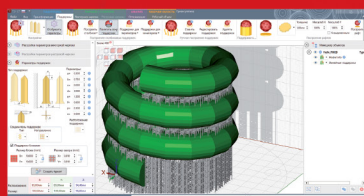


Профессиональный слайсер (САМ-программное обеспечение) для технологической подготовки аддитивных производств

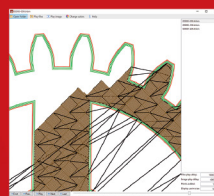
Triangulatica®



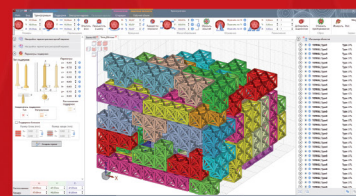
Автоматические поддержки



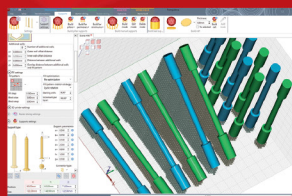
Поддержки блоками и зонами



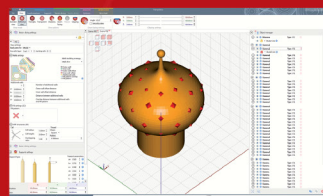
Штриховки слоя



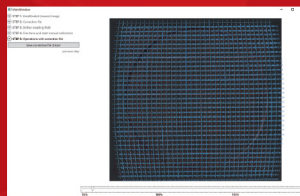
Упаковка объектов



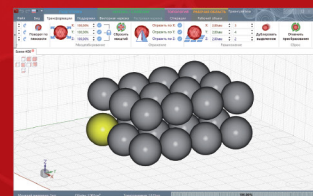
Разные стратегии на одной сцене



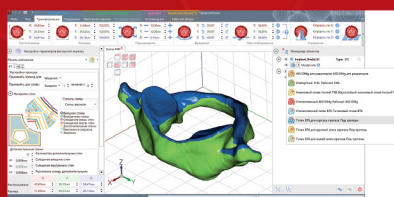
Импорт CAD-форматов



Таблицы и маски коррекции



Массивы



Генерация сеток для медицины



Подготовка серийных заданий

Входит в Реестр отечественного ПО Минцифры РФ
Запись: №15015 от 26.09.2022г

triangulatica.com/ru

t.me/triangulatica



Аддитивные технологии в CAD/CAM/CAPP ADEM-VX

18



Быстрый металл аддитивных технологических комплексов

28



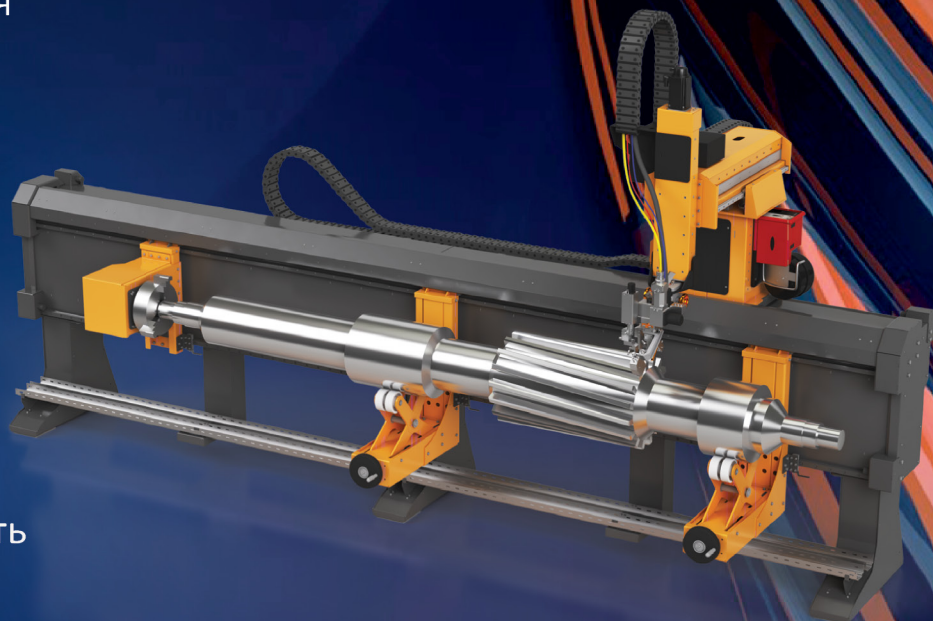
Прямое лазерное выращивание металлокерамических покрытий

40

ПОЛНОСТЬЮ УНИВЕРСАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ FL-CPM



FL-CPM – это универсальная многоосевая система станочного типа для обработки деталей – тел вращения. **Модульная конструкция** координатной системы и **широкий выбор** съемных навесных элементов крепления заготовок дают возможность создать Вашу **уникальную конфигурацию станка**.



ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР IPG ПОЗВОЛЯЕТ СОКРАТИТЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РАСХОДЫ

СВАРКА. Экономия времени и электроэнергии: скорость лазерной сварки 1–10 м/мин, сварной шов не требует дополнительной обработки, зона термического влияния лазерной сварки не более 0.5 мм, возможность полной автоматизации. Эффективность и гибкость в использовании: наименьший размер сварного шва и зоны термического влияния, высокая повторяемость процесса, быстрая перенастройка при переходе на изготовление нового изделия.

НАПЛАВКА. Высокий коэффициент использования материала: в случае наплавки проволокой – 100% (до 90% при наплавке порошком). Локальная обработка поверхности, минимальная постобработка, стабильная высота наплавляющего слоя, минимальное перемешивание основного и наплавляемого материалов. Отсутствие деформации изделия в процессе обработки.

ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕ. Локальный нагрев поверхности – термообработка не всей детали, а ее локальных участков, подверженных износу. Быстрый термический цикл: высокая скорость нагрева и охлаждения обрабатываемых поверхностей – уменьшение размера зерна материала. Высокая твердость поверхности и однородность структуры. Твердость обрабатываемых изделий/участков повышается более чем в 2 раза (толщина слоя 0.5–1.8 мм). Деформация при лазерном термоупрочнении более чем на порядок меньше, чем при термоупрочнении традиционными способами.

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

+7 (495) 477-72-77; sales@ntoire-polus.ru

www.fl-cpm.ru





8



20



24

СОДЕРЖАНИЕ

- 2** Московский цифровой завод
- 4** WOW-эффект и ответственность должны идти рядом
- 7** INTAMSYS – 3D-принтеры для решения промышленных задач
- 8** Технология печати Metal Binder Jetting (MBJ): внедрение в производство и возможности для изготовления деталей
- 12** Российский рынок программного обеспечения для аддитивного производства
- 18** Аддитивные технологии в CAD/CAM/CAPP ADEM-VX
- 20** Реверс-инжиниринг деталей спортивного оружия с применением 3D-печати
- 24** Электрические свойства СБС-пластика после 3D-печати по экструзионной технологии
- 28** Быстрый металл аддитивных технологических комплексов
- 37** Эффективные кейсы для авиаиндустрии
- 40** Прямое лазерное выращивание металлокерамических покрытий



Издатель ООО «ПРОМЕДИА»

директор О. Фалина

главный редактор
М. Копытина

отдел редакции:
Т. Карпова, Э. Сашкая
С. Куликова

консультант:
Н.М. Максимов
nikamax@gmail.com

отдел рекламы
т/ф (499) 55-9999-8

АДРЕС: 107140, г. Москва,
ул. Верхняя Красносельская,
д. 17А, стр. 1Б, офис 306-1
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.



Московский цифровой завод

3 августа 2023 года состоялось официальное открытие Московского цифрового завода (МЦЗ). Проект компании «НПО «ЗД-Интеграция» (i3D) был реализован при поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации с целью развития инновационных технологий в Москве.

МЦЗ представляет собой промышленную площадку для разработки отечественных технологий аддитивного производства и локализации зарубежных, выполнения работ по импортозамещению, обратному проектированию и промышленной 3D-печати. МЦЗ оснащен инновационными 3D-принтерами, которые применяются в промышленной 3D-печати с использованием различных материалов, таких как полимеры, металлы, керамика и композиты. По словам генерального директора ООО «НПО «ЗД-Интеграция» Михаила Родина, в настоящее время МЦЗ размещается на площади в 1300 кв. м, а к 2025 г. компания планирует инвестировать 400 000 000 руб. для расширения производственных площадей до 3000 кв. м.

В рамках МЦЗ реализуются проекты:

- **AM.TECH** — выполняет задачи производства и конструкторского бюро, связанные с разработкой

отечественных и локализацией зарубежных промышленных 3D-принтеров;

- **FHZL RUS** — российско-китайское предприятие по локализации сборки песчаных 3D-принтеров для российского рынка;

- **СПИН** — аддитивное производство полного цикла с оказанием услуг 3D-печати по различным инновационным технологиям, услуг автоматизированного контроля и обратного инжиниринга с использованием метрологических 3D-сканеров и КИМ.

Кроме того, на территории МЦЗ планируется проведение образовательных проектов, форумов, семинаров и научных конференций.

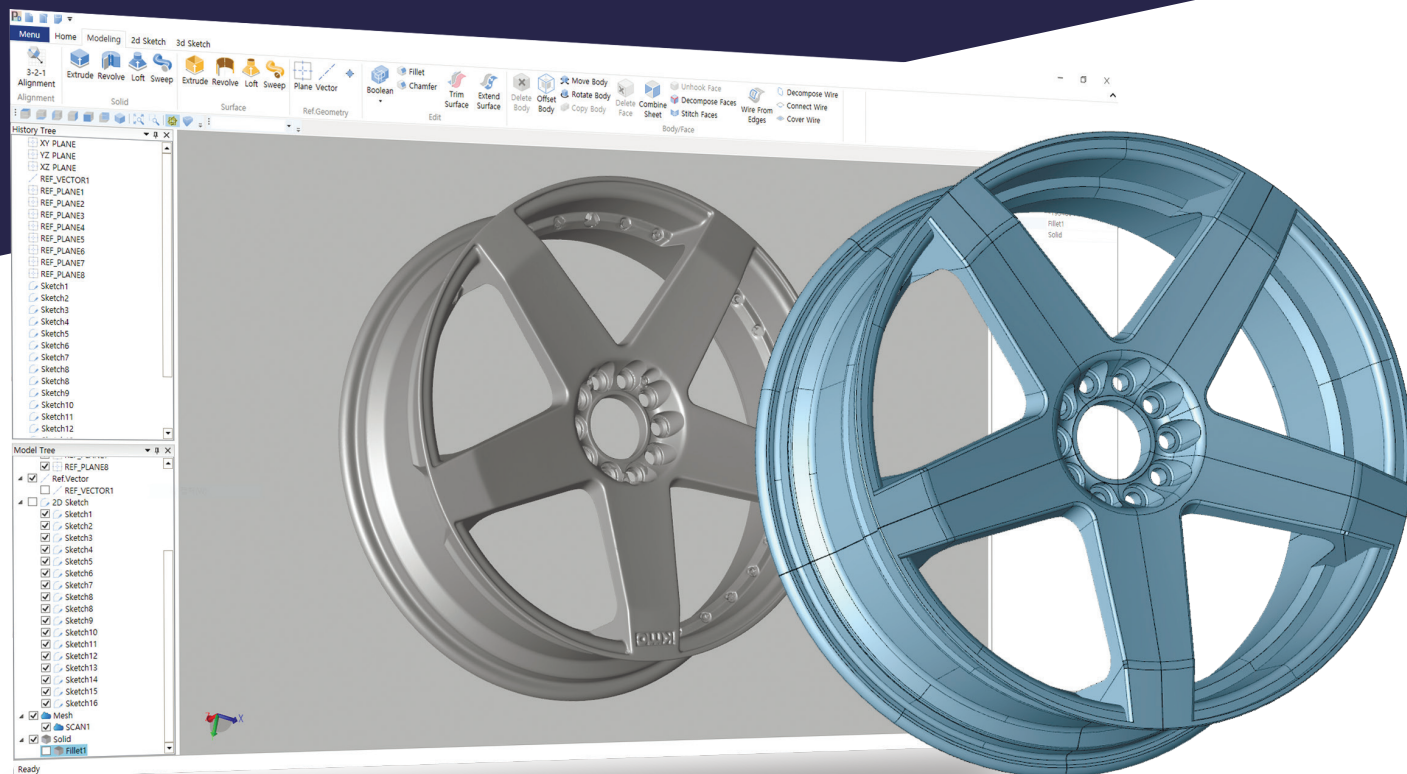
В церемонии открытия завода приняли участие руководители профильного Департамента Минпромторга России, Департамента предпринимательства и инновационного развития Москвы, ректоры ведущих ВУЗов, руководители ассоциаций и специалисты лидирующих российских и зарубежных предприятий в сфере аддитивных технологий. В завершение мероприятия состоялись доклады, посвящённые 3D-печати и метрологии, а также обзорная экскурсия по МЦЗ.

<https://i3d.ru>



PointShare™

Программное обеспечение для обратного проектирования и контроля геометрии



**Хотите стать дилером или получить бесплатную демолицензию на 14 дней? Обращайтесь!
Мы открыты к сотрудничеству!**

ООО «Инспект» — официальный дистрибьютор программного обеспечения PointShare на территории Российской Федерации.



Инспект

ООО «Инспект»

Москва, ул. Золотая, 11, офис 4Б13а

Тел.: +7 (925) 682-19-87

info@inspectus.ru

www.pointshape.online

www.inspect-tech.ru

WOW-эффект и ответственность должны идти рядом

Зинаида Сацкая



Сегодня гость редакции журнала «Аддитивные технологии» — Денис Власов, генеральный директор ООО «ТРИАНГУЛЯТИКА». Он поделился с нами не только рассказом о работе над своим продуктом, но и интересными наблюдениями за процессами, происходящими на рынке.

Когда мы с вами в мае встретились на «Металлообработке», вы закрывали сделку по продаже вашей ТРИАНГУЛЯТИКИ в Индию. А как в принципе вы оцениваете экспортный потенциал вашего программного обеспечения?

Очень высоко оцениваю.

На 700 запросов «ТРИАНГУЛЯТИКИ» из России приходится 3000 заходов на наш сайт из Китая (рис. 1). Сейчас у нас идут переговоры об очень серьезной совместной работе в сфере аддитивных технологий на китайском рынке. Должен сказать, что мощный интерес из Китая возник сразу после «Металлообработки».

Наверняка вы получаете обратную связь от ваших зарубежных потребителей. Было ли это импульсом к каким-то изменениям в продукте?

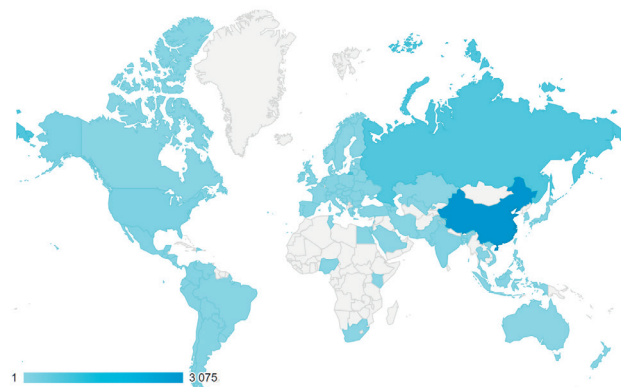
Да. В частности, от индийских партнеров мы получили очень интересные, и я бы даже сказал, краси-

вые соображения по поводу usability, то есть удобства использования. Но в первую очередь мы работаем по идеям отечественных клиентов. Например, сейчас мы выпустили релиз с хорошими идеями, которые мы реализовали по просьбе специалистов ДВФУ. Особенно нам хочется оправдать доверие тех, кто купил или пробует «ТРИАНГУЛЯТИКУ». Я не могу называть имена наших партнеров-покупателей, но в конце весны у нас были сделки с условием, что мы добавим в софт определенный функционал. Мы сделали, и клиенты остались очень довольны. А сейчас проходит тестирование новый релиз с очень интересным функционалом — нестингом (рис. 2), расширением поддержки технологий печати песчаных форм, биндер-джеттингом, печатью проволокой.

Вы назвали некую статистику — на 700 запросов из России приходится 3000 запросов из Китая. Чем это объясняется? Тем, что население Китая больше, или их бизнес-любопытство выше?

Я по поводу этой статистики пообщался с нашими аналитиками. Эксперт высочайшего уровня Дмитрий Трубашевский, например, высказал предположение, что «ТРИАНГУЛЯТИКА» могла стать для компаний из Китая «информационным поводом» после того, как мой стенд на «Металлообработке» посетили высокие

Рис. 1. Визуализация географии посещаемости сайта *Triangulatica.com* за июнь 2023 г.

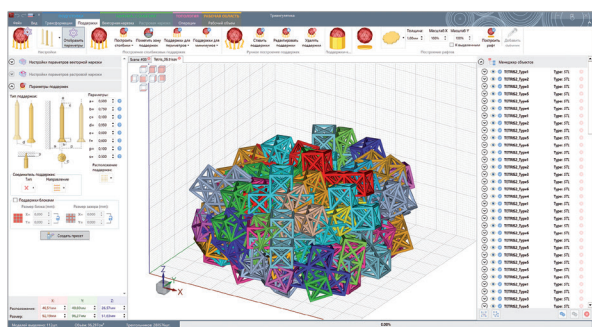


китайские гости. После них на стенд пришли китайские аналитики, чтобы понять, чем заинтересовались высокие гости, и дальше информация пошла на китайский рынок. Это первая версия. Вторая версия заключается в том, что есть какие-то проблемы у игроков китайского рынка, связанная с тем, что они очень хорошо делают «железо», очень хорошо его копируют друг у друга и у мировых игроков, но это «железо» не подкреплено софтом. Третья версия, которую я тоже рассматриваю, заключается в том, что компании хотят «отличаться». Есть шутка о том, что «кольт» сделал всех равными. Вот Materialise Magics тоже уравнивал всех игроков рынка — у всех одинаковые функции, и я допускаю, что кто-то хочет сделать стратегический шаг, получить какие-то функции и возможности, которых нет у конкурентов. Какую версию считать самой вероятной, я пока не знаю, но то, что к нам пошло много обращений с китайского рынка, это факт. В результате мне пришлось оживить себе WeChat с очень авторитетными деятелями мирового рынка из Китая, и мы лично обсуждаем сейчас вопросы сотрудничества. Видимо, какие-то интересы в аддитивном производстве у них есть, которые мы можем удовлетворить, но которые пока не можем определенно выявить, потому что «яркий» клиент — как правило, закрытый клиент. У китайских компаний есть серьезные разработки, у них всё хорошо, но это очень напоминает нашу научную работу начала 2000-х. Те первые математики, которые начали работать на аддитивку, собрали большую алгоритмическую базу, решили большое количество вычислительных задач, но это не был продукт, это были разрозненные кусочки. И у нас в стране я видел решения, представляющие собой набор лабораторных работ, которые продуктом не являются и продуктом быть не могут именно потому, что это отдельные разработки.

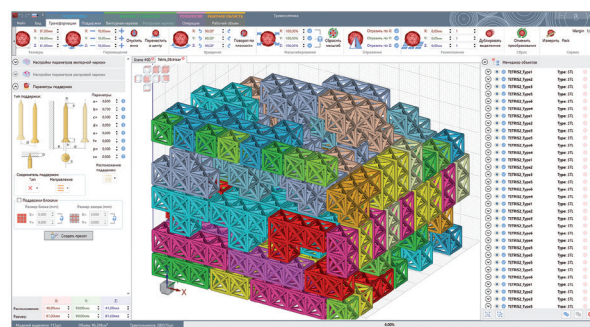
Индия, Китай, в какую сторону еще смотрите?

Сейчас наш софт тестируют в Иране. Продолжаем многолетнюю работу с компаниями из Болгарии.

Рис. 2. Иллюстрация новой функции нестинга




Triangulatica®
 УПАКОВКА ОБЪЕКТОВ
 (NESTING)

Интерес растет, и это многообещающее ожидание приятно. А как при этом выглядит динамика продаж?

Летом было затишье, но я думаю, у нас будет очень хорошая ситуация осенью. У нас существует традиционная цикличность: софт покупают осенью и зимой, перед новым годом. Контракты на оборудование обычно проходят длительное время, а софт — это быстрые сделки, и многие предприятия просто отодвигают задачу обновления софта на то время, когда будут решены все вопросы с оборудованием. Я это наблюдаю уже несколько лет. С сентября начинается бум, который превращается в очень активный рост в октябре-декабре, а декабрь вообще невозможно описать. Это нормально, сезонность в бизнесе — не новость. Есть и методы борьбы с сезонностью, но для этого пул клиентов должен быть очень большим. Хорошие подвижки у нас также с САД-системами.

Какое-то время назад вы начали налаживать отношения с «Асконом». Как развиваются эти отношения?

С «Асконом» мы провели ряд больших тренингов, обсуждали вопросы интеграции. Возможно, на предстоящем «Технофоруме» вы увидите плоды подготовки нашего сотрудничества. Чтобы встать рядом с такой большой организацией, войти в их структуру, в их логику, вертикаль программных продуктов, надо основательно и долго потрудиться. Очень хорошо, что диалоги идут, мы собираемся большими группами и прорабатываем большие решения.

