использования материала при изготовлении их резанием (рис. 15).

По данным компании, разработанная технология наиболее эффек-

тивна при изготовлении элементов конструкции летательных аппаратов, жидкостно-реактивных и газотурбинных двигателей, нефтегазового и медицинского оборудования, а также оборудования для ремонта элементов оснастки и других деталей, изготовлении баллонов, работающих под давлением, и турбинных лопаток.

По мнению К.М. Tamingер — одной из ведущих специалистов — разработчиков технологии EBAM® — этот процесс позволяет быстро добавлять конструктивные элементы сложных форм к относительно простым литым или кованным заготовкам [4]. Это в ряде случаев более эффективно по отношению к традиционному подходу, связанному с удалением больших объемов стружки для получения монолитной металлической конструкции. Выборочное добавление металла к более простым заготовкам рассматривается как одно из эффективных направлений развития этой технологии.

Прямая экономия производственных затрат может быть достигнута за счет ремонта и утилизации деталей, сокращения времени обработки и уменьшения отходов.

Качество продукции может достигаться за счет контроля микроструктуры и состава материала в гораздо более мелком масштабе, при изготовлении деталей из массивных заготовок по классическим технологиям.

Наконец, возможность использования функционально-градиентных структур позволяет повы-

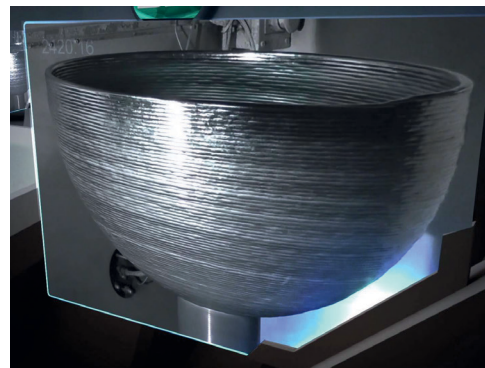
Рис. 15. Изделия, изготовленные по EBAM-технологии [46]



Титановый шар-баллон для космических аппаратов



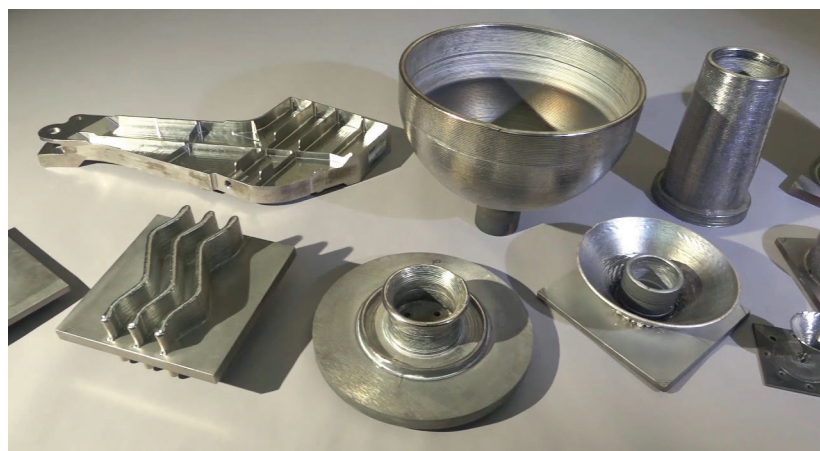
Винтовая поверхность шнека



Полусфера



Плита повышенной жесткости



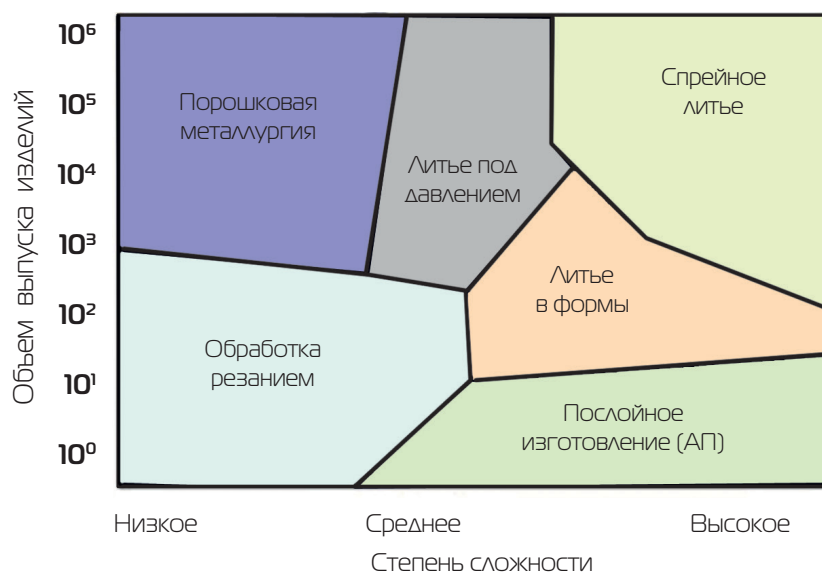
Изделия различного назначения

сить функциональные свойства изделий и понизить стоимость материалов.

На рис. 16 показана область эффективного применения аддитивного (послойного) производства в координатах: «годовой объем выпуска — конструктивная сложность изделия» (низкая, средняя, высокая) [5]. Видно, что такое производство эффективно в условиях единичного и мелкосерийного производства при изготовлении изделий средней и высокой конструктивной сложности.