«ТРИАНГУЛЯТИКА» — ваше детище, которое, как любому родителю, кажется самым умным и красивым. Тем не менее вы видите сегодня какие-то направления развития, которые сделают ваш софт еще более умным и юзабельным.

Определенно да. Вот сейчас мы с вами разговариваем, а вотсап без конца сигнализирует мне о новых

сообщениях. Это мои разработчики сейчас тестируют нечто, что должно понравиться и быть полезным очень многим в нашей стране и за рубежом. Это два направления. Первое — наша работа над тем, чтобы в ближайшей версии «ТРИАНГУЛЯТИКА» уже работала под российским Astra Linux, то есть мы будем работать не только на платформе Windows. И второе направление разрабатывается в русле тренда последних лет, я имею в виду искусственный интеллект. У нас были эксперименты с разными «штучками», которые построены на искусственном интеллекте, и пришло время начать показывать то, что уже сегодня можно делать. В первую очередь мы будем показывать наши решения, которые позволяют делать анализ установки поддержек, создавать переходные сетчатые структуры внутри объектов, и дальше будут присоединяться новые возможности, которые можно просчитывать благодаря использованию искусственного интеллекта. Это пока первые шаги, но это то, что надо обязательно делать, чтобы отличаться. То, что мы сделали, еще не выставлено в наши релизы, но когда видят это решение, говорят: wow! Правда, надо понимать, что когда с вами работают производственные компании, это должно звучать, как «Wow! Это сработало!», а не «Wow! Это почти сработало» или «Wow! Это сработало только один раз, а второй уже нет». Прелесть искусственного интеллекта в том, что, основываясь на каких-то предыдущих знаниях и опыте, мы должны сделать предположение, что мы можем в данном случае сделать так-то и так-то с моделью, с поддержками и так далее. А для этого надо набрать базу, причем разную. У нас искусственный интеллект закладывался в «ТРИАНГУЛЯТИКУ» с самого начала, но мы не смогли найти юридические основы для его внедрения. То есть у нас была идея базы данных, которая содержит настройки под каждый порошок, под каждый полимер и так далее. И мы хотели, что называется, сделать мир лучше — собирать неперсонализированные дан-

ные о том, что, например, эти настройки сработались с этой машиной, с этим материалом и тому подобное. Мы хотели собирать вероятности того, какие профили оборудования используются, имея в виду, что какой дольше используется, у того больше работоспособность. И на основании этих данных предлагать людям какие-то настройки. Но мы не смогли найти юридически чистого способа собирать эти данные, потому как всё, что касается больших данных, неперсонализированных данных — это очень серьезная юридическая ответственность. Более того, эта юридическая ответственность разная в разных странах. Поэтому у нас просто сейчас на локальной машине собираются данные о настройках и материалах, но это не используется нигде. Мы не видим этой аналитики в наших данных, это просто находится на компьютере пользователя. Возможно, когда мы нащупаем юридические основания для использования этой идеи и в мире будет много «ТРИАНГУЛЯТИК», то принтеры будут самонастраивающимися. То есть сказали «ТРИАНГУЛЯТИКЕ», что мы взяли материал от этого производителя сырья, этот принтер, указали желаемое качество, и она под конкретную модель сама сделала настройки и сама поставила поддержки. Что-то типа волшебной кнопки «Сделать хорошо». Вот это великое светлое будущее, но оно должно быть подкреплено либо большими массивами информации, которую анализирует искусственный интеллект, либо научно подтвержденными фактами, которые четко описывают и принтер, и положение, и яркость и всё-всё-всё.

Вы глубоко погрузились в развитие своей «ТРИАНГУЛЯТИКИ», но весной вы обронили слова о том, что сделаете новый принтер. Сделаете? И остается ли время на новый принтер?

Да, и вы скоро увидите принтер, который снова заставит звучать 3DSLА громко.



INTAMSYS — 3D-принтеры для решения промышленных задач

Вопрос качественного замещения высокотехнологического оборудования западных брендов, покинувших Россию из-за санкций, остаётся в повестке дня большинства отечественных производителей. В этой связи вполне объясним интерес, который проявляют отечественные бизнесмены к продукции из Китая.

Преимущества аддитивного оборудования INTAMSYS (**INTelligent Additive Manufacturing SYSTEMS**) обсуждались на выездном семинаре в технопарке «Кунцево», инициатором проведения которого стал российский партнёр INTAMSYS — компания Z-axis.

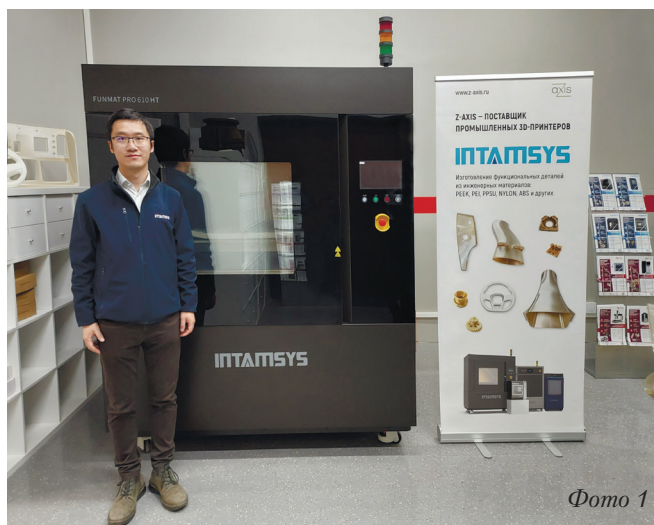


Фото 1

Выступивший с развёрнутым докладом представитель INTAMSYS господин Хао Янг (фото 1, демонстрационный зал компании Z-axis в Москве) подробно рассказал о пути компании от небольшого предприятия до международной структуры со штаб-квартирой в Шанхае и отделениями в Штутгарте (Германия) и Миннеаполисе (США).

Первоначально в 2016 году INTAMSYS начала своё развитие как инвестиционный проект Sequola Capital (China), Forebright (China) и ряда других фондов и мировых автопроизводителей. Стратегическая кооперация с ведущими автопроизводителями активно продолжается до сих пор в нескольких направлениях: проверка материалов, печать тестовых деталей, замена традиционного производственного процесса аддитивным производством. Кроме того, совместно с рядом компаний проводятся научные исследования и разработки, выполняются успешные бизнес-кейсы по внедрению цифровизации производства. Отдельно выделяется направление по внедрению 3D-печати в сфере послепродажного обслуживания автомобилей.

Компании INTAMSYS принадлежит инновационное лидерство в сфере FFF-технологии. Так, достижения в производстве устройств высокой производительности позволяют INTAMSYS позиционировать себя в качестве глобального бренда в сфере производства и поставок 3D-принтеров, работающих с полиэфирэфиркетон (ПЭЭК, PEEK, ULTEM) — специальным полимером, способным, например, в производстве авиационных деталей или имплантатов заменять металлы.

На данный момент в мире уже установлено около трех тысяч 3D-принтеров производства INTAMSYS. Сегодня линейка оборудования представлена высокотемпературными, высокоточными моделями с минимальной толщиной печатного слоя в 50 мкм. FUNMAT HT (фото 2) — доступный высокопроизводительный 3D-принтер с зоной построения 260×260×260 мм. FUNMAT PRO 310 (новинка, презентация состоялась на выставке Formnext 2022) с двойным экструдером (фото 3) и зоной построения 305×260×260 мм, который сочетает в себе габариты настольного 3D-принтера и качество печати промышленного уровня.

FUNMAT PRO 610 HT (фото 4) — промышленный высокопроизводительный принтер с рабочей камерой 610×508×508 мм, с режимом печати до 300°C идеально подходит для печати крупногабаритных изделий любыми инженерными материалами. Промышленный 3D-принтер FUNMAT PRO 410 (фото 5) с камерой построения 305×305×406 мм благодаря заложенным интеллектуальным функциям прост в настройке и использовании, обеспечивает более плавные и устойчивые режимы печати.



Фото 2

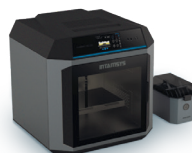


Фото 3



Фото 5

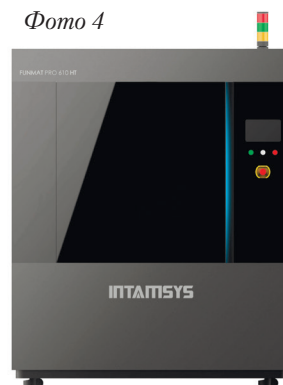


Фото 4

С 2019 года INTAMSYS TECHNOLOGIES поставляет своё оборудование в Россию и СНГ через российского партнёра — компанию Z-axis.



Технология печати Metal Binder Jetting (MBJ): внедрение в производство и возможности для изготовления деталей



Автор: Казакевич Георгий Владимирович, руководитель направления 3D-печати металлом и керамикой компании ООО «НПО «3D-Интеграция»

Соавтор: Петрова Татьяна Валерьевна, руководитель отдела маркетинга компании ООО «НПО «3D-Интеграция»

Современные технологии 3D-печати стали широко распространенными в различных промышленных секторах, а одной из самых востребованных разработок в этой области является Metal Binder Jetting (MBJ). Эта технология позволяет производить металлические детали с высокой точностью и скоростью, что делает ее привлекательной для множества отраслей. В данной статье мы рассмотрим преимущества и возможности внедрения технологии Metal Binder Jetting в производство, а также несколько примеров деталей, которые можно изготавливать с ее помощью.

На большинстве предприятий нестандартные детали обычно изготавливаются на станках с ЧПУ или отливаются, и оба процесса могут быть дорогими и трудоемкими. Ограниченные ресурсы механического цеха и единовременные затраты на разработку для создания нестандартных зажимных приспособлений (оснастки), а также создание литейной оснастки и литейных форм приводят к значительным дополнительным финансовым затратам и увеличению времени выполнения заказа. Эти производственные задержки, вызванные традиционными методами, означают, что инновации подавляются, поскольку количество итераций может значительно увеличить циклы разработки продукта, тем самым замедляя выход новых продуктов и решений на рынок.

Еще очень важная задача, что для оборудования, уже находящегося в эксплуатации, необходимы запасные части по требованию, чтобы линии продолжали работать по мере износа компонентов. Компании должны иметь возможность быстро производить запасные части, чтобы восстановить работоспособность оборудования, сохраняя при этом низкие затраты на каждую деталь и избегая складских затрат. Ведь поломка даже одного

станка может остановить выпуск продукции из-за его важности в производственном процессе.

Аддитивное производство значительно упрощает процесс создания нестандартных деталей. Поскольку 3D-печать из цифрового файла не зависит от инструментов или приспособлений, она позволяет пользователям создавать детали слой за слоем быстрее и с меньшими затратами, чем механическая обработка или литье. На примере технологии MBJ мы рассмотрим, как же это сделать.

Распишем поэтапно сам процесс получения деталей по технологии MBJ:

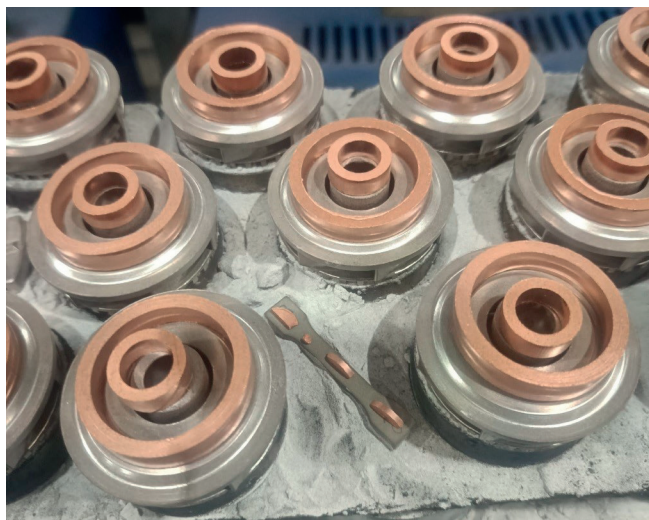
1. Самый трудоемкий процесс — это, конечно, моделирование самой детали в специальной САПР-программе, где надо учесть много различных факторов, таких как нагрузка, износ, температурные условия и прочее. Также важно учесть требования к подвижным соединениям, стыкам и другим функциональным аспектам детали. Однако не стоит забывать, что аддитивные технологии дают конструкторам широкую свободу по созданию дизайна деталей. Возможно применение так называемую топологической оптимизации, это позволяет создавать эффективные детали, узлы и агрегаты с улучшенными экономическими и эксплуатационными характеристиками.

2. Затем в ПО принтера модель разбивается на тонкие слои и задаются настройки печати.

3. После этого начинается уже сам процесс печати. 3D-принтер наносит связующее вещество на порошок-вый слой, печатая каждый слой по очереди. Таким образом постепенно формируется трехмерная деталь внутри массива порошка.

4. Но это еще не все. После завершения печати деталь проходит через процесс сушки. Связующее вещество, нанесенное на порошковые слои, становится твердым и образует связи между частицами порошка. После сушки деталь нужно отделить (продуть) от не-

Фото 1. Рабочее колесо погружного насоса до спекания с медью в качестве инфильтрата



использованного порошка, после этого мы получаем «зеленую» деталь. Весь неиспользованный порошок возвращается в 3D-принтер и может быть снова использован для следующей печати.

5. Далее идет процесс спекания и усадки «зеленой» детали в вакуумной печи с использованием керамической обсыпки. А уже после спекания деталь готова.

Также есть дополнительная стадия, но она используется не всегда. Это инфильтрация. Позволяет уменьшить усадку до 0,5% вместо 12--17% при спекании «зеленых» деталей без использования дополнительных сплавов (инфильтратов).

Оба варианта применимы, но какой вариант выбрать, зависит от конкретной задачи и требований к получаемым деталям.

К примеру, если вам нужны прогнозируемые физико-механические свойства, которые дает моносплав из выбранного вами материала, то использование инфильтрата не нужно.

Инфильтрация же позволяет сократить техпроцесс спекания и упростить его. Однако мы получим деталь из нескольких сплавов, что определенным образом скажется на ее свойствах.

MBJ также имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами изготовления деталей из металла.

Быстрота. Metal Binder Jetting позволяет сократить время изготовления деталей по сравнению с традиционными методами производства металлических деталей. Печать детали занимает гораздо меньше времени, чем традиционные методы литья или фрезерования, что позволяет сократить время производства и увеличить пропускную способность производственной линии.

Высокая точность. Технология Metal Binder Jetting обеспечивает высокую точность и детализацию при изготовлении деталей. Это позволяет получать сложные

формы и геометрию, которые сложно или невозможно получить с использованием традиционных методов производства. Это открывает новые возможности для создания инновационных продуктов и улучшает дизайн изделий.

Экономическая эффективность. Использование широко распространенных MIM-порошков (металлических порошков) позволяет сократить расходы на производство. Это делает эту технологию универсальной и адаптивной к различным требованиям и потребностям производства.

Список деталей, которые можно изготавливать по технологии Metal Binder Jetting, включает в себя, но не ограничивается следующими:

- Прототипы и производственные детали для машиностроительной отрасли: компоненты двигателей, корпуса, оси, шестерни и так далее.
- Инструменты и приспособления: приспособления для фиксации, пресс-формы, насадки и другие инструментальные элементы.
- Ювелирные изделия и аксессуары: кольца, цепочки, брошки и другие предметы ювелирного искусства.
- Медицинские имплантаты и ортопедические изделия: зубные протезы, импланты кости, фиксаторы и другие медицинские приспособления.
- Детали для авиационной и автомобильной промышленности: турбины, корпуса двигателей, тормозные диски и другие компоненты.

[На примерах разберем плюсы данного метода](#)

[Свобода проектирования и объединение сборок деталей](#)

Послойное построение деталей устраняет многие производственные ограничения традиционных методов производства и технологий. Эта свобода проектирования позволяет вносить новшества в дизайн деталей для оптимизации производительности или повышения эффективности производства. Внутренние каналы могут быть встроены для охлаждающих жидкостей или деталей, а также могут быть органически спроектированы для снижения веса.

Фото 2. Роликовый винт, уменьшенный с семи частей до одной после объединения конструкции для аддитивного производства



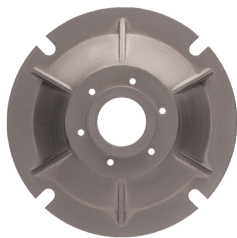
Для упрощения изготовления оборудования многие узлы изготавливаются из простых в изготовлении деталей, скрепленных между собой крепежными элементами или сваренных. Однако аддитивное производство позволяет объединять несколько деталей в единую сборку и изготавливать их как одну деталь, снижая затраты

и повышая эффективность. Не требуется крепеж или операция сварки/пайки, меньше вероятность брака во время сборочных операций. Роликовый винт, показанный ниже, используется в линейном приводе для открытия и закрытия пилотного клапана на паровой электростанции. Хотя данный узел обычно изготавливается из семи частей, аддитивные технологии позволяют объединить сборку в один компонент.

Функциональное прототипирование и мелкосерийное производство

Такие методы производства, как литье,ковка и литье под давлением, идеально подходят для массового производства, но высокая стоимость и длительные сроки изготовления делают их плохим выбором для прототипирования или мелкосерийного производства. Металлические 3D-печатные детали достигают того же качества, что и детали, изготовленные методами массового производства, без необходимости использования инструментов, что значительно экономит время и деньги. Поскольку аддитивное производство минимизирует необходимость в инструментальной обработке, детали можно легко и быстро распечатать, протестировать и распечатать новые варианты по мере необходимости.

Фото 3. Крепежный фланец червячного редуктора напечатан для функционального тестирования

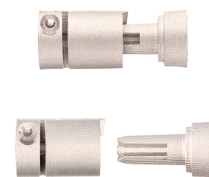


Передний фланец червячного редуктора позволяет подключать двигатели разных размеров. Когда редуктор пойдет в массовое производство, фланец будет отлит и обработан несколькими операциями механической обработки. Путем прототипирования металлических 3D-печатей фланец быстро изготавливается и функционально тестируется в условиях высокой нагрузки, чтобы определить конструкцию с оптимальными характеристиками без высоких инвестиционных затрат на создание литейной формы и шаблона для каждой итерации.

Еще один немаловажный фактор в пользу инноваций — сокращение цикла разработки для более быстрого выхода на рынок

Разработка продукта требует времени и денег, а 3D-печать металлом помогает дизайнерам и конструкторам быстро подстраиваться под тенденции рынка. 3D-печать поддерживает стратегию децентрализованного производства, предлагая организацию производства ближе к конечному пользователю с более локализованной цепочкой поставок. Создание из цифрового файла без стороннего инструментария за границей или

Фото 4. Индивидуальная конструкция/дизайн муфты быстро утвержден и испытан без инвестиций в дополнительные обрабатывающие инструменты



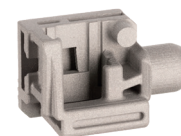
настройки сложных программ обработки на станках с ЧПУ означает, что продукты тестируются с гораздо большей эффективностью и скоростью.

Специальная муфта, представленная ниже, передает мощность между двумя вращающимися компонентами. Ее сложные детали трудно обрабатывать, но их легко изготовить с помощью 3D-печати металлом. Распечатав эту деталь, конструктор смог создать несколько функциональных прототипов буквально на своем рабочем месте, что позволило протестировать различные конструкции всего за одну неделю. Одна деталь с оптимальной геометрией была быстро выбрана для адаптации и подготовке к серийному производству. Значительно ускоренный цикл разработки и низкая себестоимость, обеспечиваемые итерациями 3D-печати, позволили решению быстрее выйти на рынок.

Контрактное производство и запасные части

Металлическая 3D-печать обеспечивает гибкость производства с возможностью контрактного производства качественных запасных частей или вариантов конструкции/дизайна на одном и том же станке без инвестиций в инструменты или времени на настройку. Аддитивное производство дает разработчикам больше свободы и возможность сосредоточиться на производительности, пространстве и материалах для конкретного применения, а не на технологичности, а затем хранить эти проекты в цифровой базе данных для производства запасных частей по мере необходимости без складских затрат.

Фото 5. Держатель датчиков, напечатанный на 3D-принтере



Показанный ниже держатель датчика используется для крепления нескольких датчиков во время проведения измерений на работающей машине. Сложная геометрия и требуемый объем делают его идеальным кандидатом для 3D-печати металлом. Деталь была напечатана на 3D-принтере, что значительно сократило как время производства, так и стоимость детали, а любые изменения в конструкцию можно внести, просто загрузив новый файл задания/геометрии для печати.

Внедрение технологии МВЖ в производство открывает широкие возможности для изготовления различных металлических деталей. С учетом растущего спроса на инновационные технологии производства Metal Binder Jetting представляет большой потенциал для развития

Фото 6. Рабочее колесо погружного насоса

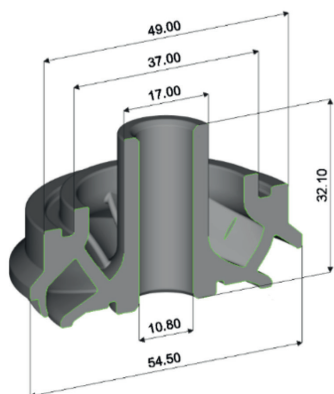
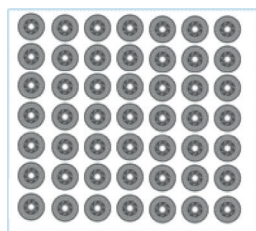
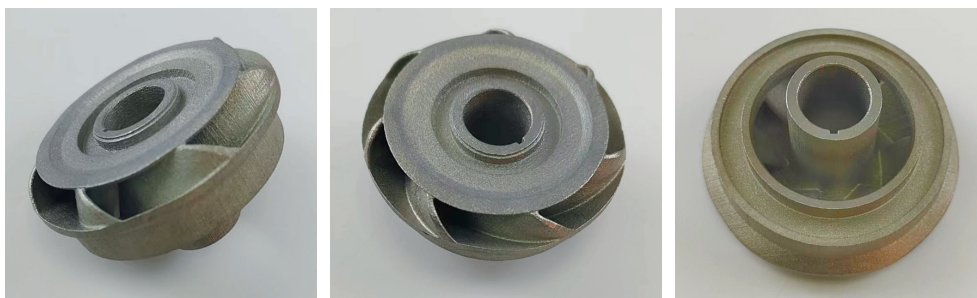


Фото 7. Наглядное количество деталей в камере

Фото 8. Рабочее колесо погружного насоса после спекания



в ближайшие годы. Быстрое, точное и эффективное производство высококачественных металлических деталей делает эту технологию незаменимой для многих предприятий. С ее помощью можно перейти на новый уровень разработки продукции и повысить конкурентоспособность на рынке.

Например, в машину AM.TECH MBJ-500 PRO с рабочей камерой 500×450×400 мм может без проблем поместиться 49 заготовок рабочего колеса погружного насоса с диаметром 54,5 мм. При этом их печать займет 618 минут (10,3 часа). Спекание займет еще 12,5 часов, и еще 2,5 часа на остывание в печи.

После этого эта полностью готовая деталь может быть использована по назначению в погружном насосе.

Общее время изготовления 49 деталей составляет 25,3 часа.

Нужно понимать, что печать идет без присутствия на рабочем месте инженера, что освобождает его для других задач, которые он может выполнять параллельно.

Заключение

Если на вашем производстве не хватает такого оборудования для оптимизации производства, то компания ООО «НПО «ЗД-Интеграция» готова помочь вам подобрать подходящее оборудование для решения ваших задач и обеспечить его пусконаладку.

Сайт: i3d.ru

Тел.: +7 (495) 108 60 68

Почта: 3d@i3d.ru

INDUSTRY3D
аддитивные технологии и 3D-решения

Москва, Дмитровское шоссе, 9
(1С:Учебный центр №1)

Форум аддитивных технологий & 3D-решений
INDUSTRY3D

9–10 октября

11:00
offline



Регистрация
info@industry3d.ru
industry3d.ru

СТАНДАРТЫ И КАЧЕСТВО

Генеральный информационный партнер мероприятия

Российский рынок программного обеспечения для аддитивного производства

Программное обеспечение – одна из важнейших составляющих, обеспечивающих эффективный процесс 3D-печати. Многочисленные зарубежные системы, продвинутые и привычные для российского пользователя, стали в большинстве своем недоступными в связи с уходом ведущих разработчиков с нашего рынка, что дает простор деятельности российских компаний. Разработкой ПО для 3D-печати в России занимаются ведущие разработчики CAD/ CAM/ CAE/ PLM-систем, добавляя в свои продукты функционал для аддитивных процессов, производители аддитивного оборудования для использования в собственных машинах, а также новые компании, возникшие на волне интереса к 3D-печати и изначально ставившие перед собой задачу создания конкурентоспособного на мировом рынке продукта.

О том, как развивается российский рынок ПО для аддитивного производства, редакция попросила рассказать экспертов отрасли, задав следующие вопросы:

1. Какие тенденции вы могли бы отметить на российском рынке ПО для аддитивного производства?
2. Для реализации каких технологий возникли трудности и в каких случаях перемены в связи с уходом зарубежных компаний практически не ощущаются?
3. Для разработчиков ПО для АТ: какие задачи вы ставите для своей компании?
Для потребителей ПО для АТ: какие требования вы предъявляете к ПО для своих задач?
Для специалистов в области аддитивных технологий: какие задачи для первоочередного решения в области разработки российского ПО для АТ вы могли бы выделить?

Михаил Пономаренко, руководитель направления производственных решений компании «АСКОН»



Аддитивные технологии на российском рынке набирают популярность стремительными темпами. И мы как разработчики и интеграторы ПО отмечаем рост интереса к различным программным продуктам, в частности, решающим задачи топологической оптимизации, подготовки управляющих программ для принтеров, обработки трехмерных облаков точек и реверс-инжиниринга. А также интерес к решениям, которые созданы на общем ядре в одном окне с САД-системой или взаимодействуют с САД-системой через расширение.

Сложности наблюдаются с решениями для трехмерного реверсивного проектирования, объединяющими обработку геометрии в САД с отсканированными массивами данных, при этом отечественные слайсеры как минимум не хуже справляются со своими задачами.

Сейчас на рынке представлен ряд российских программных продуктов, решающих отдельные задачи.

При этом у пользователей есть запрос на единое комплексное решение, которое бы работало «из одного окна», без необходимости запуска отдельных приложений, интеграций, использования промежуточных форматов.

Именно в этом направлении развиваются продукты «АСКОН» и наших партнеров по консорциуму «РазВИТие»: конструкторам давно доступна возможность решать задачи топологической оптимизации, проводить расчеты прочности и гидрогазодинамики в окне «КОМПАС-3D». С января текущего года технологи могут писать управляющие программы в САМ-системе, встроенной в «КОМПАС-3D», не только для классических видов обработки, но и для аддитивной. Также налажена интеграция с партнерскими решениями, например, в слайсере Triangulatica есть приложение для «КОМПАС-3D», которое позволяет экспортировать целые сборки с сохранением связей и взаиморасположения элементов сборки. В планах – расширить возможности «КОМПАС-3D» в части обработки данных 3D-сканирования, взаимодействия с контрольно-измерительными машинами (КИМ) и др.

Наша цель – создать вместе с ведущими российскими разработчиками инженерного ПО комплексное решение, которое одновременно закрывает указанные выше задачи и при этом может быть встроено в другие бизнес-процессы предприятия через PLM-контур с выходом на производство.

Андрей Аввакумов, ведущий специалист технической поддержки ГК ADEM



На рынке отечественного ПО для АТ в основном видятся две тенденции — либо слепое копирование уже готовых зарубежных аналогов, либо создание нового софта с нуля. Оптимальным, как всегда, является баланс — создание собственного продукта, включающего в себя все сильные стороны уже

проверенных систем, и минимизация недостатков.

Сложности на текущий момент возникли с программно-компонентной базой, в том числе благодаря которым мы сейчас переходим на отечественное гра-

фическое ядро, создавая тем самым абсолютно импортонезависимое решение. Также все чаще слышатся запросы на работу под альтернативными операционными системами (ОС). Но пока эти запросы не приобрели характер реального коммерческого спроса, говорить о скорейшем переходе на открытые ОС не приходится. И в этом плане можно сказать, что платформа ОС Windows никак не пошатнулась в нашей стране.

Пока главной нашей задачей остается проработка всех тонкостей в постановке ТЗ на дальнейшую доработку модуля АТ, поскольку грамотно сформулированную во всех деталях задачу и решать будет легче, разбивая на отдельные этапы. И конечно же, следим за тенденциями рынка — на что в дальнейшем будет расти спрос в плане отечественного ПО: либо это будет софт для простых слайсеров, либо для многокоординатных установок ПЛВ. Соответственно в этом направлении и будем в первую очередь реализовывать все задумки.

Илья Виноградов, генеральный директор компании 3DVision




Уход с российского рынка таких гигантов отрасли, как 3D Systems, Autodesk и Materialise, открыл свободную нишу для российских компаний, которые с радостью воспользовались предоставленным шансом. Даже, несмотря на еще несколько сырые алгоритмы, которые требуют усовершенствования, часть задач, особенно в области SLM-установок, уже может полностью закрываться отечественным ПО. Инвестиции в подобные компании значительно выросли с начала 2022 года, что, безусловно, даст мощный прирост качественных разработчиков и инженеров в сфере аддитивного производства.

Можно сказать, что с уходом зарубежных компаний сектор FDM/FFF-печати, а также недорогие фотополимерные технологии (LCD, DLP) почти не пострадали. Основной удар пришелся по промышленным технологиям, таким как SLA, SLS и SLM. Как компания, продающая данное оборудование, а также обладающая собственным производством по каждой из этих технологий, можем сказать, что поначалу мы ощутили определенные проблемы, которые, однако, стали решать не параллельным импортом, а поиском новых решений. С гордостью сообщаем, что наш поиск завершился успехом, и компания 3DVISION стала официальным дистрибьютором китайского программного обеспечения от Voxeldance Additive, имеющего весь необходи-

мый набор функций для промышленных технологий, а новое обновление, выпущенное в середине 2023 года, полностью закрыло потребность в использовании ПО от Autodesk и Materialise. При этом наши партнеры из компании VDA не останавливаются на достигнутом и уже внедряют эксклюзивные возможности ПО, которые будут особенно актуальными для решения задач в области стоматологии, а также дадут возможность для ускорения производства по всем технологиям за счет возможности настройки разной толщины слоя в рамках печати одного изделия.

Что касается требований к применяемому ПО, то в первую очередь они заключаются в оптимизации и решении поставленных задач с максимальной эффективностью. Важна постоянная поддержка, улучшение, появление новых алгоритмов и усовершенствование старых. Естественно, переходя с ПО, ставшего санкционным, на отечественное или китайское, приходится мириться с невозможностью применения тех или иных привычных функций, которые все пользователи очень ждут со свежими обновлениями и новыми версиями.



www.3dvision.su

info@3dvision.su
8 (812) 385-72-92, 8 (800) 333-07-58
194100, Россия, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская,
д. 39, литера А, пом. 37-Н, офис 226А

Павел Петров, заведующий кафедрой «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета.



После ухода с российского рынка компаний Autodesk, MSC Software, Altair Engineering, PTC, Dassault Systèmes, Siemens, Ansys, Additive Works GmbH, Materialise NV наблюдается недостаток программного обеспечения для аддитивного производства, применяемого на разных его этапах.

С другой стороны, наблюдается активность российских компаний, направленная на развитие слайсеров, а также программ для инженерного анализа. Однако на рынке программного обеспечения есть открытое ПО, которое применяется для поддержки FDM- и DLP/LCD- технологий. Также на российском рынке появляются китайские разработчики — например, компания VoxelDance.

Евгения Кулагина, продакт-менеджер по аддитивным технологиям компании «ИННФОКУС»



Санкции стали стимулом для отечественных разработчиков укрепить существующие решения или создать новые. Наиболее яркая тенденция на рынке программного обеспечения для аддитивного производства — разработка ПО как составной элемент создания собственного оборудования.

Санкции стали причиной проблем для пользователей. Наибольшие трудности возникли с уходом Materialise Magics. Вместе с этим была утеряна возможность передавать в печать подготовленные модели для 3D-принтеров западного производства. Именно они составляют большую часть парка российских аддитивных центров.

Не менее болезненно ощущается отсутствие ПО для математического моделирования и прогнозирова-

Трудности возникли в обеспечении подготовки производства с применением технологии SLA, SLM, SLS.

Наши требования к ПО с точки зрения потребителя:

- создание качественного stl-файла и возможность его редактирования;
- подготовка файла для 3D-печати с учетом особенностей применяемого оборудования и материалов;
- проведение топологической оптимизации конструкции изделия до его изготовления с применением аддитивной технологии;
- прогнозирование образования дефектов в изделии до его изготовления с применением аддитивной технологии.

Для решения в области отечественного ПО для аддитивных технологий можно выделить следующие задачи:

- проведение топологической оптимизации конструкции изделия до его изготовления с применением аддитивной технологии;
- подготовка файла для 3D-печати с учетом особенностей применяемого оборудования и материалов;
- прогнозирование образования дефектов в изделии до его изготовления с применением аддитивной технологии.

ния дефектов 3D-печати, а также реверс-инжиниринга. Замечательно, что сейчас доступны программы высокого уровня, например, VoxelDance Additive — для подготовки моделей к печати и программа для снижения брака в аддитивном производстве — Reditive. Compensation. Программа PointShape Design для реверс-инжиниринга также свободно продается в России. Для более комфортной адаптации к новым программным продуктам мы обучаем пользователей по индивидуальным планам. Учитываем разные потребности студентов и технических специалистов, включаем практику на деталях заказчика. Такой подход позволяет существенно сократить время освоения ПО.

Как разработчик программного обеспечения мы хотим создать универсальное решение, не зависящее от модели 3D-принтера, при этом функциональное и простое в применении. Рынок нуждается в отечественных программах и очень ждет релиза. Помимо разработки собственного ПО Reditive. Compensation мы являемся официальным дистрибьютором и активно участвуем в улучшении VoxelDance Additive, предоставляя обратную связь и помогая в локализации версий.

Андрей Рипецкий, генеральный директор ООО «Аддитивные технологии»



Аддитивные технологии в своем развитии еще далеко не везде нашли свое место в жизненном цикле процесса создания высокотехнологичной продукции. Процесс адаптации и интеграции набирает темп. Важно отметить, что чем сложнее технология и чем выше требования потребителя к конечным изде-

лиям, тем больше задач требуется решить, в том числе и с точки зрения разработок и внедрения соответствующего ПО.

Одна из основных тенденций на рынке ПО для аддитивного производства — создание решений, закрывающих потребности как разработчиков/производителей аппаратного обеспечения, так и конечных пользователей. Уход зарубежных компаний показал важность разработки и поддержки собственных решений. Для любой технологии 3D-печати, если она используется в задачах, требующих обеспечения стабильности процесса и, главное, его масштабирования, вопросы технической поддержки и развития ПО под требования заказчика очень важны. Тем не менее, отвечая на вопрос о сложностях в связи с уходом зарубежных компаний, можно отметить, что больше всего трудностей возникло в промышленных технологиях печати металлами и керамическими материалами, там, где рынок был

занят именно зарубежными компаниями. Сейчас идут процессы настройки/трансформации отечественной экосистемы АТ. Появляются крупные игроки на рынке оборудования АП, которое требует создания или доработки специализированного ПО.

Несмотря на то, что аддитивные технологии являются явным образчиком цифровизации производственных процессов, на всех этапах как проектирования, так и технологической подготовки, включая процессы на уровне оператора установки, концептуальные решения принимает соответствующий специалист, и вопросы влияния человеческого фактора остаются болезненными и влияющими на успешность внедрения АТ.

Наиболее первостепенной, на мой взгляд, задачей является создание методик и инструментов для инженеров, которые проектируют облик изделий под АТ. Реализация и внедрение ПО на базе таких инструментов позволит получать качественно новый результат и упростить этапы конструкторского и технологического проектирования: определение правильной геометрической формы заготовки, компоновка сцены, проектирование поддержек (их минимизация) и припусков для последующей обработки, расчет и аккумулирование статистических данных. Все это влияет на комплексную успешность использования АТ в производстве, включая и экономическую эффективность.

Для нашей компании приоритетной задачей является создание стабильного, удобного и функционального ПО — синтез работающих и понятных инструментов для конструктора и технолога, позволяющих быстро и без ошибок выполнять свои трудовые функции.

Дмитрий Тужилин, директор по науке группы компаний «Лазеры и аппаратура»



На российском рынке в данное время наиболее востребованными являются САМ-продукты, а также автоматизированные и интеллектуальные системы управления. Другим важным направлением является моделирование аддитивных технологий и развитие программных пакетов моделирования с учетом конфигураций и возможностей оборудования.

Уход зарубежных компаний, безусловно, сказался на работоспособности АТ-установок некоторых производителей оборудования. Наша группа компаний не пострадала, так как мы делали ставку на собственное САМ и управляющее ПО. Там, где необходимо, в машинах нашего производства мы используем либо собственное ПО, либо САМ ПО российских разработчиков. Мы считаем, что разработчики ПО должны получить опыт работы на установках АТ, используя различные программные продукты. Это необходимо как для понимания поставленной задачи, так и для наиболее эффективного и удобного ее решения.

Можно выделить следующие первоочередные задачи в области разработки российского ПО: программное моделирование процессов АТ и наладка контроля процесса еще на этапе моделирования.

Таблица российского ПО для АТ

Компания разработчик/ поставщик	Программный продукт	Функционал ПО для аддитивного производства						
		создание 3D-модели в формате stl	проверка stl-модели на корректность сетки	подготовка производства	управление 3D-печатью в режиме реального времени	инженерный анализ: оптимизация, бионический дизайн, моделирование	для обработки данных сканирования	Компенсация технологических деформаций при 3D-печати
КОММЕРЧЕСКОЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЕ ПО								
 REDITIVE ООО «КБ «РЭДИТИВ» Тел.: 8 (800) 600-1-678 E-mail: in@reditive.ru www.reditive.ru	REDITIVE COMPENSATION							+
 ADEM ГК «Адем» г. Москва: +7 (495) 462-0156 moscow@adem.ru г. Ижевск: +7 (3412) 522-433 krona@adem.ru www.adem.ru	ПО ADEM (ADEM-VX версии 2020, №12735 в Реестре), модуль ПЛВ	+		+		+		
 Triangulatica ООО «Триангулятика», Санкт-Петербург +7 (911) 929 87 65 info@3dsla.ru, 3dsla.ru	Triangulatica (запись №15015 от 26.09.2022 в реестре отечественного ПО Минцифры РФ)	+	+	+		+		
	TriCorrection – утилита коррекции искажений (дисторсий) для лазерных систем на основе галтво-сканеров и MEMS-зеркал			+				
	Генератор G-code для фрезеровки резьбы			+				
	TriBin Viewer средство анализа низкоуровневых данных нарезки			+				
ООО «РВ 3Д Технологии» Info@rv3dtech.ru +7 (499) 380-61-47	RV 3D Studio программное обеспечение для 3D-сканирования и обработки данных	+					+	
 STUDIA 3D 3D PRINT SERVICE @STUDIA3D.COM Studia3D Ecosystem mail@studia3d.com	Системы автоматизации аддитивного производства	+	+	+				
 ООО «Аддитивные технологии» г. Москва, www.atssgroup.com	Глайсер – среда технологической подготовки аддитивного производства полного цикла		+	+				
ООО «НПК АНТЕЙ»	MES Redfab			+	+			
АО «Аскон»	«КОМПАС-3D» и приложения к нему (APM FEM, ADEM CAM, KompasFlow)	+	+	+		+	+	
ООО «НТЦ ГеММа»	«ГеММа-3D», «ГеММа-3D.Верификатор»	+		+			+	
ООО «Геомера»	Geomera 3D Basic Kit						+	
ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ*	«Виртуальный принтер»	+	+	+	+			
АО «СиСофт Девелопмент»	Model Studio CS и др. продукты					+		
ООО «Спрут-Технология»	SprutCAM, CAD/CAM-система для программирования наплавки на 3- и 5-осевых станках. Есть возможность программирования промышленных роботов для операций прямого лазерного выращивания			+				
ООО «ТЕСИС»*	FlowVision	+						
ЗАО «Топ Системы»	T-FLEX PLM	+		+		+		
ООО «Фидесис»	CAE Fidesys					+		
НТЦ «АПМ»	Линейка продуктов APM, в том числе APM WinMacine, APM FEM для «КОМПАС-3D»	+				+		

Таблица российского ПО для АТ






Компания разработчик/ поставщик	Программный продукт	Функционал ПО для аддитивного производства						
		создание 3D-модели в формате stl	проверка stl-модели на корректность сетки	подготовка производства	управление 3D-печатью в режиме реального времени	инженерный анализ: оптимизация, бионический дизайн, моделирование	для обработки данных сканирования	Компенсация технологических деформаций при 3D-печати
ОТЕЧЕСТВЕННОЕ ПО ДЛЯ СОБСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ								
 ГК «Лазеры и аппаратура» Москва, Зеленоград +7 (499) 390-90-86 stanki@laser-app.ru, laserapr.ru	Прямая лазерная наплавка FlexCNC с программными пакетами автоматизации. Послойное лазерное сплавление ML69 LABuilder / LASlicer («+**» – реализована часть функционала)			+	+	***	+	***
 ООО «Эксклюзивные Решения»	3D SLA Build Process Control Manager Билд-процессор			+	+			
ANISOPRINT*	Anisoprint Auro			+	+			
НПП «3D Аддитивные Технологии»	Программа управления фотополимерным 3D-принтером «Kulibin Print»				+			
ИМПРИНТА*	Diaprint.Cloud, Diaprint PC				+			
АО «Лазерные системы»	Laser Studio, Prepare Model (работает в связке)		+	+	+			
ООО «ОНСИНТ» (ONSINT)	Onsint Studio		+	+	+			+
ООО «ПИКАСО 3Д» бренд – PICASO 3D	Polygon X	+	+	+	+			

Таблица зарубежного ПО, доступного в РФ

Компания разработчик/ поставщик	Программный продукт	Функционал ПО для аддитивного производства						
		создание 3D-модели в формате stl	проверка stl-модели на корректность сетки	подготовка производства	управление 3D-печатью в режиме реального времени	инженерный анализ: оптимизация, бионический дизайн, моделирование	для обработки данных сканирования	Компенсация технологических деформаций при 3D-печати
 АО «АЙКБЮБ Технологии» iQB Technologies iqb.ru, info@iqb.ru	PointShape Design					+	+	
	PointShape Inspector					+	+	
	PointShape Editor		+				+	
	VoxelDance Additive	+	+	+			+	
	VoxelDance Tango	+						
 ООО «ИННФОКУС» Тел.: 8 (800) 222 77 59 E-mail: in@infcs.ru www.infcs.ru	PointShape Design	+	+				+	
	PointShape Inspector		+				+	
	VoxelDance Additive	+	+	+			+	
	VoxelDance Tango	+	+	+				
 ООО «Инспект» www.pointshape.online www.inspect-tech.ru e-mail: info@inspectus.ru	PointShape Design					+	+	
	PointShape Inspector		+			+	+	
	PointShape Editor		+				+	

* Из открытых источников

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В CAD/CAM/CAPP ADEM-VX

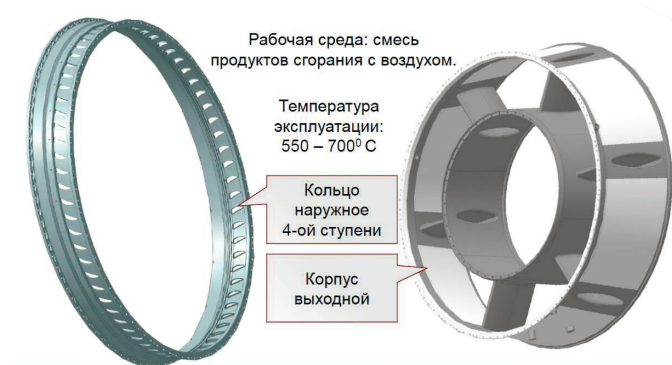


Андрей Александрович Авакумов,
ведущий специалист технической поддержки ГК ADEM, support@adem.ru

Развитие аддитивных технологий как таковых на российском рынке идёт волнообразно. И если первая волна, которая несла в себе больше ознакомительную и демонстрационную информацию, прошла несколько лет назад и была встречена с определённым воодушевлением, то следующая волна – использование метода прямого лазерного выращивания (ПЛВ) деталей в качестве полноценного средства производства – встретила на своём пути целый ряд препятствий, начиная с материального обеспечения (оборудование, приспособления, расходные материалы, отладка технологий и т.д.) и заканчивая подходящим ПО, способным не только решать очень узкие технологические задачи, но и вписываться в общую информационную систему предприятия.