Таким образом, суммируя и обобщая данные, изложенные в настоящей статье и статье [6], можно заключить, что использование электронного пучка для создания мощного теплового источника в области плавления исходного материала позволило разработать, адаптировать и применить в промышленном производстве две основные технологии.

Рис. 16. Область эффективного применения аддитивных технологий получения металлических заготовок: 1 – порошковая металлургия, 2 – литье под давлением, 3 – спрейное литье, 4 – обработка резанием, 5 – литье в формы, 6 – послойное изготовление (АП)



Первая из них (EBM) основана на избирательном плавлении локальной области порошкового материала, послойном постро-

нии изделия и характеризуется невысокой производительностью изготовления относительно небольших объектов производства

при высокой точности построения. Вторая (ЕВАМ) базируется на непрерывной подаче присадочной проволоки в зону воздействия

электронного пучка, образовании ванны расплава и перемещении этой ванны по заданной программе. Эта технология обеспечивает

высокопроизводительное изготовление или ремонт крупногабаритных изделий при невысокой точности построения. ■

Литература

1. Восстановление деталей машин: справочник / под ред. В.П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
2. W. Gao, Yu. Zhand, D. Ramanujan et al The Status, Challenges, and Future of Additively Manufacturing in Engineering/ Computer-Aided Design 69 (2015). P. 65–89
3. Gokuldoss P.K., S. Kolla, Jürgen Eckert Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting – Selection Guidelines// Materials 2017, 10, 672; doi:10.3390/ma10060672 (www.mdpi.com/journal/materials).
4. Karen M. Taminger, Robert A. Hafley Electron Beam Freeform Fabrication for Cost Effective Near-Net Shape Manufacturing/Proceeding of NATO/RTO AVT-139 Specialists Meeting on Cost Effective Manufacture via Net Shape Processing (Amsterdam). 2006.
5. Korner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review /International Materials Reviews. 2016. Т. 61. № 5. PP. 361–377.
6. Краснова Е. В., Саушкин Б. П. Аддитивное формообразование изделий из металлов и сплавов пучком электронов. 1. Селективное плавление (SEBM)
7. Davé, Vivek Ramesh (1995). Electron beam (EB) assisted materials fabrication (Thesis thesis). Massachusetts Institute of Technology. hdl:1721.1/11505.
8. Dave, V.R., Matz. J.E., and Eagar, T.W. Electron Beam Solid Freeform Fabrication of Metal Parts, Proceedings of 6th SFF Symposium, 64–71 (1995).
9. Электронный ресурс: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electron-beam_freeform_fabrication&oldid=986517204
10. Taminger, K.M.B. and Hafley, R.A. Characterization of 2219 Aluminium Produced by Electron Beam Freeform Fabrication. Proceedings of 13th SFF Symposium, 482–489 (2002).
11. Watson, J.K., Taminger, K.M.B., Hafley, R.A., and Petersen, D.D. Development of a Prototype Electron Beam Freeform Fabrication System. Proceedings of 13th SFF Symposium, 458–465 (2002).
12. Taminger, K.M.B., Hafley, R.A., Fahringer, D.T., and Martin, R.E. Effect of Surface Treatments on Electron Beam Freeform Fabricated Aluminium Structures. Proceedings of 15th SFF Symposium (2004).
13. Karen M. Taminger, Robert A. Hafley Electron Beam Freeform Fabrication for Cost Effective Near-Net Shape Manufacturing/Proceeding of NATO/RTO AVT-139 Specialists Meeting on Cost Effective Manufacture via Net Shape Processing (Amsterdam). 2006.
14. Электронный ресурс: https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080013538_2008013396.pdf
15. Электронный ресурс: [https://yandex.ru/search/?text=Sciaky%2C\(%D0%A1%D0%A8%D0%90\)&lr=10782&clid=223362616](https://yandex.ru/search/?text=Sciaky%2C(%D0%A1%D0%A8%D0%90)&lr=10782&clid=223362616).
16. «Lockheed Martin And Sciaky, Inc. Enter Mentor-Protégé Agreement With Initial Focus On Electron Beam Manufacturing Of F-35 Parts». Retrieved 3 September 2014. Lockheed Martin.
17. Lockheed Leaning on 3-D Printing To Bring Tank Work In-house Space News. Retrieved 10 June 2015.
18. Нестеренков В.М., Хрипко К.С., Матвейчук В.А. Электронно-лучевые технологии сварки, наплавки, прототипирования – результаты и перспективы // Автоматическая сварка. 2018. № 11–12. С. 142–150.
19. Патон Б.Е., Назаренко О.К., Нестеренков В.М. и др. Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия / Автоматическая сварка. 2004. № 5. С. 3–7.
20. Электронный ресурс: <https://yandex.ru/turbo/hightech.fm/s/2017/05/16/3d-printer-tomsk>
21. Fuchs J. Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source / J. Fuchs, C. Schneider, N. Enzinger // Welding in the Worlde.– 2018.– V. 62, No 2.– P. 267–275. DOI: 10/1007/s40194–017–0537–7
22. D. Ding, D. Cuiuri, Z. Pan, H. Li Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests/ The International Journal of Advanced Manufacturing Technology/ 2015. 81 (1–4). 465–481. DOI: 10.1007/s00170–015–7077–3
23. Моргунов Ю. А., Саушкин Б. П. Технологические аспекты аддитивного формообразования / Научные технологии в машиностроении. 2016. № 7 (61). С. 28–35.
24. Lim G. et al. Residual Stresses in Ti-6Al- 4V Parts Manufactured by Direct Metal Laser Sintering and

- Electron Beam Melting //British Society of Strain Measurement. 2017.
25. Ding J et al (2014) A computationally efficient finite element model of wire and arc additive manufacture. *Int J Adv Manuf Technol* 70:227–236
 26. Sun S et al (2007) Adaptive direct slicing of a commercial CAD model for use in rapid prototyping. *Int J Adv Manuf Technol* 34:689–701.
 27. Gong X. Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology // X. Gong, T. Anderson, K. Chou // ASME / ISCIE2012 international symposium on flexible auto-mation. American Society of Mechanical Engineers. 2012. PP. 507–515.
 28. Жуков В. В., Григоренко Г. М., Шаповалов В. А. Аддитивное производство метал. 2016. № 56 (753). С. 148–153.
 29. Liu Y. J. et al. Microstructure, defects and mechanical behavior of beta-type titanium porous structures manufactured by electron beam melting and selective laser melting /*Acta Materialia*. 2016. Т. 113. PP. 56–67.
 30. Федоров В. В., Клименов В. А., Клопотов А. А. Влияние структуры и дефектов на разрушение сплава Ti6Al4V, сформированного в условиях электронно-лучевого послыонного сплавления. Ч.1. Состав и структура/Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2020. Том 17. № 2. С. 216–227.
 31. Pobel, C.R., Osmanlic, F., Lodes, M.A., Wachter, S. and Körner, C. Processing windows for Ti-6Al-4V fabricated by selective electron beam melting with improved beam focus and different scan line spacings/ *Rapid Prototyping Journal*. 2019. Vol. 25 No. 4. PP. 665–671.
 32. T. Chen, Sh.Pang, Q. Tang Induction of Ball-Filled Pores in Electron Beam Freeform Fabrication of Ti-6Al-4V Alloy by Dissolved Gas and Metallic Vapor/ *Metal Mater.Trans A*. 2015.
 33. E Hosseini, V. Popovich A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718/ 2019
 34. Karen M. Taminger, Robert A. Hafley Electron Beam Freeform Fabrication for Cost Effective Near-Net Shape Manufacturing/Proceeding of NATO/RTO AVT-139 Specialists Meeting on Cost Effective Manufacture via Net Shape Processing (Amsterdam). 2006.
 35. Annual Book of ATSM Standards, E8–96 (1996). Vol. 3.01. Pp. 55–76.
 36. Пушилина Н.С., Кудияров В.Н., Сыртанов М.С. Постобработка титановых сплавов, изготовленных с помощью аддитивных технологий //Сборник научных трудов «Вестник современных технологий». 2019. № 3 (15). С. 70–74.
 37. W. A. Tayon, M. R. Redding, R. N. Shenoy Correlation Between Microstructure and Mechanical Properties in an Inconel 718 Deposit Produced Via Electron Beam Freeform Fabrication/ *J. of Manufacturing Sci. and Engineering* (2014) 136 (6):061005 DOI: 10.1115/1.4028509
 38. Колубаев А. В., Тарасов С. Ю., Филиппов А. В. и др. Особенности формирования структуры хромоникелевой стали, полученной с использованием электронно-лучевой аддитивной технологии/ *Известия высших учебных заведений. Т. 61, № 8. Физика*, 2018.— С. 110–116.
 39. Электронный ресурс: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/industrial-metal-3d-printers>
 40. Электронный ресурс: <https://3dprintingindustry.com/news/interview-how-sciaky-is-overcoming-challenges-and-competition-of-metal-am-152843/>
 41. Электронно-лучевая технология аддитивного формообразования: вопросы управления и воспроизводимости технологических режимов /Щербаков А.В. [и др.] // *Технический оппонент*. № 2. 2019. С. 30–37.
 42. Драгунов В. К., Гончаров А. Л., Бузаев М. Ф. Электронно-лучевые технологии: состояние, проблемы, перспективы // *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии «НИУ «МЭИ»*// 17–20.11.2015. С. 388–399.
 43. Бакеев И. Ю., Бурачевский Ю. А., Бурдовичин В. А. и др. Установка электронно-лучевого выращивания металлических изделий/ *Доклады ТУСУРа*. 2017. Т. 20. № 3. С. 76–78.
 44. Щербаков А. В., Гапонова Д. А., Родякина Р. В. Численное моделирование теплопередачи и переноса металла при электронно-лучевом аддитивном формообразовании с подачей присадочной проволоки/ *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2019 V. 7. № 1. DOI: 10.24892/RIJIE/20190109
 45. Thermal Imaging of the Electron Beam Freeform Fabrication Process/ К.М. Taminger, C.S. Domac, J.N. Zalameda et al.// *Proceedings of the SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging (Baltimore, MD, United States 17–21 Apr. 2016)*. Report No. NF1676L-22574. DOI: 10.1117/12.2222439.
 46. Электронный ресурс: <https://www.makepartsfast.com/sciakys-technology-helps-automotive-cut-time-costs-tooling-stamping-dies/>, <https://www.prnewswire.com/news-releases/sciakys-electron-beam-additive-manufacturing-ebam-technol>