Однако определённую радость и здоровый оптимизм вызывает тот факт, что целый ряд отечественных институтов взялся за серьёзное изучение и устранение этих самых препятствий второй волны развития АТ (рис. 1–4). Так, целый ряд работ, посвящённых совершенствованию технологии и повышению качества получаемых деталей методом ПЛВ, был проведён на площадке Самарского университета (СГАУ) с использованием установки ИЛИСТ СПбГМТУ [1] (рис. 1–2).

Рис. 1. Детали промышленной газотурбинной установки, получаемые методом ПЛВ из сплава ЭП648 (ХН50ВМТЮБ), выращивались на установке с мощностью 2 кВт при скорости сплавления 25 мм/с и диаметре пучка лазера 2,5 мм



В процессе проделанных работ отдельное внимание уделялось и программному обеспечению для выполнения проектирования технологии получения деталей методом ПЛВ.

Программный комплекс ADEM версии VX, поддерживающий проектирование технологических процессов, в т. ч. и по направлению аддитивных технологий (рис. 5), позволяет выполнять одновременно как программирование непосредственно самих установок для выращивания (САМ-модуль), так и выполнение технологического проектирования (модуль САРР) для включения операций аддитивной обработки в общую информационную систему предприятия.

Задачи, с которыми столкнулись разработчики компании ADEM при доработке системы и добавлении в неё функционала для работы с аддитивными технологиями, не ограничились формированием траектории для движения наплавляющей головки установки лазерной наплавки. Камнем преткновения стал объём управляющей программы, формируемой САМ-системой. Поскольку система ADEM может работать не только с моделями в формате stl (предполагающими определённую аппроксимацию финишных поверхностей и как результат – повышение объёма постобработки деталей, полученных АТ), но и с любыми поверхностными и твердотельными 3D-моделями, то растёт и количество кадров УП для формирования сложных поверхностей.

Рис. 2. Процесс выращивания детали методом ПЛВ

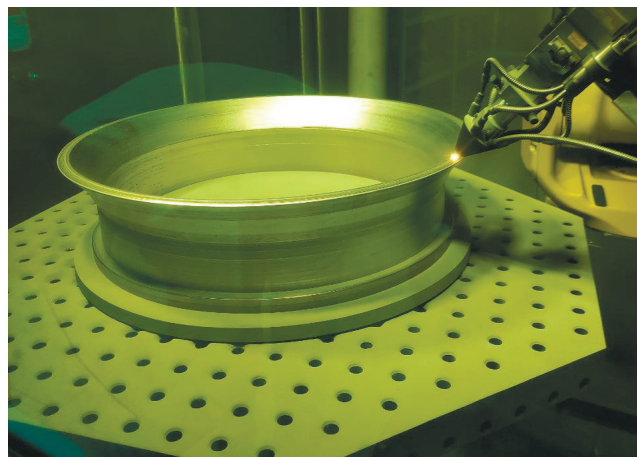


Рис. 3. Образцы 3D-печати металлом



Рис. 4. 3D-печать пластиком [2]

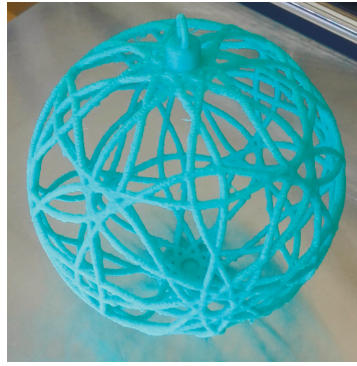


Рис. 5. Выбор направления технологического проектирования "Аддитивное производство" в системе ADEM-VX

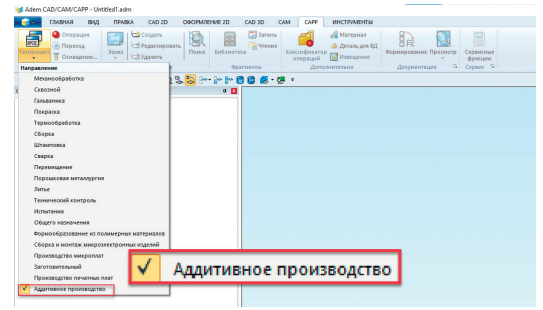
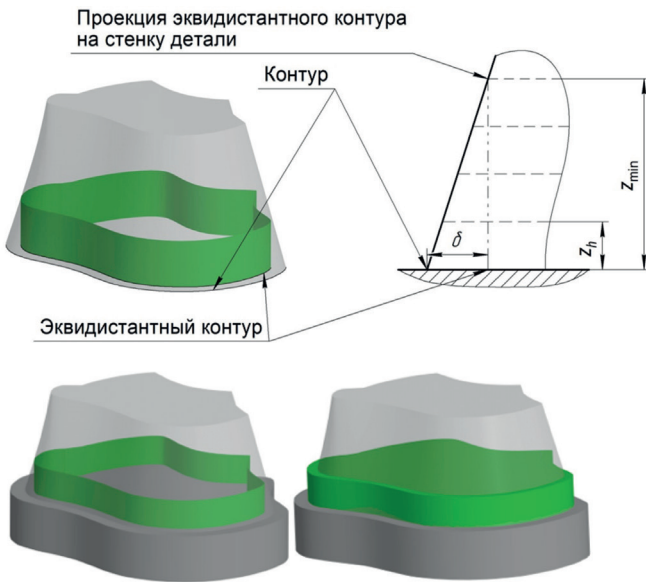


Рис. 6. Упрощение сложных поверхностей (ступенчатые вместо конических)

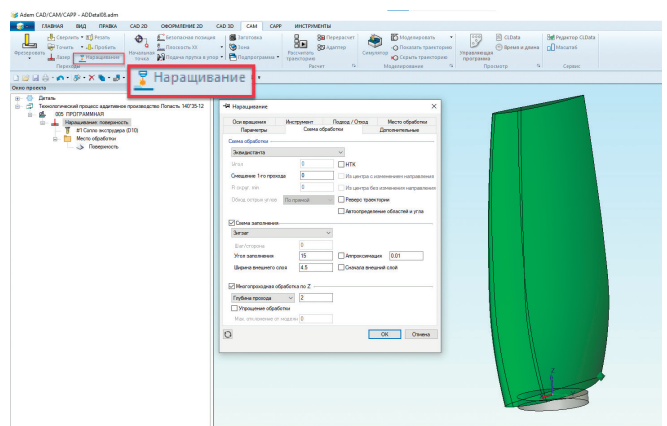


В отличие от ручного написания параметрических УП, работа с САМ-системой не подразумевает критичного отношения к объёму файла УП. Однако, в свою очередь, уже сами установки для выращивания деталей могут иметь ограничения по памяти. Отсюда возникает необходимость предоставления технологу возможности настройки величины аппроксимации (заглубления) качества финишной поверхности детали (например, выращивание ступенчатой модели вместо гладкой конической поверхности, рис. 6).

В сжатые сроки были решены вопросы формирования заполнения внутренней структуры деталей, получаемых методом лазерного выращивания, особенности формирования смежных слоёв и ряд других вопросов (рис. 7). Причём важно отметить, что все создаваемые средства вписались в существующий интерфейс CAD/CAM/CAPP системы ADEM, тем самым позволяя максимально сократить время на освоение нового программного продукта людям, уже знакомым с работой в ADEM.

Открытой задачей пока остаётся автоматическое формирование элементов поддержек при выращивании

Рис. 7. Назначение основных параметров послойного выращивания и заполнения внутренней структуры детали



наклонных и горизонтальных участков деталей. Однако здесь вопрос лишь в согласовании отдельных нюансов ТЗ для разработчиков САМ-модуля, поскольку нет предела совершенству и всегда хочется создать изначально годный и продуманный продукт, а не копировать вслепую принципы работы зарубежных слайсеров и других установок ПЛВ. Так что, пользуясь случаем, можно заявить о готовности сотрудничать со стороны ГК ADEM с предприятиями и институтами на уровне создания наиболее совершенной САПР для получения деталей с использованием АТ.

Литература

1. Носова Е.А., Балякин А.В., Олейник М.А. Исследование влияния отжига на микроструктуру и твёрдость сплава ЭП648 после прямого лазерного выращивания // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2022. Т. 18. № 1. С. 9–14.
2. Дарьина А.О. Материал курса «Компьютерная графика». Лабораторная работа «Новогодний шар». Тольятти. 2019.

Группа компаний ADEM
107497, г. Москва, ул. Иркутская, д. 11, корп. 1, офис 256
Тел.: +7 (495) 462-0156, +7 (495) 502-1341
E-mail: moscow@adem.ru, www.adem.ru
426003, г. Ижевск, ул. Красноармейская, 69
Тел.: +7 (3412) 522-433, +7 (3412) 522-341
E-mail: krona@adem.ru

Реверс-инжиниринг деталей спортивного оружия с применением 3D-печати

ООО «ИННФОКУС»

Известно множество примеров успешного внедрения технологий реверс-инжиниринга и 3D-печати в различных отраслях промышленности. В этой статье компания «ИННФОКУС» покажет несколько интересных проектов из области стрелкового спорта, подробно, насколько это возможно согласно требованиям о конфиденциальности.

Реверс-инжиниринг, или обратное проектирование — это важнейший инструмент для импортозамещения. Для его реализации необходимо не только специализированное оборудование, но и программное обеспечение (ПО). Геометрия изделия определяется оптическими, лазерными 3D-сканерами или компьютерными томографами. Специальное лабораторное и исследовательское оборудование применяется для анализа микроструктуры, состава и свойств материалов. На основании полученных данных и серийности изделий подбираются технологии их обработки и производства.

По завершении обратного проектирования у разработчиков появляется вся необходимая информация по восстанавливаемому изделию: 3D-модели деталей и сборок, марки используемых материалов и технологии производства.

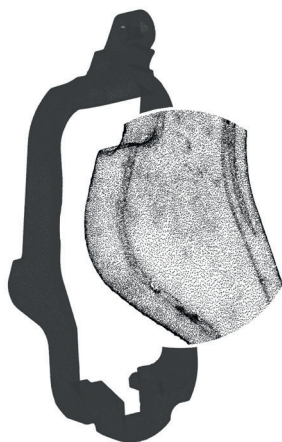
Логичным продолжением реверс-инжиниринга является 3D-печать, которая может использоваться для быстрого прототипирования, изготовления технологической оснастки, опытного или серийного производства деталей.

Для реализации реверс-инжиниринга и последующего производства компания «ИННФОКУС» использует передовое ПО и оборудование (рис. 1):

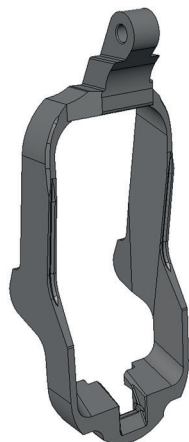
1. Оптические 3D-сканеры RangeVision (Россия), которые позволяют с высокой точностью получать геометрические параметры (облако точек или STL 3D-модель) реальных объектов.

Рис. 1. Используемое в компании «ИННФОКУС» оборудование и программное обеспечение для реверс-инжиниринга

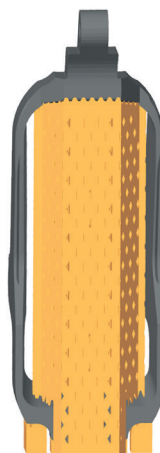
 RangeVision
3D-сканеры



PointShape™



VOXEL
DANCE



3DLAM



Рис. 2. Реверс-инжиниринг и прототипирование деталей спортивного оружия



2. ПО PointShape Design (Корея) для создания твердотельных моделей на основе результатов 3D-сканирования.
3. ПО Voxeldance Additive (Китай) для технологической подготовки к 3D-печати.
4. Установки полимерного (Ф2 Инновации, Россия) и металлического аддитивного производства (3DLam, Россия).

Этот комплекс использовался во многих проектах, связанных с стрелковым спортом. Первый из них — проектирование и изготовление прототипа кронштейна коллиматорного прицела спортивного пистолета (рис. 2а). Для демонстрации преимуществ 3D-печати, а также снижения массы, некоторые сплошные области кронштейна были заменены ячеистой структурой.

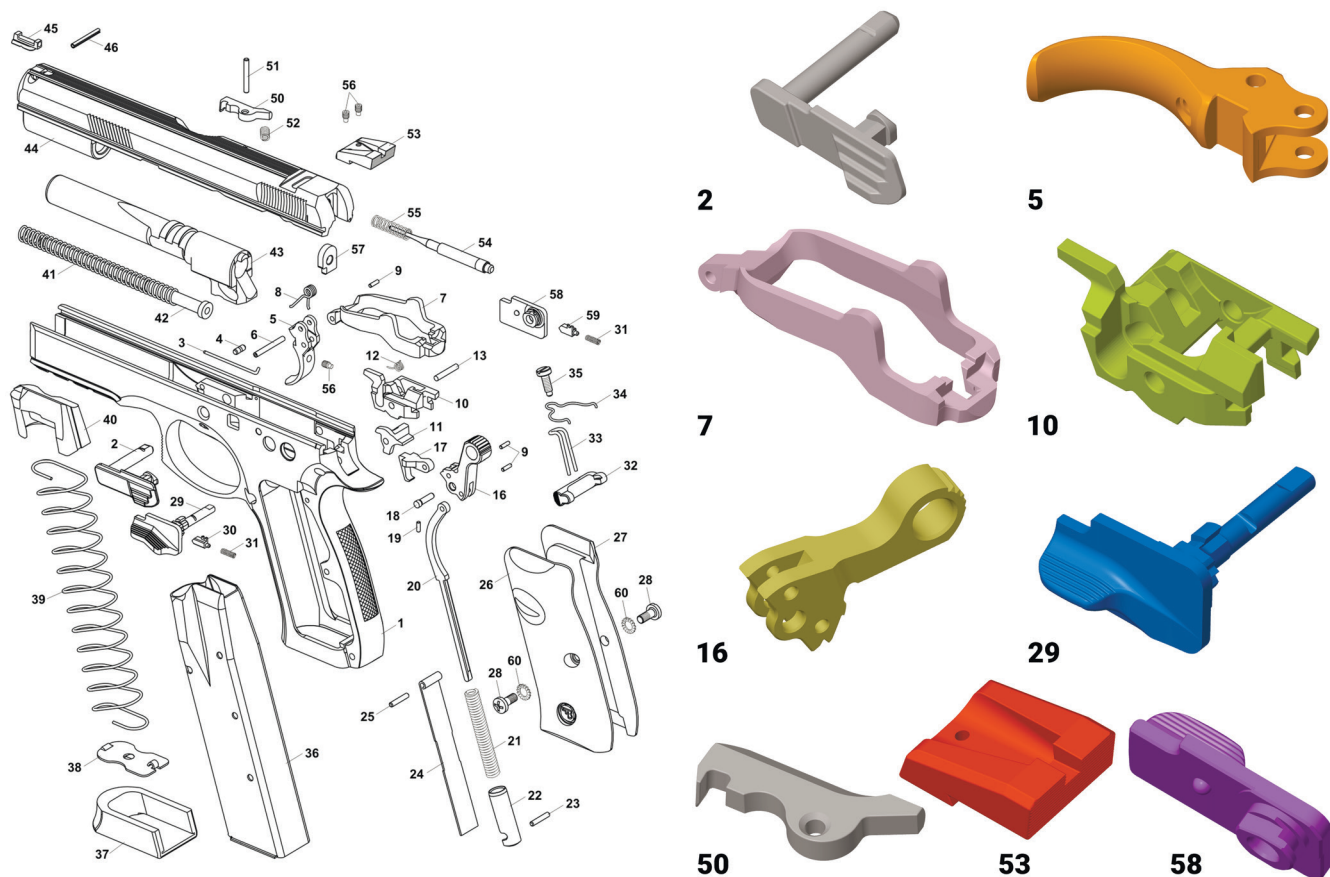
Следующие проекты (рис. 2б и рис. 2в) заключались в реверс-инжиниринге деталей спортивных карабинов. Для прототипирования и проверки на собираемость некоторые из них были изготовлены методами полимерной 3D-печати (FFF, SLA, SLS).

Один из активных проектов — проектирование и серийное изготовление девяти неосновных деталей чешского пистолета для спортивной стрельбы CZ-75 (рис. 2г). Данная работа была инициирована АНО «Агентство по технологическому развитию» и субсидируется постановлением правительства РФ № 208. Согласно техническому заданию для этих деталей были выполнены:

- Исследования материалов и реверс-инжиниринг конструкции.
- Разработка технологии производства.
- Прототипирование и серийное изготовление.
- Ресурсные испытания.

Реверс-инжиниринг выполнялся для следующих элементов спортивного пистолета: затворная задержка (рис. 3, поз. 2), крючок спусковой (рис. 3, поз. 5), тяга спускового крючка (рис. 3, поз.7), отражатель (рис. 3, поз. 10), курок (рис. 3, поз. 16),

Рис. 3. Результаты реверс-инжиниринга неосновных деталей спортивного пистолета



предохранитель левый (рис. 3, поз. 29), выбрасыватель (рис. 3, поз. 50), целик (рис. 3, поз. 53), предохранитель правый (рис. 3, поз. 58).

В процессе реализации проекта была разработана конструкторская документация, технология опытного и серийного производства деталей. Для опытного производства была использована технология селективного лазерного сплавления. Серийное производство включает электроэрозионную, токарную, фрезерную и термическую обработку.

В результате были получены детали с полностью идентичной геометрией, а их механические свойства равны или превосходят исходные. Испытания, которые проходят в данный момент, подтверждают соответствие всем требуемым тактико-техническим характеристикам.

Реверс-инжиниринг с применением 3D-печати является важнейшим инструментом для многих предприятий в сложившихся геополитических

условиях. Компания «ИННФОКУС» ежедневно использует данные технологии в своих собственных проектах, а также оказывает подобные услуги сторонним организациям, разрабатывает и поставляет оборудование для специализированных центров реверс-инжиниринга. Опираясь на свой многолетний опыт в аддитивных технологиях и обратном проектировании «ИННФОКУС» не только подберет необходимое оснащение, но и разработает «под ключ» технологии, необходимые для решения ваших задач.