Исследование процесса электронно-лучевого сплавления

В.В. Константинов, к.т.н., генеральный директор публичного акционерного общества «Электромеханика»

Ю.А. Соколов, д.т.н., заместитель коммерческого директора публичного акционерного общества «Электромеханика»

Инженерные задачи исследования аддитивного производства обладают рядом особенностей, к числу которых можно отнести геометрию расчётной области, сложные физико-химические процессы, а также ограничения, накладываемые на параметры производственной системы. При расчёте технологических параметров процесса электронно-лучевого сплавления (ЕВМ) необходимо выполнить моделирование взаимодействия электронного пучка с подложкой, сплавления слоя порошка с подложкой, растекания материала на базе системы, состоящей из уравнений изменения энергии, изменения количества движения (уравнения Навье — Стокса) и уравнения неразрывности.

Моделирование процесса формирования слоя

В основе моделирования процесса формирования слоя лежит решение нелинейных дифференциальных уравнений изменения энергии, изменения количества движения (уравнения Навье — Стокса) и уравнения неразрывности. При воздействии на материал электронным пучком происходят фазовые переходы в условиях сильной неравновесности. Учёт неравновесного характера протекающих процессов основывается на рассмотрении фазового состояния ячейки подложки в зависимости от энтальпии и времени ожидания появления зародыша новой фазы. Другой подход основан на решении задачи Стефана с привлечением нелинейной зависимости скорости движения границы раздела фаз от температуры. При моделировании необходимо учитывать зависимость теплофизических свойств материала порошка (удельной теплоёмкости, теплопроводности и плотности) от температуры.

Особенностью процесса формирования слоя электронным пучком является движение жидкой проводящей поверхности под действием электрического и магнитного полей. Чтобы учесть влияние жидкого проводящего слоя в электромагнитном поле вследствие воздействия электронного пучка, в правую часть уравнения теплопроводности добавим дополнительное слабое:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + f - \delta_s L V_n + \rho_{\text{np}} j^2, \quad (1)$$

где ρ_{np} — проводимость жидкого металла, j — плотность тока внутри жидкости.

Дифференциальное уравнение движения жидкости в области расплавленного слоя имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \frac{\mu}{3\rho} \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{v} + \frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{v}, \quad (2)$$

где $\mathbf{g} = (0, 0, g)$ — ускорение свободного падения; ρ — плотность; p — давление; μ — коэффициент динамической вязкости; $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ — вектор эффективной скорости расплава, рассчитываемый через истинную скорость жидкой фазы.

Плавление материала порошка осуществляется электронным пучком. В центре пятна на поверхности температура максимальная, уменьшается к краю пятна, что создаёт температурный градиент на свободной поверхности. При плавлении возникает движение жидкости. Это приводит к сложным термокапиллярным течениям вследствие зависимости поверхностного натяжения от температуры. Эффекты, связанные с движением жидкости вблизи поверхности раздела и вызванные зависимостью коэффициента поверхностного натяжения от температуры или концентрации примесей, называется эффектом Марангони. Действующая на поверхность ванны расплава сила Марангони приводит к перемещению расплава от центра к краям слоя.

Зависимость коэффициента поверхностного натяжения (σ) от температуры можно определить через следующую формулу:

$$d\sigma/dT = -B(\rho/\mu M)^{2/3},$$

где T — температура; μM — молекулярная масса; B — постоянная, равная $2,1 \text{ г}\cdot\text{см}^2/(\text{с}\cdot^\circ\text{C})$.

Зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры может быть приближенно представлена уравнением Френкеля — Андраде:

$$\mu = A_1 \exp(E_\eta/RT),$$

где E_n — свободная энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — температура по абсолютной шкале; A_1 — константа, зависящая от химической природы вещества. Константу A_1 можно рассчитать по уравнению Эйнштейна:

$$A_1 = Nh/V,$$

где N — число Авогадро, h — постоянная Планка, V — мольный объем. Порядок величины A_1 составляет 10^{-4} – 10^{-5} Па·с.

Так как объектом плавления является порошок шаровидной формы, то поверхность раздела двух сред искривлена. Следовательно, давления в обеих средах различны. Коэффициент поверхностного натяжения жидкости, который равен работе, необходимой для увеличения поверхности жидкости на единицу площади при постоянной температуре, зависит от свойств жидкости и среды, с которой граничит жидкость.

Поверхность жидкого металла стремится принять свою равновесную форму под влиянием силы тяжести и сил поверхностного натяжения. Следует отметить, что влияние капиллярности на гравитационные волны существенно при малых длинах волн. Тогда дифференциальное уравнение движения жидкости имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v}\bar{v})\bar{v} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \frac{\mu}{3\rho} \text{grad div } \bar{v} + \\ + \frac{\mu}{\rho} \Delta \bar{v} - \sigma R \delta(\varphi) \bar{V} \varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

где R — искривление линии раздела двух фаз; φ — расстояние от текущей линии раздела двух фаз до нулевого интерфейса; $\delta(\varphi)$ — волновая функция от φ .

Последняя составляющая уравнения (3) позволяет учесть волновой характер процессов на свободной поверхности, разделяющей поверхности двух фаз: жидкости и вакуумного пространства.