ООО «ИННФОКУС»
Тел.: 8 (800) 222-77-59
E-mail: in@infcs.ru
www.infcs.ru

 **Voxeldance Additive**

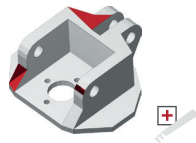
**Программное обеспечение
для технологической
подготовки к 3D-печати
(SLM, DMLS, SLS, SLA, DLP/LCD)**



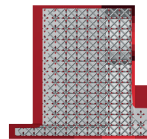
Процесс подготовки данных в Voxeldance Additive



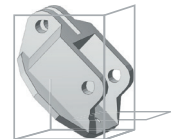
Импорт CAD



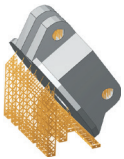
Исправление ошибок



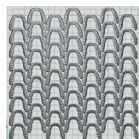
Редактирование



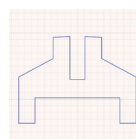
Ориентация



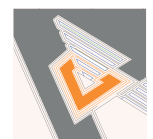
Моделирование
поддержек



Автоматическая
компоновка



Слайсинг



Задание траектории
сканирования

**Почему
Voxeldance
Additive?**

- Удобное и функциональное ПО по более доступной цене
- Все необходимые модули собраны в одном решении. Пользователь может выполнить все этапы подготовки файла к печати в одном программном обеспечении.
- Продуманная система модулей. Алгоритм системы оптимизирован так, чтобы моментально обрабатывать сложные массивы данных.

Для заказа тестовой
лицензии обратитесь к
официальному
дистрибьютору Voxeldance

in@infcs.ru
8 800 222 77 59
voxeldance-russia.ru



Электрические свойства СБС-пластика после 3D-печати по экструзионной технологии

А.С. Витоненко¹, Д.А. Таксимбаева¹, П.А. Петров¹, Н.С. Шмакова², И.А. Чмутин²

¹Московский политехнический университет, г. Москва

²Технологический центр коллективного пользования АО «Технопарк «Слава», г. Москва

e-mail: petrov_p@mail.ru

С развитием аддитивных технологий, работающих с полимерными материалами, появляется спрос на создание изделий с различными эксплуатационными свойствами. Например, такими, как прозрачность, повышенная прочность или же повышенная пластичность, и многое другое. Эта тенденция в аддитивном производстве привела к созданию новых материалов либо адаптации известных полимерных материалов для их последующей обработки по экструзионной аддитивной технологии (FFF, FDM). Формализованная модель экструзионной 3D-печати представлена на рис. 1 [1].

Для изготовления качественного продукта по экструзионной технологии необходим не только подбор материала и знание его свойств как до, так и после 3D-печати, с учетом эксплуатационных требований, но также и настройка режима 3D-печати. Режим 3D-печати зависит от значения температуры сопла и рабочей платформы, скорости печати, толщины слоя, наличия или отсутствия поддержек, параметров стиля формирования внутренней структуры изделия. Например, чем больше скорость 3D-печати, тем меньше время изготовления

и выше вероятность формирования дефектов печати: недостаточная когезия двух соседних слоев, наличие микропустот (пор) между соседними слоями, коробление элементов изделия.

Наличие микропустот (пор) приводит к изготовлению несплошного изделия и, как следствие, снижению его прочности. Несплошность может быть оценена по изменению электрических свойств полимерного материала изделия — диэлектрической проницаемости. На рис. 2 показаны возможные варианты сечения образца, изготовленного по экструзионной технологии [2]. С технологической точки зрения форма пор определяется параметрами стиля заполнения и температурой экструдированного материала. С точки зрения реологии полимерного материала температура влияет на его вязкость и, как следствие, при ее повышении может способствовать уменьшению размера пор.

При отсутствии пор в полимерном изделии, изготовленном по экструзионной технологии, диэлектрическая проницаемость материала должна соответствовать значению, характерному для этого же материала,

Рис. 1. Модель технологии экструзионной 3D-печати

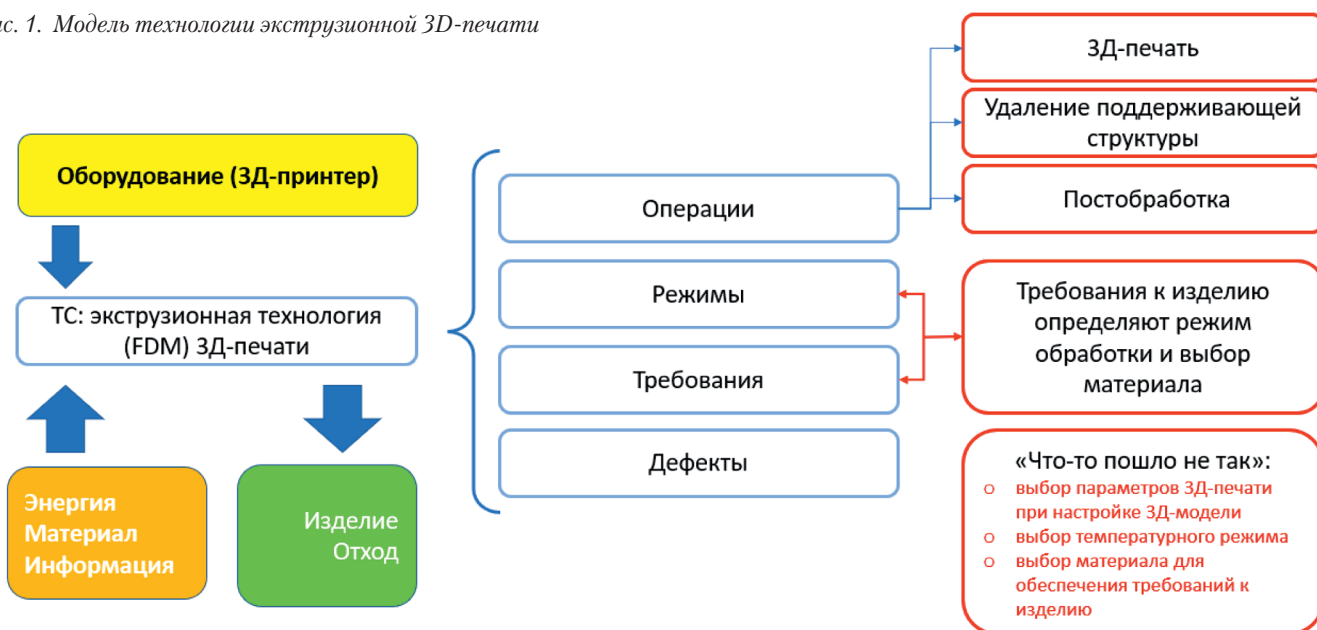
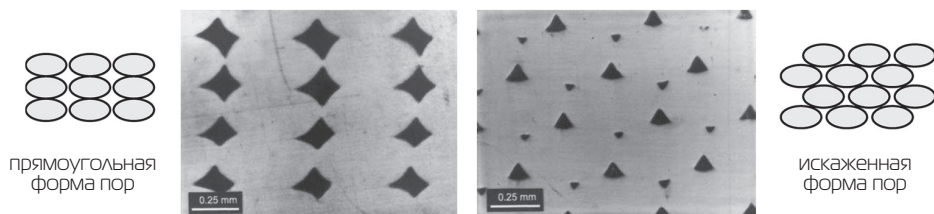


Рис. 2. Характерная форма пор при 100%-м заполнении сечения в процессе экструзионной технологии 3D-печати [2]



а) прямоугольный стиль заполнения

б) искаженный (skewed) стиль заполнения

обработанного по технологии литья либо прессования (эталонное значение). Уменьшение значения диэлектрической проницаемости относительно эталонного может свидетельствовать о наличии пор, заполненных воздухом.

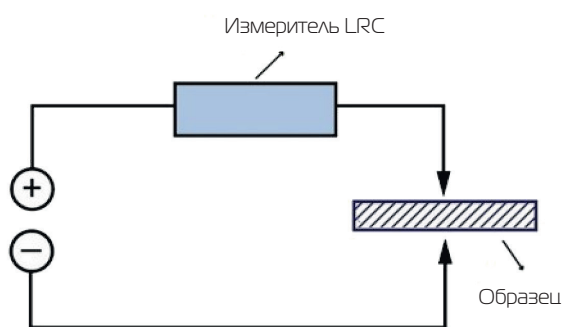
В данной статье рассматривается стирол-бутадиен-стирольный термоэластопласт (SBS, СБС), являющийся известным материалом для полимерной промышленности, — занимает около 50% мирового рынка термоэластопластов [3]. По данным из открытых источников [4], эталонное значение диэлектрической проницаемости СБС-пластика составляет 2,8.

СБС-пластик, исследуемый в нашей работе, имеет среднюю температуру стеклования 101,96 °С — определено на основании результатов, полученных методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с применением прибора компании Mettler Toledo. Режим проведения опыта по методу ДСК: нагрев в диапазоне 0–300°С со скоростью 20К/мин в среде N2.

Для аддитивного производства СБС-пластик является относительно новым материалом, применяемым для изготовления изделий по экструзионной технологии (FFF/FDM). Основные качества СБС-пластика — высокая влагостойкость, гибкость, ударопрочность, практически отсутствие усадки. Благодаря этим качествам данный материал крайне полезен для 3D-печати. Принимаем, что исследуемый СБС-пластик в исходном состоянии (до 3D-печати) является сухим.

Диэлектрическая проницаемость СБС-пластика после его обработки по экструзионной технологии может быть оценена методом широкодиапазонной диэлектрической спектроскопии с использованием прецизионного

Рис. 3. Схема установки образца при подготовке испытания



измерителя LRC в диапазоне частот от 20 Гц до 5 МГц. Схема установки образца при спектроскопии показана на рис. 3.

Определение диэлектрической проницаемости выполняется на основе измерения емкости плоского конденсатора, между пластинами которого помещается

образец исследуемого материала.

Образцы СБС-пластика изготавливаются с применением FFF-технологии 3D-печати на 3D-принтере открытой конструкции (без термокамеры). Внешний вид образца показан на рис. 4. Образец имеет размеры: диаметр 20,0 мм, толщина 1,1 мм. Выбраны четыре режима 3D-печати. Под режим 3D-печати понимается набор параметров настройки 3D-принтера: температура сопла и рабочего стола, скорость перемещения печатающей головки, параметр flow, тип и параметры заполнения, толщина слоя, ширина линии слоя.

3D-печать образцов проводилась без поддержек, постобработка образцов включала в себя отделение образцов от подложки и удаление технологических неровностей на верхнем и нижнем торцах, что позволяет уменьшить возможную погрешность измерений в опытах с применением измерителя LRC.

Основные параметры настройки 3D-принтера:

- 1) температура сопла и рабочего стола — 240° и 80°С;
- 2) скорость перемещения печатающей головки — 30 мм/с;
- 3) параметр flow — 100%.

Температура в области сопла измерялась термопарой типа К и составила ~50° С. Варьируемые параметры режима 3D-печати (рис. 5):

- 1) тип и стиль заполнения (стенка выкладывается стилем concentric для всех образцов):
 - за счет толщины стенки (обеспечивается 100% заполнение без параметра Infill, рис. 4а и рис. 5, 1.X);
 - Concentric (100%, рис. 4б и рис. 5, 2.X);

Рис. 4. Внешний вид образцов для испытания

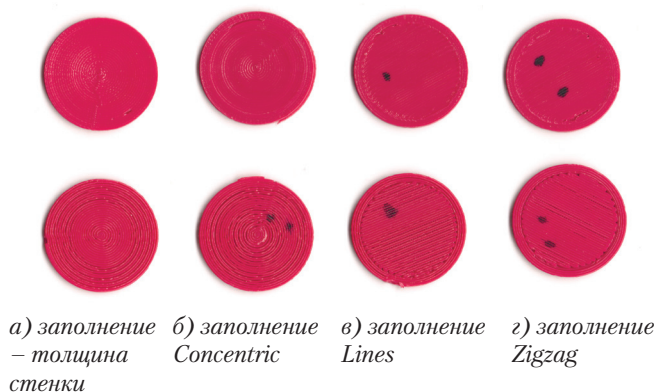
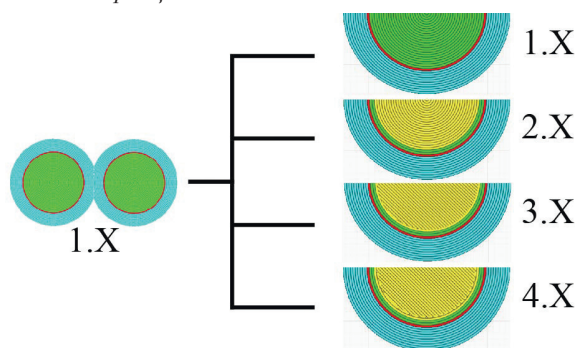


Рис. 5. Типы образцов для испытания



- Lines (100%, рис. 4в и рис. 5, 3.X);
- Zigzag (100%, рис. 4г и рис. 5, 4.X);
- 2) толщина слоя (при диаметре сопла 0,4 мм) для каждого стиля заполнения – 0,1 мм, 0,2 мм, 0,3 мм;
- 3) ширина линии слоя (при диаметре сопла 0,4 мм) – 0,4 мм, постоянная величина для сопла выбранного диаметра.

С учетом варьируемых параметров для каждого образца введено обозначение 1.X–4.X (рис. 5). Первая цифра соответствует типу заполнения (в той же очередности, в которой они перечислены на рис. 5), а вторая – толщине слоя. Так, например, образец с номером 2.3 напечатан типом заполнения Concentric при толщине слоя 0,3 мм.

При заполнении стилем толщина стенки (shell) устанавливается равной 1,2 мм и Top/Bottom = 1,2 мм

(рис. 5, 2.X, 3.X, 4.X). При заполнении стенкой – толщина стенки Top/Bottom = 12,0 мм (рис. 5, 1.X).

В таблице 1 представлены измеренные значения диэлектрической проницаемости для выбранных типов заполнения (рис. 4 и 5).

Для заполнения типа 1.X и 2.X (рис. 4) измеренное значение диэлектрической проницаемости отличается от эталонного значения не более чем на 2,56% и 0,11% соответственно. Применение типа заполнения Lines либо ZigZag приводит к увеличению относительной погрешности измерения – 19,16% и 19,7% соответственно. Увеличение погрешности может быть связано с увеличением количества пустот (пор), формируемых при изготовлении образцов типа 3.X и 4.X. Характерная форма пор показана на рис. 2.

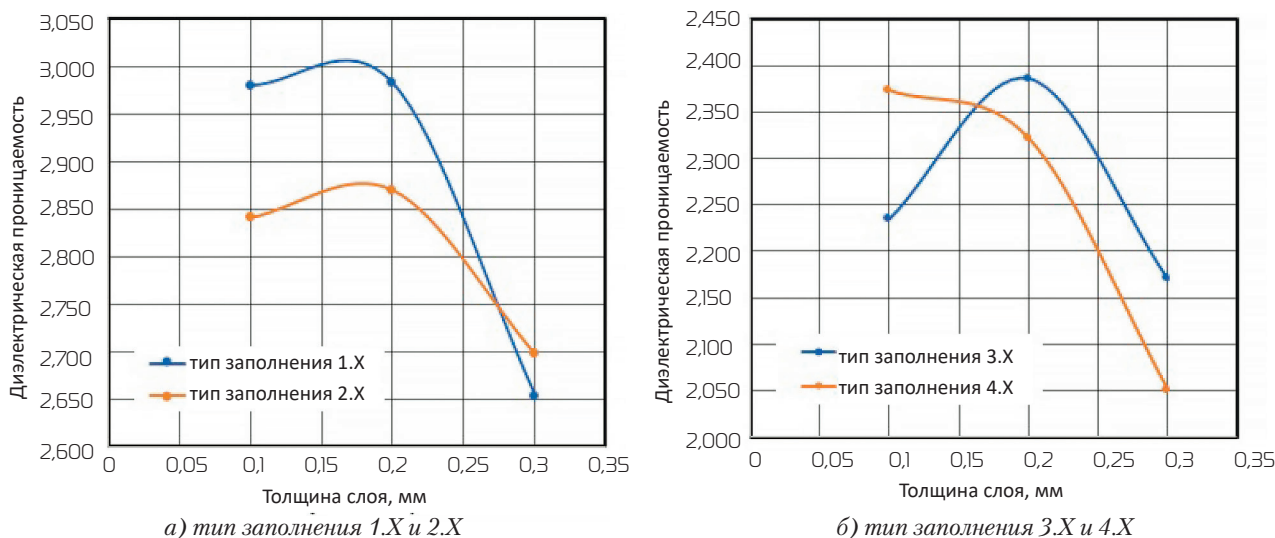
Толщина слоя влияет на значение диэлектрической проницаемости. Во всех исследованных образцах СБС-пластика прослеживается взаимосвязь между диэлектрической проницаемостью и толщиной слоя. Так, на рис. 6 показано изменение диэлектрической проницаемости для образцов, изготовленных с разным типом заполнения.

Одна из возможных причин уменьшения диэлектрической проницаемости: с увеличением толщины слоя увеличивается количество пор, которые заполняются воздухом при формировании слоя (тип заполнения: Lines и ZigZag). При этом значение диэлектрической проницаемости становится меньше, чем эталонное

Таблица 1. Значения диэлектрической проницаемости СБС-пластика

Тип образца	Тип заполнения	Эталонное значение диэлектрической проницаемости	Измеренное значение диэлектрической проницаемости (среднее значение)
1.X	заполнение 100% за счет толщины стенки	2,8	2,872
2.X	заполнение 100% Concentric	2,8	2,803
3.X	заполнение 100% Lines	2,8	2,263
4.X	заполнение 100% Zigzag	2,8	2,248

Рис. 6. Изменение диэлектрической проницаемости в зависимости от толщины слоя



значение из-за наличия воздуха. Причем, чем больше воздуха, тем больше уменьшение значения диэлектрической проницаемости (см. таблицу 1, тип образца 3.x и 4.x).

Выводы и заключение

Проведенное исследование и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Экструзионная аддитивная технология (в нашем исследовании — FFF) позволяет изготовить образцы из СБС-пластика с максимально сплошной структурой при 100%-м заполнении, обеспечиваемом за счет толщины стенки (рис. 4а) либо за счет применения типа заполнения Concentric (рис. 4б).

2. При 100%-м заполнении, обеспечиваемом за счет применения типа заполнения Lines или ZigZag, сплошность образцов уменьшается — косвенным подтверждением является уменьшение значения диэлектрической проницаемости (таблицу 1).

3. Толщина слоя, обеспечивающая при экструзионной технологии значение диэлектрической проницаемости, близкое к эталонному значению, составляет 0,1–0,2 мм при диаметре сопла 0,4 мм. Увеличение толщины более 0,2 мм приводит к уменьшению значения диэлектрической проницаемости, что косвенно может указывать на увеличение количества пор в изготовленном образце. Например, с типом заполнения Lines или ZigZag (рис. 6).

4. Полученные в данной работе результаты могут быть использованы на этапе проектирования изделий, изготавливаемых впоследствии из СБС-пластика по экструзионной аддитивной технологии. Например, вспомогательный инструмент для металлообработки (кондукторы), формообразующий инструмент для изготовления малых серий изделий из полимерных материалов либо тонколистовых металлических материалов, а также функциональных деталей, обеспечивающих при своей работе демпфирование незначительной ударной нагрузки либо работающих в области упругих или упруго-пластических деформаций.

Литература

1. П.А. Петров, М.А. Бронин, Б.Ю. Сапрыкин, М.А. Долгов. 3D-печать низкотемпературным пластиком // Аддитивные технологии. 2022. № 1. С. 26–29.
2. L.G. Blok, M.L. Longana, H. Yu, B.K.S. Woods. An investigation into 3D printing of fiber reinforced thermoplastic composites // Additive Manufacturing. 2018. Volume 22. Pp. 176-186.
3. О. Ашпина, И. Салихов. Перерабатываем шины // The Chemical Journal. 2011. № 1–2. С. 58–61.
4. С. Ellingford, R. Zhang, A.M. Wemyss, C. Bowen, T. McNally, Ł. Figiel, C. Wan. Intrinsic Tuning of Poly (styrene-butadiene-styrene) Based Self-Healing Dielectric Elastomer Actuators with Enhanced Electromechanical Properties // ACS Applied Materials & Interfaces. 2018. 10(44). Pp. 38438-38448. doi: 10.1021/acsami.8b13785.

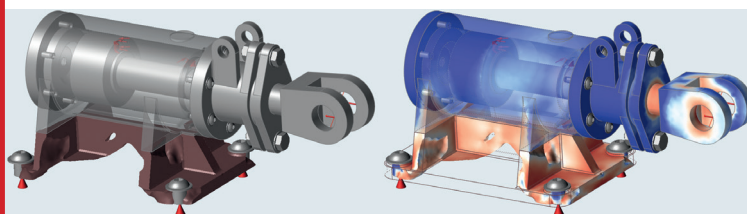


МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ

Кафедра «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета специализируется на компьютерном проектировании технологии и создании её цифрового двойника (digital twin). Задача специализации — получение наилучшего совпадения результатов моделирования с результатами натуральных экспериментов. В своей работе сотрудниками кафедры применяется современное программное обеспечение, такое как «Т-Флекс», Inventor, QForm, AutoForm, Pam-Stamp, Altair HyperWorks, solidThinking Inspire, MatLab, Abaqus, Comsol и другое.

ОСНОВНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТОК КАФЕДРЫ ЯВЛЯЮТСЯ:

- исследование технологических свойств материалов для аддитивных технологий и выбор термомеханических режимов 3D-печати;
- разработка технологий и оборудования для аддитивного производства;
- обратный инжиниринг и топологическая оптимизация для решения задач обработки давлением и аддитивного производства;
- листовая и объёмная штамповка, прокатка — разработка, исследование, внедрение технологий на опытное или серийное производство;
- разработка, исследование, внедрение технологий изготовления метизных и крепежных изделий;



- специальные процессы штамповки: изотермическая штамповка и штамповка с кручением чёрных и цветных сплавов;
- повышение стойкости штамповой оснастки и кузнечно-штамповочного оборудования;
- разработка моделей материалов для компьютерного моделирования технологий обработки давлением.

КАФЕДРОЙ ВЕДЁТСЯ ПОДГОТОВКА КАДРОВ ПО СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ПРОГРАММАМ:

- «Машины и технологии обработки материалов давлением» (очное, бакалавриат, 15.03.01 Машиностроение);
- «Аддитивные технологии» (очное, бакалавриат, 27.03.05 Инноватика);
- «Цифровые технологии аддитивного и заготовительного производства» (очное, магистратура, 15.04.01 Машиностроение).

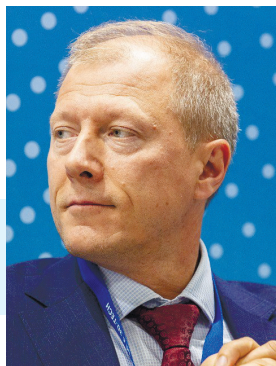


Контактная информация:
115280, г. Москва,
ул. Автозаводская, д. 16
Тел.: +7/495/ 223-05-23, доб. 2344,
e-mail: omd.at@mospolytech.ru



Сайт: <https://old.mospolytech.ru/index.php?id=883>

Быстрый металл аддитивных технологических комплексов



Д.Н. Трушников



Д.С. Трубашевский

*Д.Н. Трушников, директор ООО «ИксВелд»
Д.С. Трубашевский, независимый эксперт,
основатель бренда «Логика слоя»*

Введение

С незапамятных времен человечество покоряет природу. Вначале это стремление было вызвано в основном инстинктом самосохранения и пропитания. И лишь в последние тысячелетия человека стало заботить удобство и эстетика его жилища, орудий труда, средств передвижения, одежды, оружия... В последние столетия освоение человеком новых источников энергии: открытого пара, движения воды и воздуха, сжатого пара, горения углеводородов и, наконец, атома — повлияло на уровень техногенности нашей эпохи [1]. Получаемую энергию человек использовал для создания техники через технологию. По этой причине технологии он уделял и уделяет большое внимание. Время, когда субтрактивные (классические/традиционные) технологии в эпоху развитой промышленности главенствовали в техногенной деятельности человека, уходит. На место высокопроизводительным, серийным, но не гибким классическим технологиям приходят аддитивные — с ярким выраженным эффектом единичного производства и индивидуального отношения к клиенту, являющиеся своеобразным глотком свежего воздуха в меняющейся парадигме производственной реальности.

Со времен массового производства, рожденного автомобильной империей Генри Форда, произошли существенные изменения. Сегодня в погоне за лояльностью потребителя мы стали активно создавать и осваивать новые «постфордистские» концепции промышленности, например, такие, как lean manufacturing — бережливое производство, agile — активное производство, и quick response manufacturing (QRM) — быстро реагирующее производство [2]. В итоге такое «оптимизированное» производство добавило головной боли управленцам предприятий, но помогло им обходиться меньшим коли-

чеством человеческих усилий, оборудования, изготавливать за меньшее время и на более компактных площадях то, что хочет клиент. Инновационные компании сегодня все чаще обращаются к аддитивным технологиям, устраняя ими слабые стороны классических производственных методов. Меньше оборудования, переналадки, электроэнергии, материалов, квалифицированной рабочей силы, сокращение брака — вот что стало теми триггерами всемирной известности послышного способа получения изделий на основе цифровых данных.

Сегодня важным конкурентным фактором является способность производства выпускать индивидуализированную продукцию по специальным заказам. Но это не является проблемой для активных компаний и производств с быстрой реакцией, ведь они и создаются для этого. Тем не менее возможности индивидуализации продукции ограничиваются гибкостью используемого оборудования, и для крупносерийного производства это сложная и дорогостоящая задача.

Инновационный потенциал у активных компаний значительно выше, чем у бережливых и с быстрой реакцией, особенно если они располагают 3D-принтерами, что позволяет успешно решать персонализированные проблемы клиентов за короткие сроки.

Одним из действенных способов быстро реагировать на запросы рынка и удовлетворять все усложняющиеся индивидуальные проекты является использование скоростных технологических комплексов с возможностью аддитивной или гибридной обработки металлических изделий. Почему мы говорим именно о скоростных комплексах? Дело в том, что современные заводы, далекие от инноваций и разработки прорывной высокосложной, часто агрегированной продукции, не готовы к массовому производству принципиально иных товаров чем те, на которые они сегодня без проблем находят сбыт.

Тем не менее топ-менеджеры стабильных предприятий ищут пути сокращения затрат и ускорения выпуска продукции. Здесь на помощь и приходят скоростные комплексы, позволяющие избавиться от неповоротливого наследия классического серийного производства.

Прямой подвод энергии и материала

Несмотря на то, что сегодня появляется все больше проектов, связанных с созданием перспективных металлорошковых технологий с 3D-печатью связующим, например, Metal Binder Jetting или Multi Jet Fusion, мы не будем рассматривать их в данном обзоре по причине сложно прогнозируемой усадки в процессе спекания. Для многих современных предприятий машиностроительного профиля, не желающих проводить много времени с тестированием и отработкой технологий спекания, именно методы прямого подвода энергии и материала покажутся интуитивно понятными и рентабельными для решения нетривиальных задач. Давайте для начала разберемся в основных методах технологий прямого подвода энергии и материала, которые применяются в аддитивном производстве из металлов.

Семейство прямого подвода энергии и материала (англ. Directed Energy Deposition, DED) включает в себя ряд лучевых технологий, имеющих общий признак: конструктивно оборудование очень похоже на фрезерную обработку на металлообрабатывающих станках или роботизированных манипуляторах. Однако есть и отличия в самих видах материалов. Это может быть металлорошок или металлическая проволока.

Металлорошковые DED-технологии в качестве источника для наплавки могут использовать лазерный луч, как в случае с DED-P (англ. Powder Directed Energy Deposition), так и электронный луч, как с DED-EB (англ. Electronic Beam Directed Energy Deposition), а также холодное газодинамическое напыление ХГН (англ. Cold Spray) на сверхзвуковых скоростях.

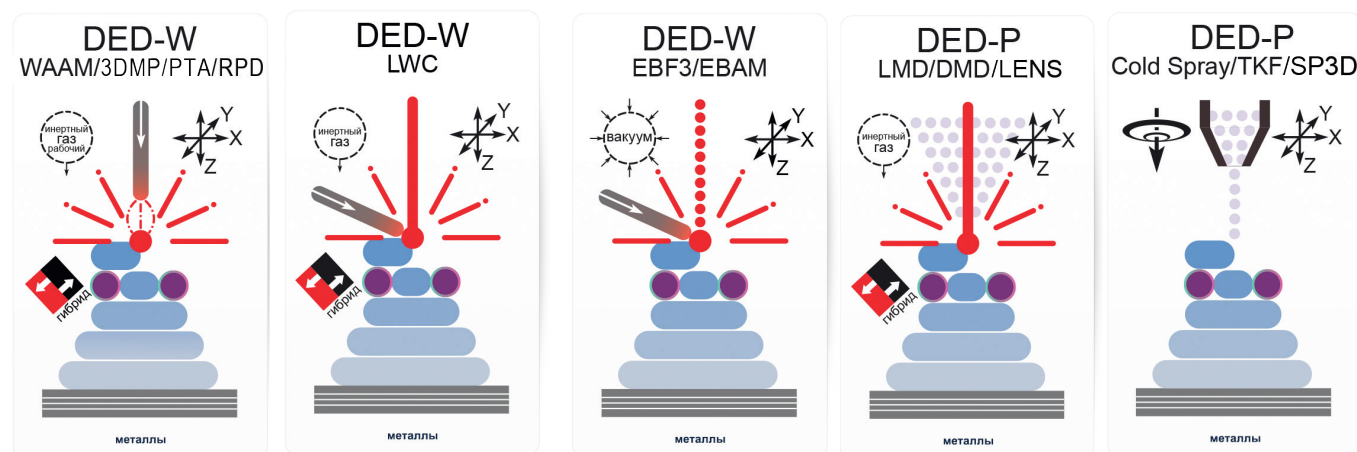
Вместо или в дополнение к металлорошку сегодня все чаще начинают использовать металлическую сварочную проволоку в подсемействе DED-W (англ. Wire Directed Energy Deposition). Проволочная наплавка сегодня имеет целый ряд энергетических источников и их коллабораций друг с другом. Например, в технологии LWAM (англ. Laser Wire Additive Manufacturing) используется лазерный луч, в EBF3 (англ. Electron-beam Freeform Fabrication) — электронный луч, а в PAW (англ. Plasma Arc Welding) и WAAM (англ. Wire Arc Additive Manufacturing) — плазменная дуга, производимая плазменным источником или сварочным аппаратом. Также сегодня все чаще появляются гибридные комбинации PAW + WAAM, PAW + WAAM + проковка, DED + лезвийная ЧПУ-механообработка и другие.

В вышеперечисленных технологиях наплавки построение изделий производится как на трехосевом станке (обычно это среднесложные крупногабаритные модели), так и на многоосевом станке (5 осей на фрезерном станке-доноре, станке с собственной компоновкой или с помощью роботизированного манипулятора/манипуляторов).

Оборудование DED проектируется таким образом, чтобы энергия от источника вместе с материалом, а иногда и инертным газом, подавалась в одну точку по принципу сходимости, где и происходит наплавление материала. В DED-процессе достаточно легко реализовать восстановление сломанных/изношенных деталей, например, лопаток турбин, направляющих аппаратов, формообразующих пресс-форм, кронштейнов и т.п.

Заключительным этапом работ с получением качества поверхностей согласно чертежа зачастую после металлических аддитивных технологий является фрезерная, реже — токарная механообработка. Если аддитивную и субтрактивную технологии удается реализовать на одном станке, то в этом случае говорят о гибридном центре или гибридном производстве. Тогда на одном станке без его переналадки и внутрицеховой или

Рис. 1. Схемы аддитивных технологий с прямым подводом энергии и материала [3]



контрактной логистики мы имеем дело с производством, которое берет лучшее из противоположных процессов, выигрывая в скорости и требуемой сложности деталей.

В популярной в России технологии LB-PBF/SLM (англ. Laser Beam Powder Bed Fusion) перечисленные выше методы для ремонта изделий реализовать крайне сложно на одном гибридном станке [4], поэтому в настоящем обзоре мы их рассматривать не будем.

Рассмотрим некоторые компании с уникальными решениями в сфере наплавки в России и за рубежом. Также обратим внимание на возможности их гибридного производства, если таковые имеются.

Успешные компании с технологией прямого подвода энергии и материала

Addilan [5] — достаточно молодая компания с небольшим модельным рядом WAAM-установок для производства среднеразмерных и крупных изделий до 5 метров: Arclan P1200-4X и 1000-5X. Оба станка позволяют печатать изделия в закрытой инертной среде со специальной системой загрузки и выгрузки. Станки обеспечивают гибридное производство с наплавкой деталей с производительностью до 6 кг/час.

AddUp [6] — французская компания, специализируется на двух популярных технологиях аддитивного производства: LB-PBF и DED-P. Компания VeAM, входящая в AddUp Group, на данный момент предлагает две DED-P-установки: Magic 800 и Modulo 400. Внушительные размеры камеры Magic 800, составляющие 1200×800×800 мм, лазер мощностью 2 кВт, быстрая замена головки с точной на более производительную и наоборот делают ее желанной для потребителей из сферы авиастроения и космонавтики.

AML3D [7] — австралийская компания, разрабатывающая центры ARCEMY для проволоочной наплавки по технологии WAM (DED-W/WAAM). Преимуществом разработки является модульная компоновка, предусматривающая вариативность длины рабочего стола, количества роботизированных манипуляторов. Особую гордость для AML3D представляет наличие заслуженных сертификатов и соответствие стандартам: DNV, Lloyd's Register, ISO 9001:2015, AWS, 3 bizSafe.

Big Metal Additive [8] — компания из Денвера (штат Колорадо, США), которая использует гибридный станок открытого исполнения для проволоочной WAAM-наплавки изделий максимального размера 3,6 м. Компания берется за самые сложные проекты, порой включающие топологически оптимизированные элементы, которые не так просто реализовать даже с помощью порошковых и более точных LB-PBF и DED-P-технологий.

DMG MORI [9] — знаменитая немецкая станкостроительная компания, сравнительно недавно приобретающая

компетенции в аддитивных технологиях. Их гигантский гибридный центр LASERTEC 6600 DED Hybrid предназначен для производства крупногабаритных изделий полного цикла до размеров $\varnothing 1010 \times 3702$ мм (3D-печать + ЧПУ-механообработка) для авиастроения, космонавтики и энергетики.

Evobeam [10] — немецкая компания, предлагающая три аддитивные технологии собственного производства. Одна из них — LWAM, причем с лазером в вакууме, реализованная в установке проволоочной наплавки с производительностью 200–500 см³/ч и романтическим названием WiLaVAM (англ. Wire Laser in Vacuum Additive Manufacturing). Применение вакуума позволяет избежать образования пор в сталях, титановых сплавах, суперсплавах и тугоплавких металлах.

Formalloy Technologies [11] — американская компания, специализирующаяся на газопорошковой наплавке целого ряда различных металлов и сплавов. Уникальной особенностью компании является программное обеспечение DEDSmart с системой управления с обратной связью, лазерами с переменной длиной волны, а также с магазином на 16 питателей металлопорошка FormAlloy ADF. FormAlloy ADF предоставляет беспрецедентные возможности для исследований по разработке новых функционально-градиентных материалов FGM (англ. Functionally Graded Materials) и биметаллических структур.

Gefertec [12] — известная немецкая компания проволоочной наплавки по технологии 3DMP (DED-W/WAAM), предлагающая модельный ряд из четырех станков в трех- и пятиосевом исполнении. В зависимости от модификации станков и сложности воспроизводимых изделий пользователям доступны модели для печати заготовок от 0,8 м³ с максимальным весом 500 кг и до 3,0 м³ с весом 3000 кг. Gefertec намеренно не стремится использовать роботизированные манипуляторы и финишную обработку заготовок резанием по причине заботы о качестве, легкости программирования и простоте встраивания технологии в существующие производственные процессы любого машиностроительного предприятия.

InssTek [13] — популярная в России корейская компания, предлагающая ряд DED-P 3D-принтеров с рядом интересных решений, например, адаптивной системой с обратной связью, позволяющей анализировать высоту расплава в режиме реального времени, обеспечивая измерение и контроль каждого слоя. Также компания предлагает систему подачи порошка CVM с шестью независимыми питателями.

Lincoln Electric Additive Solutions [14] — дочерняя компания знаменитой американской транснациональной компании Lincoln Electric, выпускающей продукты для дуговой и роботизированной сварки, плазменной и газовой резки. В своих проектах контрактного производства компания использует техно-

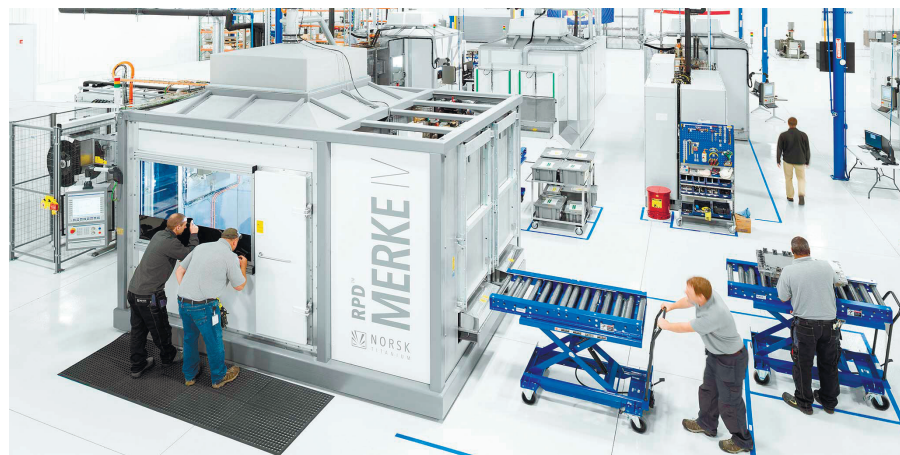
логию WAAM, собственную проволоку высочайшего качества, металлообрабатывающие ЧПУ-станки для завершающего цикла производства.

Meltio [15] — испанская компания, предлагающая оборудование, ПО и интеграцию с роботизированными манипуляторами благодаря своей технологии WLMD (англ. Wire Laser Metal Deposition). WLMD является своеобразным гибридом технологий DED-P + DED-W и позволяет работать как двумя проволоками одновременно для увеличения скорости наплавки, так и с проволокой и порошком, позволяя «на лету» получать новые сплавы. Головка 3D-принтера Meltio M450 может содержать до 6 диодных лазеров по 200 Вт каждый, а небольшие габариты печати 145×168×390 мм будут достаточны для научных разработок или производства малогабаритных изделий.

MX3D [16] — голландская медийная компания, предлагающая роботизированную 8-осевую систему M1 Metal AM для производства средних и крупных металлических деталей с использованием технологии WAAM (DED-W). Для WAAM-технологии типично использование холодного переноса металла CMT (англ. Cold Metal Transfer) от лидера Fronius, а также скорости печати 1–5 кг/час.

Norsk Titanium [17] является ключевым игроком в области аддитивного производства DED-W. Компания запатентовала собственную технологию RPD (англ. Rapid Plasma Deposition) для плазменного осаждения металлической проволоки. Их серийная система четвертого поколения под названием MERKE IV позволяет изготавливать титановые заготовки для авиастроения (имеется одобрение Федерального управления гражданской авиации США FAA) и космонавтики размерами до 900×600×300 мм с производительностью 5–10 кг/час. Один станок способен наплавлять до 10–20 тонн проволоки в год. Уже сегодня Norsk Titanium открывает внушительные производства с десятками установок для 3D-печати титановых заготовок для авиастроения и других отраслей (рис. 2).

Рис. 2. Центр разработки и производства Norsk Plattsburgh в США с десятками установок MERKE IV (Norsk Titanium)



Optomec [18] — настоящий американский старожил в области технологий наплавки, диктующий моду и имеющий целый ряд последователей. Аддитивные и гибридные системы компании используют технологию LENS (DED-P) и могут оснащаться лазером мощностью до 3 кВт, магазином на 16 инструментов и шпинделем со скоростью вращения 8 000 или 10 000 об/мин.

Prima Additive [19] — итальянская компания, специализирующаяся на двух популярных технологиях аддитивного производства: LB-PBF и DED-P. В DED-P компанией предлагается несколько решений, в том числе станок Laser Next 214 с потрясающим объемом печати 4140×2100×1020 мм. Laser Next 214 особенно впечатляет своей головкой для наплавки, которая перемещается одновременно по 3–5 осям, лазером в диапазоне мощности от 1 до 6 кВт.

Relativity [20] — эта американская компания известна своим проектом по напечатанной и запущенной ракете Terran 1. Relativity серьезным образом изменила привычные сроки производства ракет за 60-летнюю историю космонавтики. Ее 3D-принтеры Stargate являются самыми большими для проволочной наплавки и используются для печати ракеты Terran 1. Роботизированный Stargate 4-го поколения способен одновременно наплавлять до 4 проволок!

Известная американская компания **Sciaky** [21] предлагает обширный ряд оборудования, оснащенного технологией наплавки с электронным лучом в вакууме EBAM (англ. Electron Beam Additive Manufacturing), принадлежащей к семейству DED-W/EBF3. С помощью их 3D-принтеров можно создавать изделия размерами до 5790×1220×1220 мм или круглые детали диаметром до 2440 мм с производительностью платформы от 3,18 до 18,14 кг/час в зависимости от выбранного материала и параметров детали. Кроме того, процесс EBAM позволяет печатать небольшие детали с толщиной слоя 1 мм, а с помощью двойной подачи проволоки можно комбинировать два разных металлических сплава в одном изделии, создавая биметаллические или градиентные структуры.