Уравнения теплопроводности имеют вид:

— твердая фаза, $(x, y, z, t) \in Q^-$

$$c^- \rho^- \frac{\partial T^-}{\partial t} - \text{div}(\lambda^- \text{grad } T^-) + f^-, \quad (4)$$

— жидкая фаза, $(x, y, z, t) \in Q^+$

$$c^+ \rho^+ \left(\frac{\partial T^+}{\partial t} + \mathbf{v} \text{grad } T^+ \right) = \text{div}(\lambda^+ \text{grad } T^+) + f^+. \quad (5)$$

Здесь c^- и c^+ — теплоёмкость материала соответственно в твёрдом и жидком состояниях; λ^- и λ^+ — коэффициент теплопроводности материала в твёрдом и жидком состояниях; ρ^- и ρ^+ — плотность материала в твёрдом и жидком состояниях; T^- и T^+ — температура материала в твёрдом и жидком состояниях; f^- и f^+ — плотности тепловых источников в твёрдом и жидком состояниях.

В жидкой фазе учитывается также конвективный перенос. В уравнении теплопроводности функция f

представляет собой плотность распределённых массовых источников тепла, находящихся внутри расчётной области.

На границе фазового перехода S (граница контакта двух сред) выполняется условие непрерывности температуры

$$[T] = 0, \quad (x, y, z) \in S(t). \quad (6)$$

Квадратные скобки используются для обозначения скачка температуры.

Фазовый переход сопровождается выделением/поглощением определённого количества тепла, поэтому тепловой поток на границе фазового перехода разрывной:

$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right] = -L V_n, \quad (x, y, z) \in S(t), \quad (7)$$

где L — энтальпия фазового перехода, V_n — скорость движения границы фазового перехода по нормали.

При постоянной температуре фазового перехода граница в каждый момент времени определяется следующим образом:

$$S(t) = \{(x, y, z) \in \Omega, T(x, y, z, t) = T_*\}.$$

На границе фазового перехода выполняются граничные условия первого рода

$$T(x, y, z, t) = T_*, \quad (x, y, z) \in S(t). \quad (8)$$

Условия (6)–(8) представляют собой условия Стефана, а соответствующая задача для уравнений (4) и (5) называется задачей Стефана. Рассматриваемая задача характеризуется тем, что исследуются процессы в обеих фазах, поэтому в данном случае говорят о двухфазной задаче Стефана. В предельной ситуации тепловое поле в одной из фаз известно (температура равняется температуре фазового перехода), поэтому рассматривается тепловое поле только одной из фаз — однофазная задача Стефана, в которой граница фазового перехода S не внутренняя, а внешняя.

Рассмотрим переход от уравнений (4) и (5) с условиями (6)–(8) к одному уравнению теплопроводности. Уравнения (4) и (5) допускают запись в виде одного уравнения:

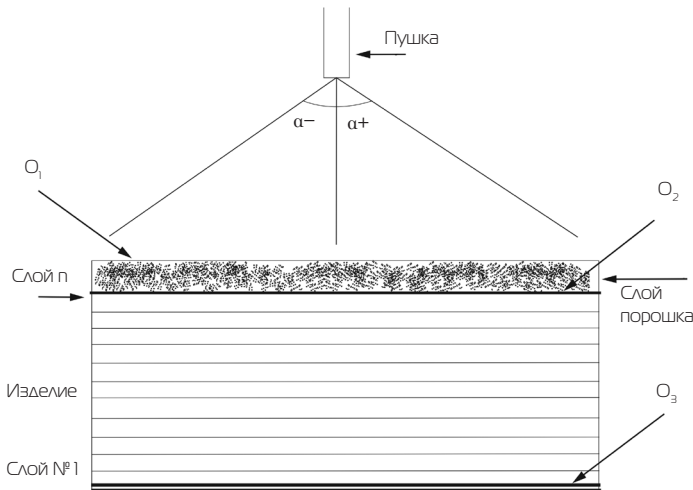
$$c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \text{grad } T \right) = \text{div}(\lambda \text{grad } T) - \delta_s L V_n + f. \quad (9)$$

Здесь c — теплоёмкость материала, λ — коэффициент теплопроводности материала, ρ — плотность материала, T — температура, f — плотность теплового источника, δ_s — поверхностная δ -функция, V_n — скорость движения границы фазового перехода по нормали, L — энтальпия фазового перехода.

Уравнение неразрывности имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{v}) = 0. \quad (10)$$

Рис. 1. Области модели процесса



Таким образом, тепло- и массоперенос описывается уравнениями (3), (9), (10) для трёх неизвестных: температуры T , вектора скорости движения жидкого металла v , давления p . Дополним систему уравнений (3), (9), (10) необходимыми граничными и начальными условиями.

На рис. 1 представлены основные области модели: O_1 — верхняя область расплавленного металла, O_2 — твёрдая поверхность формируемого изделия, O_3 — область подложки, O_4 — боковые поверхности расплавленного слоя металла. В области O_1 рассматривается неизотермическое течение сжимаемой ньютоновской жидкости, объёмная тепловая нагрузка вследствие действия электронного пучка, радиационное тепловое излучение на внешнюю стенку вакуумной камеры, в O_2 — процессы остановки движения жидкого металла к твёрдой поверхности; в O_3 — тепловая масса, моделирующая подложку; в O_4 — процессы размерной обработки по боковой поверхности синтезируемого изделия.

Граничные условия модели:

1. Скорость движения жидкого металла v области O_2 равна нулю (условие полного сплавления слоя порошка с твёрдой поверхностью подложки).