Sotimeco [22] — французская компания, специализирующаяся на технологии DED. Для сплавления металлопорошка и проволоки в оборудовании используют волоконный лазер мощностью 1 кВт и роботизированный манипулятор для производства заготовок размерами до 1500×500×500 мм. Головку для газопорошковой наплавки можно оперативно заменять на подающую проволоку или совмещать работы двумя типами материалов за один цикл 3D-печати.

SPEE3D [23] — австралийская компания, пожалуй, самая успешная в технологии ХГН, в которой частицы металлопорошка разгоняются до сверхзвуковой скорости, в 4 раза превышающей скорость звука, причем без использования вакуума или инертной газовой атмосферы. В компании разработано новое сопло сверхвысокой мощности Phaser, которое позволяет осуществлять наплавку со скоростью 100 г/мин при температурах до 800°C меди, алюминия, алюминиевой бронзы, нержавеющей стали, титана, карбидов на основе никеля, хрома, вольфрама. В SPEE3D разработано несколько производственных решений с размерами 3D-печати до $\varnothing 1000 \times 700$ мм, поставляемых также в составе передвижных шестиметровых морских контейнеров.

Titomic [24] — знаменитая австралийская компания, предлагающая ручные и автоматические роботизированные системы по технологии ХГН с отсутствием деформаций и проблем с окислением деталей. Нанесение высокоэффективных покрытий или аддитивное производство с размерами изделий до $9000 \times 3000 \times 1500$ мм, широкие пределы регулировок производительности от 10 г/мин до 500 г/мин (30 кг/ч), а также самая низкая цена за металлопорошковые материалы — визитная карточка этой компании. Еще одно направление ХГН, которое практически невозможно реализовать с помощью высокотемпературных аддитивных технологий, — это внедрение электронных датчиков, сенсоров или нанесение металлических покрытий на такие чувствительные материалы, как стекло, керамика и пластик. Также технологию активно используют для защиты от коррозии, радиационного излучения, для ремонта, нанесения индуктивных покрытий.

Trumpf [25] — знаменитая немецкая компания со столетней историей, выпускающая оборудование для автоматизации металлообрабатывающего производства. Для целей 3D-печати у компании имеется две технологии: LB-PBF и DED-P. С помощью их фирменной технологии высокоскоростной лазерной наплавки HS-LMD (англ. High Speed Laser Metal Deposition) с предварительным нагревом порошка достигается значительное увеличение производительности вплоть до $1500 \text{ см}^2/\text{мин}$. А их наплавка с помощью зеленого лазерного излучения особенно эффективна для материалов с высокой отражательной способностью, например, меди, медных сплавов, бронзы, алюминиевых сплавов и благородных металлов. И это еще не все. Станки TruLaser Cell позволяют работать с большими заготовками до 4000 мм, осуществляя в гибридном режиме резку, сварку и наплавку металла.

Британская компания **WAAM3D** [26] является коммерческим проектом, реализованным благодаря десятилетиям научно-исследовательских работ университета Крэнфилда (родоначальник WAAM-технологии в мире). Их роботизированный 3D-принтер RoboWAAM способен работать с огромным количеством материалов

проволок и создавать детали с максимальными размерами до $2000 \times 2000 \times 2000$ мм. Кроме того, оборудование поставляется с собственным программным пакетом WAAM3D, использующим интерферометрическую технологию для предоставления геометрических данных о трехмерном профиле каждого слоя в режиме реального времени.

ООО «ИксВелд» [27] — мощный и коммерчески успешный проект деятельности ученых, инженеров, конструкторов Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ), инжиниринговых компаний и производственных предприятий Пермского края. Благодаря такой коллаборации ООО «ИксВелд» (бренд xWELD) сегодня предлагает следующие модели оборудования: компактный мобильный центр ProM для трехосевой наплавки с размерами рабочей зоны $800 \times 600 \times 600$ мм и производительностью до 5 кг/ч; порталный трех- и 5-осевой центр Portal с размерами рабочей зоны до $6000 \times 3000 \times 1200$ мм и производительностью до 10 кг/ч; четырех- и шестиосевые аддитивные роботизированные манипуляторы с рабочей зоной до $1500 \times 1500 \times 1500$ мм и производительностью до 9 кг/ч. К технологическому превосходству xWELD можно применить следующую формулу: PAW + WAAM + проковка, к которой они прибегают в зависимости от поставленных клиентом задач. Например, если нужно реализовать наиболее доступную по стоимости наплавку, то используется WAAM с СМТ, если же нужно обеспечить высокое качество — PAW, высокую производительность — PAW + WAAM, повышенные механические свойства — рекомендуется оснащение проковкой. Важным отличием компании от конкурентов является широкое применение алгоритмов предеформации для уверенности в точности получаемого физического объекта. Предеформация позволяет уменьшить припуск и сократить, если требуется, объем механообработки, в том числе на гибридном станке.

Примечательно, что ученые ПНИПУ долгие годы параллельно с университетом Крэнфилда (Великобритания) занимались вопросами, связанными с проковкой (послойным ударным упрочнением) наплавляемых заготовок. Послойное деформационное упрочнение обеспечивает снятие остаточных механических напряжений и повышенные механические свойства материала, близкие к свойствам поковок. Очевидно, что этот процесс значительно удлиняет производственный цикл, но и способствует улучшению качества заготовок. По этой причине бизнес и промышленность редко жалуют такое увеличение времени производимой продукции. Зато НИИ и вузы часто выбирают такие решения для своих изысканий несмотря на то, что проковку значительно проще организовать на 3-осевом станке, чем на 5-осевом (5 осей позволяют изготавливать более сложные изделия с одного постановления).

О востребованности предлагаемых решений компании говорит тот факт, что на ее опытно-производственном участке к 2023 году было выращено более 5 тонн заготовок по заказам промышленных предприятий.

Деликатность и сложность реализуемой геометрии изделий с помощью вышеперечисленных технологий должна быть очевидна: в большинстве случаев порошок выигрывает у проволоки. Однако если речь идет о производительности, то заготовки из проволоки получаются значительно быстрее. Этот выигрыш также сохраняется при лезвийном удалении припуска, который может составлять 1–3 мм или до 10% от номинальных размеров детали.

Институт лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ (ИЛИСТ) [28] — лучшая компания по DED-P технологии в России. Директор ИЛИСТ, профессор, доктор технических наук Г.А. Туричин начал проводить прикладные исследования газопорошковой наплавки еще в 2000 году, а основал предприятие в 2004 году на базе двух кафедр: лазерной технологии и теории и технологии сварки. За долгие годы команда специалистов этих кафедр внесла большой вклад в развитие теоретических основ сварочных и лазерных технологий и разработку оборудования. Сегодня известны 4 модификации станков, самая крупная из которых имеет диаметр построения 2200 мм и высоту 1000 мм, а мощность лазера составляет 4 кВт.

Концерн «Калашников» [29] — ижевский производитель боевой и гражданской продукции — решил попробовать свои силы в выпуске гибридного обрабатывающего центра. Станок IZH H600 сочетает в себе технологию лазерной наплавки и 5-осевую фрезерную обработку, позволяя изготавливать детали и сборочные единицы сложной геометрической формы массой до 300 кг и габаритами до 600×500×500 мм. Разработчики достигли главной цели — они создали станок полного цикла для ремонта собственных заводских штампов, пресс-форм и быстроизнашиваемой оснастки. Тем не менее станок должен быть интересен и многим машиностроительным предприятиям, предприятиям энергетической, атомной, нефтяной промышленности и многим другим.

ГК «Лазеры и аппаратура» [30] известна своим огромным ассортиментом различного оборудования для металлообработки, часто оснащенного лазерными источниками. Среди аддитивных комплексов в компании представлена как классическая установка МЛ6 для LB-PBF 3D-печати, станки лазерной сварки и наплавки проволокой, так и установки лазерной порошковой наплавки МЛ7 и МЛ7-С с размерами зоны построения до 1000×1000×800 мм и головкой коаксиальной подачи порошка собственной разработки. Компания помогает внедрять на станки заказчика собственные отработанные решения, например, наплавочные головки для ги-

бридных комплексов. Это помогает сократить путь освоения инновационных технологий и сразу приступить к насущным производственным проблемам, например, ремонту штамповой оснастки путем наплавки металла и механообработки на одном станке.

Выдающиеся проекты 3D-печати изделий

На что же все-таки ориентироваться промышленнику, какую сложность изделий могут обеспечить рассмотренные технологии? Приведем некоторые выдающиеся примеры реализации различных технологических методов.

Технологический научно-исследовательский институт IRT Saint Exupéry совместно с компанией PolyShare, являющейся дочерней AddUp Group, разработали и напечатали один из самых сложных демонстраторов по технологии DED-P [31]. Данное сопло является частью проекта DePÓz, объединяющего 15 участников из промышленных и академических кругов всей цепочки создания ценности аддитивного производства из металлов. Данный образец является кульминацией нескольких лет исследовательской работы. Он имеет вес 18 кг и изготовлен из инконеля 718 — жаропрочного материала, широко используемого в авиации, космонавтике и энергетике. Высокий уровень индустриализации технологии DED-P подтверждается ее возможностями, реализованными в данной детали: пересекающиеся перегородки, переменное сечение сопла с наклонной геометрией, изогридные (или «вафельные») элементы переменных размеров по поверхности сложной кривизны, добавленные (нарощенные) элементы (рис. 3).

Институт лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ (ИЛИСТ), ООО «РусАТ», ОКБ «ГИДРОПРЕСС» завершили комплексный проект для аддитивного производства сложнопрофильных и крупногабаритных изделий для нужд атомной энергетики. Они спроектировали и напечатали по технологии DED-P фрагмент выгородки внутрикорпусного

Рис. 3. Демонстрационный образец DePÓz — одна из самых сложных на сегодняшний день реализаций технологии DED-P для промышленного применения (технологический научно-исследовательский институт IRT Saint Exupéry, Франция)

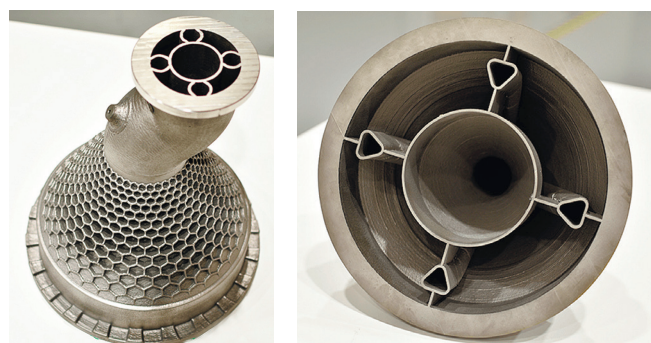
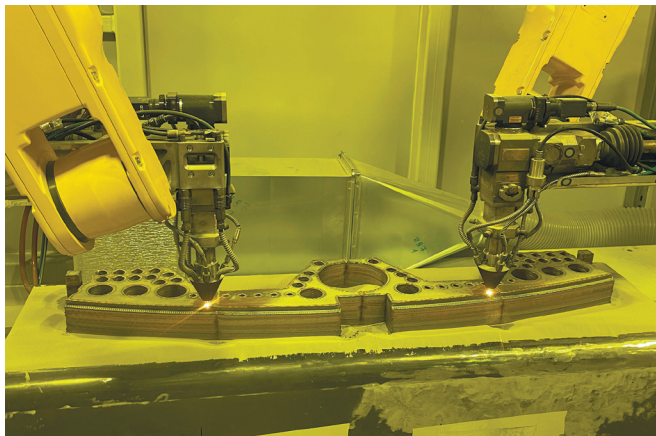


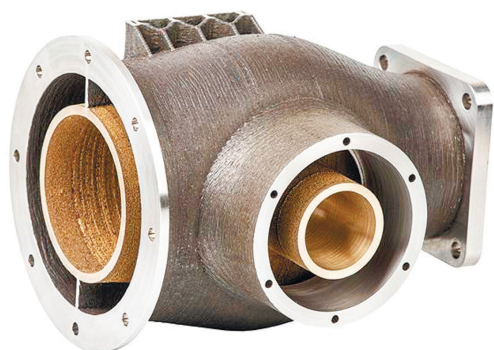
Рис. 4. Процесс изготовления выгорodka внутрикорпусного устройства водо-водяного энергетического реактора двумя роботизированными газопорошковыми манипуляторами (ИЛИСТ, ООО «РусАТ», ОКБ «ГИДРОПРЕСС»)



устройства водо-водяного энергетического реактора [32]. Высота изделия составила 1 м, масса – более 700 кг, а время построения – 22 дня (рис. 4). Ранее для выпуска изделий такого масштаба требовались мощности крупного промышленного предприятия.

Достаточно высокий уровень сложности воспроизводимой геометрии, особенно в сравнении с традиционными методами производства, — не единственная сильная сторона DED-P. Одним из важных преимуществ такого метода наплавки является полиметаллическая 3D-печать, ограниченная только количеством порошковых питателей (от 2 до 16). Питатели могут попеременно дозировать необходимое количество порошка для нанесения осаждающей головкой. Стоит отметить, что строить несколькими материалами с четкой границей или функционально-градиентными материалами FGM в этой технологии получается достаточно просто [33]. Последние позволяют эффективно решать вопросы с концентраторами напряжений между твердым и мягким материалом, которые обычно появляются у традиционных технологий. Плавный переход с FGM от мягкого материала к твердому успешно их решает. Гибридные станки позволяют печатать детали и затем производить

Рис. 5. Возможности гибридной обработки из полиметаллов двухканального теплообменника из меди (внутренняя часть) и алюминия (внешняя часть) на станке LASERTEC 3D (DMG MORI, Германия)



лезвийную механообработку ответственных поверхностей деталей под сборку или крепеж (рис. 5).

Однако возможность работы с двумя и более материалами в одном цикле обработки пока еще не находит большого отклика у потребителей. Дело в том, что для использования таких инноваций у заказчика должна быть готова соответствующая научная и конструкторская база с квалифицированными и опытными специалистами.

Очередной выдающийся пример — известная у нас технология ХГН для специализированных покрытий, до сих пор не снискавшая себе славы в 3D-печати. Можно отметить сразу три ее главных преимущества: лучшая в классе производительность (десятки кг/час); простая работа с обширным ассортиментом материалов, включая медь, титан, карбиды; отсутствие специфических требований к материалам, что положительно сказывается на их стоимости (рис. 6).

Рассмотрим, наконец, проекты, связанные с проволоочной наплавкой DED-W, которая полюбилась пользователям не только во всем, но и в России.

Рис. 6. Гильза медного ракетного сопла весом 17,9 кг, напечатанная за 199 минут по технологии ХГН (SPEE3D, Австралия)



Компания Relativity произвела 85% компонентов 33-метровой ракеты-носителя Terran 1 с помощью 3D-печати. Ступени ракеты и носовой обтекатель были напечатаны из алюминиевой проволоки по технологии WAAM (DED-W) (рис. 7–8), а 10 двигателей Aeon — по технологии LB-PBF. Наплавка проволокой осуществлялась с помощью огромных роботизированных 3D-принтеров Stargate собственной разработки.

Если вы считаете, что с проволоочной наплавкой можно производить только крупные заготовки достаточно простых форм, то это не так.

Хочется отдельно рассказать об уникальном совместном проекте, единственном в России и Республике Беларусь, и постараться убедить многих скептиков в том, что для аддитивных технологий нет ограничений в плане производства сложной продукции. Однако выбор рентабельной технологии 3D-печати — это большой труд и опыт, который нужно приобретать долгие годы или с помощью опытных интеграторов.

Рис. 7. Ступень ракеты Terran 1 (Relativity, США)

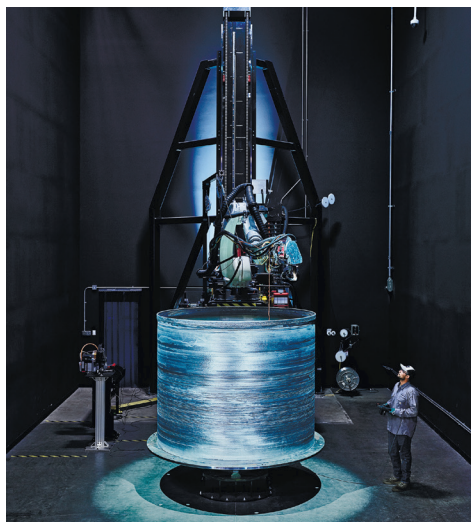


Рис. 8. Носовой обтекатель ракеты Terran 1 (Relativity, США)



Топологическая оптимизация, генеративный дизайн, бионические конструкции, навеянные природой, — все эти эпитеты и мощные современные алгоритмы инженерных САЕ (англ. Computer-aided engineering) стали справедливы в совместном проекте ООО «ИксВелд» (Россия) и ОАО «Могилевлифтмаш» (Республика Беларусь).

ОАО «Могилевлифтмаш» — успешный советский и белорусский производитель лифтов, более 50 лет обеспечивающий местный, российский и зарубежные рынки лифтовым оборудованием с выгодным соотношением цена–качество. Удивить рынок, открыть для себя новые горизонты разработки продукции и ее изготовления с помощью новаторских технологий — именно такую цель поставили перед собой эти компании.

Лифт — опасный объект с бескомпромиссными требованиями к его надежности. Чем нагляд-

нее технология, чем меньше в ней скрытых явлений — тем она надежнее. Но при таком подходе есть шанс остаться на уровне технологий «забивания гвоздей», хотя и в ней есть скрытые от глаз явления. Традиционные подходы к производству несущих частей лифтовых конструкций задействуют в основном технологии работы с листовым металлом (раскрой, гибка и т.д.) и на сегодняшний день вполне удовлетворяют большинство производителей и потребителей. Однако степень удовлетворения снижается, а то и пропадает вовсе, как только лифт становится виден не только изнутри, но и снаружи. В последнее время частым в использовании материалом является стекло, которое «раскрывает тайны» лифтовых конструкций и может вызвать диссонанс между красотой и изяществом внутри кабины и простотой снаружи. В этом случае на помощь могут прийти аддитивные технологии, которые предоставляют огромные возможности для



Рис. 9. Слева — половина несущего корпуса лифта, изготовленного и собранного по обычной технологии, справа — половина корпуса лифта, напечатанная по WAAM-технологии и сваренная в единое целое изделие (ОАО «Могилевлифтмаш»)

Рис. 10. Половина нижней опорной части корпуса лифта (ОАО «Могилевлифтмаш»)

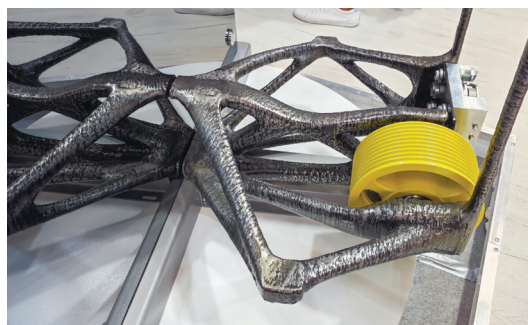
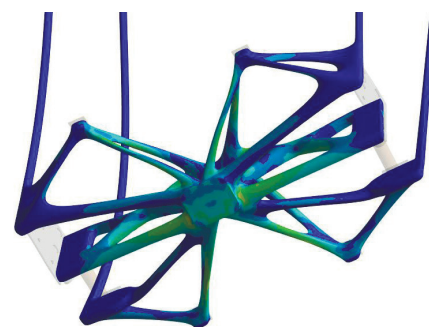


Рис. 11. Эквивалентные напряжения в режиме посадки кабины на ловители



созидания, но при этом требуют более высокого уровня профессионализма на этапах конструирования и изготовления. Коллектив отраслевой лаборатории лифтового машиностроения ОАО «Могилевлифтмаш» сочетанием подходов топологической оптимизации и генеративного дизайна, расчетов несущей способности, а также аддитивных технологий от ООО «ИксВелд» создали последовательно в виртуальном и реальном мирах каркас лифта – прочный, безопасный, но при этом изящный и притягивающий взгляд. Из особенностей проекта стоит отметить пустотелую модель каркаса, материал – доступная сталь 30ХГСА для использования внутри помещений (после постобработки поверхностей ее можно покрыть лакокрасочным покрытием), диаметр наплавляемой проволоки – 1,2 мм. В результате работ ООО «ИксВелд» напечатали несколько деталей, сварив их между собой. Общий размер ажурного изделия составил 540×745×2640 мм и был с успехом продемонстрирован на Международной выставке лифтов и подъемного оборудования Russian Elevator Week 2023 на ВДНХ в Москве (рис. 9–11).

ОАО «Могилевлифтмаш» отличается индивидуальным подходом к потребителям, реализуя в значительном объеме так называемые «специальные» лифты под условия и желания заказчика, а в сотрудничестве с ООО «ИксВелд» этот подход расширен предложением, по сути, произведения искусства – приятного для восприятия, но бескомпромиссно надежного в использовании. Сотрудничество ОАО «Могилевлифтмаш» и ООО «ИксВелд» можно назвать техноджазом – слаженная и результативная импровизация.