2. При расчёте теплообмена излучением необходимо учитывать потоки, попадающие на экраны, установленные в вакуумной камере установки, в областях O_1 , O_3 , O_4 . С поверхности подложки тепло теряется излучением по закону Стефана — Больцмана, т.е. имеем краевую задачу с нелинейным граничным условием:

$$\lambda \partial T / \partial n = \varepsilon_s \sigma_s (T_1^4 - T_0^4),$$

где T_0 — температура на тепловом экране, T_1 — температура на поверхности подложки, σ_s — постоянная Стефана — Больцмана ($1,38044 \cdot 10^{-23}$ Дж/град), ε_s — степень черноты, $\partial / \partial n$ — нормаль к границе поверхности.

3. В области O_1 задают граничные условия второго рода (условия Неймана), соответствующие заданию на

границе распределённого теплового потока. Для уравнения теплопроводности в изотропной среде оно записывается в виде:

$$\lambda \partial T / \partial n = q_t, \text{ где } q_t \text{ — тепловой поток.}$$

4. Уравнение свободной (верхней) поверхности $\varphi(x, y, z, t)$ жидкого металла имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \text{grad}(\bar{v}\varphi).$$

Начальные условия: свободная поверхность является плоской и известно начальное распределение скорости на ней ($v_1 = v_2 = v_3 = 0$), температура в точках свободной поверхности равна 20°C .

Перечисленные задачи нелинейные, требуют применения численных методов. Нелинейность задач обусловлена зависимостью не только тепловых физических параметров материала от температуры, но и источника тепла от времени (периодическое воздействие пучка на подложку), т.е. задачи являются нестационарными. Для их решения используются программные пакеты ANSYS APDL и ANSYS Workbench.

Расчёт формирования слоя с учётом теплоты фазового перехода

Решение задачи моделирования формирования слоя изделия позволяет определить важнейшие параметры процесса ЕВМ (скорость нагрева и охлаждения слоя порошка, время плавления и кристаллизации порошка, скорость перемещения твёрдо-жидкой границы и др.), которые определяют свойства и структуру изделия.

В качестве инструмента моделирования выбран программный комплекс ANSYS Workbench, пространственный режим 3D, режим расчёта динамический, тепловой режим неадиабатный.

При моделировании процесса формирования слоя задаются:

1. Теплофизические параметры: температура солидус T_{sol} , температура ликвидус T_{liq} , коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоёмкость c_p , плотность материала ρ , приведённая степень черноты ε_{np} , коэффициент поверхностного натяжения σ , динамическая вязкость расплава μ .

2. Параметры электронного пучка: ток I , ускоряющее напряжение U , диаметр пятна на мишени d_o , скорость сканирования V_s , шаг смещения при сканировании s .

Исходные данные математической модели: материал порошка — титан, диаметр порошка — $50 \cdot 10^{-6}$ м, высота подложки — 0,1 м, температурный интервал между температурами солидус и ликвидус — 100°C , температура солидус $T_{sol} = 1570^\circ\text{C}$, температура ликвидус $T_{liq} = 1670^\circ\text{C}$. Подложка моделируется тепловой массой со значением теплового захвата $3,4069 \cdot 10^{-2}$ Дж/ $^\circ\text{C}$.

К основным этапам нестационарного теплового анализа относятся: проектирование модели, задание граничных условий и тепловых нагрузок, решение задачи на основе уравнения теплопроводности и анализ результатов.

Процедура создания модели включает задание типа элементов, свойств материала и геометрии модели. Далее выполняется наложение сетки на модель (создание конечно-элементной модели) и задаются граничные и начальные условия. Так как в начальный момент времени температура модели совпадает с температурой окружающей среды, то в качестве начальной температуры для всех узлов модели принимают температуру окружающей среды.

В исследованиях приводится нелинейная зависимость теплопроводности титана до температуры 1300°, до температуры 1660°С. Для получения значений коэффициента теплопроводности при более высоких температурах, необходимых при моделировании процесса охлаждения частиц с учётом фазового перехода, воспользуемся полиномом 4 степени, Вт/(м К):

$$\lambda(T) = A_0 + A_1 T_1 + A_2 T_2 + A_3 T_3 + A_4 T_4.$$

Для нахождения коэффициентов A_i используем метод наименьших квадратов. В результате решения системы уравнений с 5 неизвестными имеем:

$$\lambda(T) = 22,359 - 0,0207 T_1 + 4 \cdot 10^{-5} T^2 - 3 \cdot 10^{-8} T^3 + 9 \cdot 10^{-12} T^4, \text{ Вт/(м град)}. \quad (14)$$

Функциональная зависимость плотности титана от температуры имеет следующий вид:

$$\rho(T) = 4561,506 - 0,12442 T, \text{ кг/м}^3. \quad (15)$$

Температура в формулах (14) и (15) измеряется в градусах Цельсия. Значительные изменения теплопроводности и плотности $\rho(T)$ показывают, что система дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса, описывающая формирование слоя порошка, существенно нелинейная.

Нелинейная зависимость теплопроводности, плотности и теплоёмкости титана от температуры видна на графиках. Для температур до 1100°С характерен участок с малыми значениями коэффициента теплопроводности, что соответствует высокой скорости нагрева. При более высоких температурах наступает резкое нелинейное увеличение коэффициента теплопроводности.

Значительные изменения теплопроводности $\lambda(T)$ и плотности $\rho(T)$ показывают, что система, описывающая процесс ЕВМ, существенно нелинейная.

Для расчёта динамической вязкости титана применяется следующая формула:

$$\mu = \frac{16}{15} \sqrt{\frac{m_A}{k_b T}} \sigma(T) \quad (16)$$

- μ – коэффициент динамической вязкости;
- m_A – атомная масса;
- k_b – постоянная Больцмана;
- T – температура;
- $\sigma(T)$ – коэффициент поверхностного натяжения расплава.

Коэффициент поверхностного натяжения частицы, равный работе, необходимой для увеличения поверхности жидкости на единицу площади при постоянной температуре, зависит от свойств расплава и охлаждаемой среды. При моделировании необходимо учитывать зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры.

Основные физические постоянные для титана имеют следующие значения:

- $m_A = 47,9 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 79,54 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$;
- $k_b = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$;
- $\sigma = 1,56 \text{ кг с}^{-2}$.

Тогда рассчитанный по формуле (16) коэффициент динамической вязкости титана

$$\mu = 2,843 \cdot 10^{-3} \text{ кг м}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

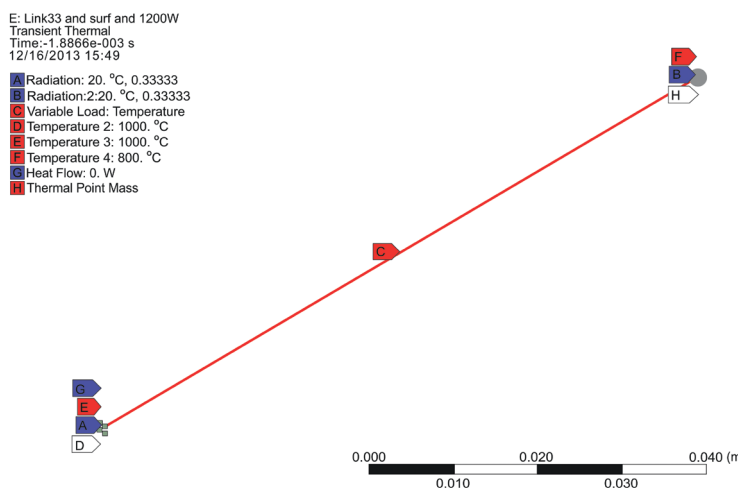
Нагрев каждой элементарной ячейки происходит за время, равное времени перемещения электронного пучка над этой ячейкой. В нашей задаче нагрев эквивалентен приложению тепловой нагрузки треугольной формы:

$$t = 2d_0/V_s.$$

Граничные и начальные условия ММ представлены графически (рис. 2):

- области A и B (верхняя и нижняя поверхности изделия) – радиационное тепловое излучение на экран вакуумной камеры;
- область C – переменная начальная температура по глубине изделия;

Рис. 2. Граничные и начальные условия модели



- область D, E – начальная температура предварительного нагрева (1000°C);
- область F – начальная температура подложки;
- область G – тепловой поток, приложенный к элементарному объёму;
- область H – точечная тепловая масса, моделирующая подложку.

Охлаждение на границах изделия – окружающая среда задаётся через лучистый теплообмен (передача тепла посредством электромагнитных волн) поверхности подложки и стенок тепловых экранов. При расчёте теплообмена излучением необходимо учитывать потоки тепла в областях, попадающих на экраны, установленные в вакуумной камере установки. С поверхности подложки тепло теряется излучением по закону Стефана – Больцмана.

В верхней области формируемого изделия задаём граничные условия второго рода (условия Неймана), соответствующие заданию на границе распределённого теплового потока. Уравнение теплопроводности в изотропной среде записывается в следующем виде:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q(t).$$

Начальные условия:

- 1) приведённая степень черноты излучательных потоков $\varepsilon_{\text{сп}} = 0,334$;
- 2) температура окружающей среды и тепловых экранов 20°C ;
- 3) распределение температуры в зависимости от координаты z : при $0 \leq z \leq 0,1 \text{ м}$ $T(z) = 800 + (z/0,1)^{0,3} 200$; при $0,1 < z < 0,10005 \text{ м}$ $T(z) = 1000$.

Типы конечных элементов, используемых в модели:

- LINK 33 – линейный элемент, моделирующий теплопроводность;
- SURF152 – поверхностный элемент (нагрузка в виде излучения).

Рассмотрим результаты моделирования процесса при диаметре пучка $d_0 = 0,6 \text{ мм}$. На элементарный объём промоделировано одно воздействие электронного пучка. Изменение температуры на поверхности порошка T_{UP} , на границе слоёв T_{GR} при воздействии электронного пучка мощностью 900 Вт представлено на графиках, где отражено влияние скрытой теплоты плавления на процессы нагрева и охлаждения (рис. 3).

При исследовании перемещения твёрдо-жидкой границы задаётся малый интегральный шаг по времени (рис. 4).

В зависимости от теплофизических характеристик материала порошка и режима обработки поверхности порошка электронным пучком граница раздела твёрдо-жидкой фазы перемещается с различной скоростью.

Модель позволяет рассчитать скорость перемещения твёрдо-жидкой границы, глубину проплавления, скорости нагрева и охлаждения материала при воздействии электронного пучка различной мощности. Таким образом, математическая модель позволяет рассчитать параметры процесса ЕВМ. ■

Рис. 3. Изменение температуры на границах слоя порошка в результате первого воздействия пучка мощностью 900 Вт (диаметр пучка 0,6 мм)

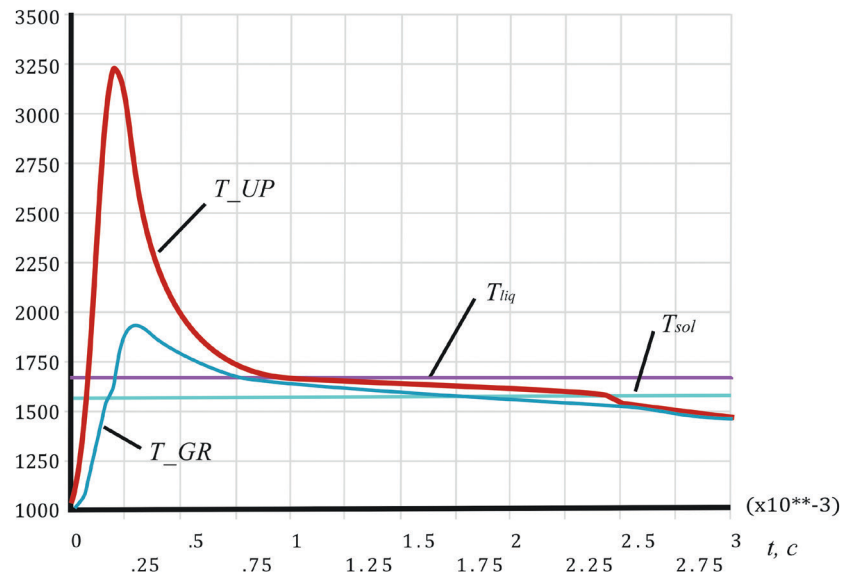
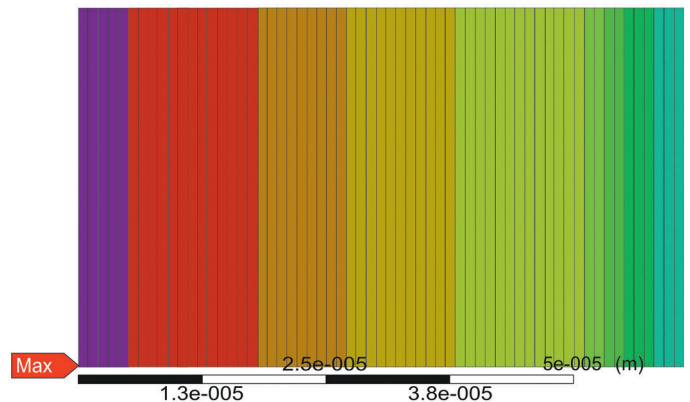
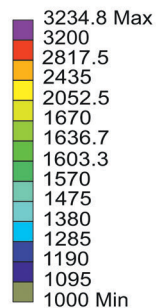


Рис. 4. Глубина фазового перехода после первого воздействия пучка диаметром 0,6 мм

D: beam D= .6mm
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 2.0161e-004
2/21/2014 08:06



rosmould

featuring **3D-TECH Area**

Международная выставка форм, пресс-форм, штампов, услуг по проектированию изделий и их контрактному производству

15 – 17 июня 2021

МВЦ «Крокус Экспо», Москва

+ Специализированный раздел выставки
Аддитивные технологии и 3D-печать

www.rosmould.ru

в сотрудничестве с



Организаторы:



messe frankfurt

mesago

Messe Frankfurt Group

01001
1010110100
1010111
1010111
0101010101
01010010011
10101010010101
0010010
1010101010
011101010
10010
01000010
10000
101011
010100110101
01010011
10101010010101
0010010
1010101010
011101010
1010010



08-10 ИЮНЯ
МОСКВА
РОССИЯ

2021

Место проведения:



ЛИТМАШ

Международная выставка литейных технологий, материалов и продукции

МЕТАЛЛУРГИЯ

Международная выставка металлургических технологий, процессов и металлопродукции



Специальная экспозиция



ТРУБЫ
РОССИЯ
2021

12+

NI
в мире



При поддержке
The Bright World of Metals

www.metallurgy-russia.ru
www.litmash-russia.ru

Металл-Экспо
Тел.: +7 (495) 734-99-66

Messe Düsseldorf GmbH
Тел.: +49 (0) 2 11/45 60-77 93



МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-
МОРСКОЙ
САЛОН



INTERNATIONAL
MARITIME
DEFENCE
SHOW

Организатор:



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ

При участии:



Министерство
обороны



Министерство
иностраных
дел



Федеральная служба
по военно-техническому
сотрудничеству



Администрация
Санкт-Петербурга



РОСБОРОНЭКСПОРТ

Устроитель:



ООО «Морской Салон»
www.navalshow.ru

IMDS
2021

23-27 июня

РОССИЯ

Санкт-Петербург

“Через сотрудничество – к миру и прогрессу!”

★ ARMY 2021

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ



* ФРЕГАТ «АДМИРАЛ ФЛОТА
СОВЕТСКОГО СОЮЗА ГОРШКОВ»

22–28 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО

WWW.RUSARMYEXPO.RU

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ
ОПЕРАТОР



МКВ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