Послесловие

Сегодня перед производителями лежит целое поле инноваций, способных радикально изменить их традиционный уклад как в проектировании продукции, так и в ее изготовлении. Выбор технологии – непростая задача, особенно если заниматься ей самостоятельно. Выбор производственного партнера или комплексного интегратора, бережно сопровождающего предприятие на долгом и захватывающем пути покорения аддитивных технологий, – крайне ответственная задача. Выбор, конечно, есть всегда, и всегда можно плыть по течению, не вкладываясь в развитие, оставаться на месте, пока продукция продается, и медленно деградировать. Или же проявлять активность, изучая новые перспективные методы, обучая персонал, осторожно или оперативно внедряя новое инженерное мышление и скоростные технологии, которыми уже восторгается весь мир и передовые российские предприятия.

В конце хотелось бы привести статистику из отчета, подготовленного по данным 327 производителей в США, Германии и Японии исследовательской компани-

ей B2B International по заказу Materialise [34]. Согласно представленной информации, несмотря на сложности с внедрением, 3D-печать остается в списке приоритетов большинства предприятий. 78% компаний, внедривших 3D-печать, продолжают инвестиции в них, избегая при этом аутсорсинга, а 46% увеличат их использование как минимум в два раза.

Выбор должен быть очевиден для рачительных собственников, который уже сделали многие мировые и российские компании. Каким судьбоносным будет ваш?

Литература

1. Червяков Л.М., Шептунов С.А. Производственный процесс как киберфизическая система связей. ИКТИ РАН.
2. Лузин А.Е., Бабанова Ю.В. Постфордизм – три ключевые производственные парадигмы нового столетия // Менеджмент в России и за рубежом. 2013. № 6.
3. Трубашевский Д. С. Аддитивные зарисовки, или решения для тех, кто не хочет продолжать терять деньги. Воронеж: Умное производство, 2021. ISBN 978-5-600-02999-6 (<https://layerlogic.tech/services-2/book/>)
4. Умнов В.П. Построение, управление и моделирование роботизированных технологических комплексов гибридной обработки [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.П. Умнов, И.Н. Егоров. Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2023.
5. <https://www.addilan.com/en/>
6. <https://addupsolutions.com>
7. <https://aml3d.com>
8. <https://bigmetaladditive.com/>
9. <https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-6600-ded-hybrid>
10. <https://www.evobeam.com/en/home/>
11. <https://www.formalloy.com/>
12. <https://www.gefertec.de/en/>
13. <http://www.insstek.com/>
14. <https://additive.lincolnelectric.com/>
15. <https://meltio3d.com/>
16. <https://mx3d.com/>
17. <https://www.norsktitanium.com/>
18. <https://optomec.com/>
19. <https://www.primaadditive.com/en>
20. <https://www.relativityspace.com/>
21. <https://www.sciaky.com/>
22. <http://sotimeco.fr/>
23. <https://www.spee3d.com>
24. <https://titomic.com/>
25. <https://www.trumpf.com>
26. <https://www.waam3d.com/>
27. <https://xweld.ru/>
28. <http://www.ilwt-stu.ru/>
29. <https://kalashnikovgroup.ru>
30. <https://laserapr.ru/>
31. <https://www.irt-saintexupery.com/fr/depouz-project-lmd-demonstrator/>
32. <https://www.smtu.ru/ru/viewnews/5820/>
33. Трубашевский Д.С. 3D-печать полиметаллами. Вы готовы? // Аддитивные технологии. 2022. № 2. С. 28–36.
34. <https://www.materialise.com/en/news/press-releases/manufacturing-companies-3d-printing-struggle>

Эффективные кейсы для авиаиндустрии

Татьяна Карпова



Дмитрий Трубаевский, эксперт в области аддитивных и классических технологий производства, модератор конференции

Конференция «Аддитивные технологии в авиаиндустрии», организованная дирекцией выставки HeliRussia и компанией «Современное оборудование», традиционно продемонстрировала возможности 3D-печати, подтверждая актуальность ее внедрения в отрасли и возрастающую потребность в новых материалах и оборудовании, позволяющих получить эффективные решения в сжатые сроки. Большинство участников в докладах постарались не только рассказать о своих разработках и предлагаемой продукции, но и показать эффективные кейсы, чтобы помочь предприятиям и пользователям смелее смотреть на инновационные технологии.

Так, **Сергей Благин**, заместитель руководителя компании «ЗД ЛАЙФ», выпускающей промышленные 3D-принтеры для производства изделий методом FDM, привел примеры замены металла на композитные материалы в таких деталях малой авиации Волгоградской области, как крыльчатка распылителя, элемент подвесного оборудования, шкив ведомый привода транспортного средства, блок штурвала учебных классов, аэродинамические лопасти и вращающийся распылитель. Причем, например, фланец распылителя для малой авиации, выполненный с помощью FDM-печати из химически стойких полимеров (рис. 1), работает в течение всего

сезона, в то время как традиционный, изготовленный из алюминиевого сплава, выходит из строя через месяц.

Задачи, решаемые аддитивными установками компании на отраслевых предприятиях, включают:

1. Создание легких и прочных композитных или пластиковых изделий на замену металлическим, стойких к щелочам, кислотам, растворителям и высокой температуре.
2. Создание запасных частей и комплектующих для промышленного оборудования (шестеренки, втулки, корпуса, направляющие и т.п.).
3. Уменьшение веса летательных аппаратов.
4. Быстрое создание конструкторскими отделами прототипов новой техники.

В авиаиндустрии оборудование, материалы и технологии также могут быть использованы для защиты полимерных корпусов радиоэлектронной аппаратуры летательных аппаратов от воздействия мощных низкочастотных электромагнитных импульсов и пылевых потоков, снижения вибрации и повышения акустической комфортности в кабине экипажа или пассажирском салоне, изготовления сверхлегких деталей узлов сухого трения в авиакосмической отрасли и др.

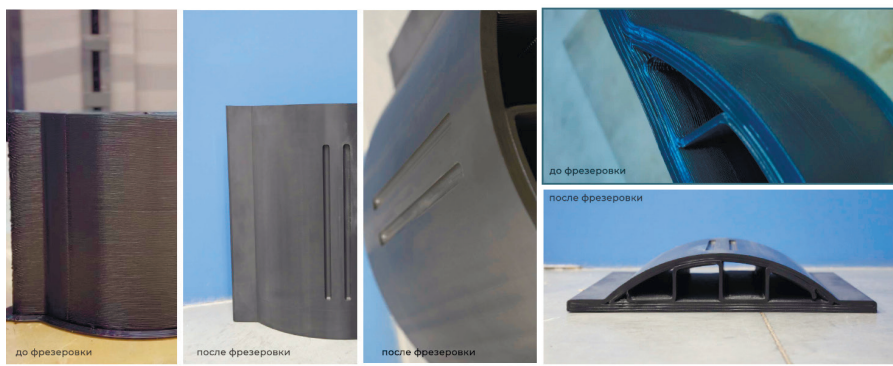
Евгений Матвеев, генеральный директор ООО «Ф2 Инновации», посвятил доклад теме 3D-печати крупногабаритной оснастки для холодной и горячей

Рис. 1. Фланец распылителя для малой авиации, выполненный с помощью FDM-печати из химически стойких полимеров. Фото из презентации ООО «ЗД ЛАЙФ»



ФЛАНЕЦ РАСПЫЛИТЕЛЯ ДЛЯ МАЛОЙ АВИАЦИИ ИЗ ХИМИЧЕСКИ СТОЙКИХ ПОЛИМЕРОВ

Рис. 2. Пуансон для выкладки композита вакуумной инфузией. Фото из презентации ООО «Ф2 Инновации»

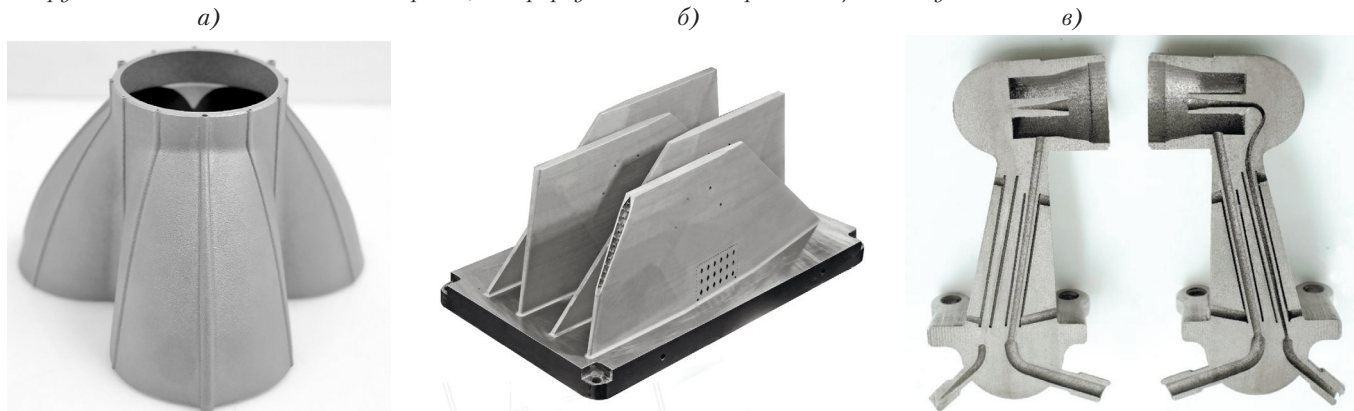


выкладки композитов с использованием оборудования, производимого компаниями. Среди представленных кейсов: обтяжной пуансон для вытяжки панели крыла ТУ-214 (вес 50 кг, материал — PETG, время печати — 18 часов, габариты — 700×500×250 мм, напечатан на 3D-принтере F2 Pellet); пуансон для выкладки композита вакуумной инфузией — рис. 2 (вес — 30 кг, материал — Ether (PETG+GF), время печати — 5 часов, габариты — 900×500×250 мм, напечатан на 3D-принтере F2 Gigantgy); полимерная оснастка для литья по выжигаемым моделям (единичное изготовление или мелкосерийное производство) и др.

Феликс Шамрай, директор компании «Тринити-Тех» (Группа «Моментум»), показал возможности WAAM-технологии для вертолетостроения и высказал мнение, что для всех типов серийности технология производства металлических заготовок по данной технологии обеспечивает лучшие свойства, отсутствие брака, меньшую себестоимость по сравнению с литыми заготовками (рис. 3). А более прочная сталь и возможность применения бионического конструирования открывают возможность снижения веса деталей до двух раз.

Дмитрий Филиппов, руководитель Центра инжиниринга SIU System, привел примеры изделий, выполненных на оборудовании компании Farsoon (КНР), среди которых: рулевые части летательного аппарата с

Рис. 4. Изделия, выполненные на оборудовании компании Farsoon (КНР): а — рулевая часть летательного аппарата, б — рулевая часть летательного аппарата; в — форсунка. Фото из презентации SIU System



облегченной структурой — рис. 4а (3D-принтер — Farsoon FS273M, материал для демонстрации — FS 316L) и рис. 4б (3D-принтер — Farsoon FS721M-8, материал — FS IN718; габариты изделия — 665×55×252 мм, время печати — 130 часов, толщина слоя — 0,03 мм); форсунка для впрыска топлива — рис. 4в (3D-принтер — Farsoon FS271M, материал — IN718, время печати — 53 часа) и др. В результате 3D-печати решались вопросы оптимизации толщины стенок, уменьшения количества деталей в конструкции, снижения перегрева, повышения производительности, снижения стоимости и веса, увеличения срока службы изделия и др.

Артем Лобач, технический директор ООО «ОНСИНТ», представил обновленную линейку оборудования компании, работающего по SLS- и SLM-технологиям. SLM-направление развивается в компании с 2022 года. Младшая модель оборудования — ONSINT AM150 с зоной построения Ø150мм×200мм, старшая модель — многолазерная система ONSINT AM350 с зоной построения 350×350×400 мм. Компания использует в оборудовании качественные комплектующие, делая ставку на производительность, надежность, низкую стоимость владения.

Артем Лобач, технический директор ООО «ОНСИНТ», представил обновленную линейку оборудования компании, работающего по SLS- и SLM-технологиям. SLM-направление развивается в компании с 2022 года. Младшая модель оборудования — ONSINT AM150 с зоной построения Ø150мм×200мм, старшая модель — многолазерная система ONSINT AM350 с зоной построения 350×350×400 мм. Компания использует в оборудовании качественные комплектующие, делая ставку на производительность, надежность, низкую стоимость владения.

Рис. 3. Кронштейн 800.00.1925.0541 узла перекоса лопасти, выполненный по технологии WAAM. Фото из презентации компании «ТринитиТех»

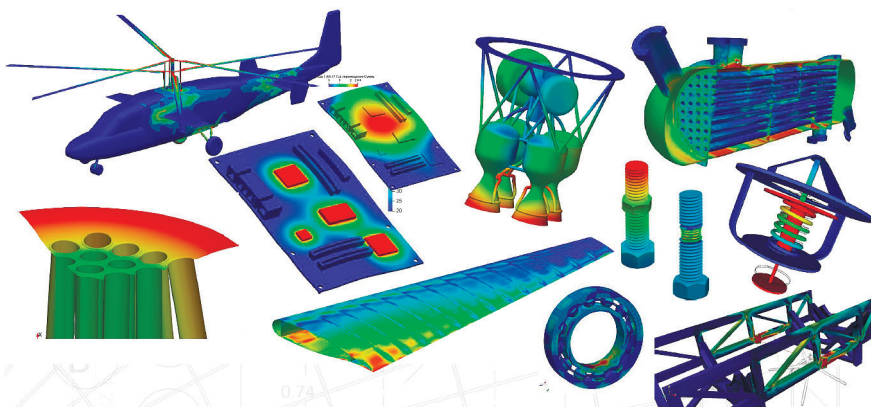


Вячеслав Попов, руководитель направления внедрения и технического сопровождения разработок ООО «Фидесис», рассказал о применении для аддитивного производства программного комплекса CAE Fidesys (рис. 5). Среди функционала ПО: создание 3D-модели, оптимизация различных параметров изделия, симуляция процесса для оценки НДС, оценка НДС, подготовка параметров и настройка принтера, моделирование производства и др.

Мария Еремкина, аспирант кафедры 205 Московского авиационного института, остановилась на вопросах повышения ресурса деталей авиационной и ракетно-космической техники, полученных методом селективного лазерного сплавления, и, в частности, привела пример нанесения покрытий Ni-P методом оксидирования для снижения износа и защиты от коррозии изделий из AlSi10Mg.

Филипп Чураков, руководитель проекта корпорации развития Зеленограда, рассказал о возможностях бесплатного онлайн-сервиса «Фабрика прототипов» на i.moscow, позволяющего найти проверенного испол-

Рис. 5. Задачи, решаемые Fidesys. Фото из презентации ООО «Фидесис»



нителя для разработки, изготовления, сертификации, испытания в области аддитивного производства.

Прозвучавшие доклады подтверждают неуклонное развитие аддитивных технологий для задач авиаиндустрии и появление опытных компаний, которые готовы к реализации сложных проектов совместно с заказчиками для достижения максимальной эффективности.

Видеозапись конференции:

https://www.youtube.com/watch?v=sbgjF_dwJHI



У МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА И СМЕЖНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Время проведения **13–16 ноября 2023 г.**
Место проведения **Cosmos Izhevsk Hotel**
Россия, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Бородина, д. 25

Цель конференции: представление и обсуждение новейших научно-технических достижений в области электронно-лучевой обработки (сварки, наплавки, термообработки, нанесения покрытий и т.п.), аддитивного производства, диагностики и контроля материалов.

Основные разделы программы проведения конференции

- Физические процессы при обработке концентрированными потоками энергии.
- Технологии электронно-лучевой сварки, наплавки, термообработки, нанесения покрытий и др.
- Аддитивные технологии.
- Оборудование для электронно-лучевой обработки.
- Сварочное материаловедение, прочность, контроль и диагностика сварных соединений.

Условия участия

1. Заявка для участия с докладом/без доклада до **15 октября 2023 г.**
2. **Участие в конференции: бесплатное**, регистрационный взнос не предусмотрен.
3. Русскоязычные доклады конференции, успешно прошедшие рецензирование, будут размещены в Научной электронной библиотеке (НЭБ) – elibrary.ru, интегрированной с Российским индексом научного цитирования (РИНЦ).
4. **Официальный язык** конференции: **русский и английский**.
5. **Проживание:** участники конференции могут забронировать места в гостиницах г. Ижевска по предварительному согласованию с оргкомитетом конференции либо сделать это самостоятельно. О бронировании гостиницы в Ижевске через оргкомитет нужно сообщить до 30 сентября 2023 г.

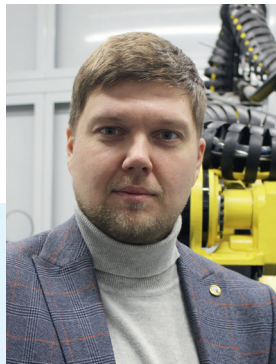


Контакты: тел. +7 (495) 362-70-48 / +7 903-717-90-25, e-mail: ebw2023@mail.ru, сайт: <http://ebw.mpei.ru>

Прямое лазерное выращивание металлокерамических покрытий



А.Г. Маликов



А.А. Гольшев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича Сибирского отделения
Российской академии наук (ИТПМ СО РАН),
630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, e-mail: smalik@ngs.ru

Введение

В настоящее время многие отрасли производства испытывают потребность в применении новых материалов, характеризующихся высокими эксплуатационными свойствами. В аддитивных технологиях большой интерес вызывают исследования по применению керамических частиц в качестве модифицирующих добавок с целью изменения структурно-фазового состояния и повышения механических свойств авиационных сплавов. Введение керамического порошка в расплав формирует функционально-градиентную структуру (ФГМ), в которой металлическая матрица является основой [1]. В данных материалах удается достигнуть высокого сопротивления ударному разрушению благодаря вкладу внутренних и внешних механизмов. Внутренние механизмы связаны с микроструктурой материала (размер зерна, состояние границ зерен, расположение частиц и образование вторичных фаз и т.д.), все остальные факторы, приводящие к повышению ударной вязкости, относят к внешним механизмам.

Большинство ФГМ являются структурами, усиленными (армированными) частицами (или слоями) более прочной фазы. Теплофизические и механические свойства ФГМ зависят от состава, формы частиц, размера и распределения упрочняющей фазы в матрице. Для изготовления ФГМ в настоящее время широко применяются высокопрочные стали, алюминиевые и титановые сплавы и различного типа керамика.

На сегодняшний день аддитивное производство является приоритетной технологией изготовления ФГМ. Особенно перспективными направлениями являются методы селективного лазерного плавления (SLM) и прямого лазерного выращивания (DMD) металло-

матричных композиций, которые позволяют получить переход между слоями ФГМ путем изменения типа подаваемого порошка [2]. Тем не менее, поскольку теплофизические и прочие свойства создаваемых слоев имеют существенные различия, то во время процесса получения ФГМ методом SLM возникает много проблем, связанных с микроструктурой, морфологией и физическими свойствами межфазового интерфейса.

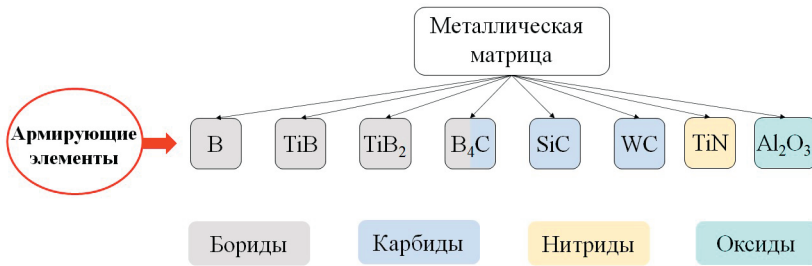
Использование материалов с одинаковым типом кристаллической решетки обеспечивает хорошую растворимость фаз в области межфазового интерфейса, что отмечается для ФГМ на основе стали инконель.

Например, повышение износостойкости и твердости легких металлических материалов, таких как алюминий (Al) и титан (Ti), позволило бы использовать их в принципиально новых областях, особенно в автомобильной и аэрокосмической промышленности [3]. Добавление керамических частиц позволяет получать материалы, способные удовлетворить большинство промышленных требований. Такие материалы известны как металломатричные композиты ММК или металлокерамические композиты МКК (рис. 1). ММК позволяют сочетать уникальные физико-механические свойства, такие как: низкая плотность, низкий коэффициент теплового расширения (КТР), высокая твердость, повышенная износостойкость и т.д.

В зависимости от температуры металлической матрицы ММК могут быть сформированы следующими способами:

1. Жидкофазные процессы (различные типы литья и инфильтрация).
2. Твердофазные процессы (прессование и спекание, диффузионная сварка и сварка трением с перемешиванием и т.д.).

Рис. 1. Металломатричные композиты



3. Различные технологии напыления (лазерное и плазменное напыление, холодное газодинамическое напыление, напыление взрывом и т.д.).

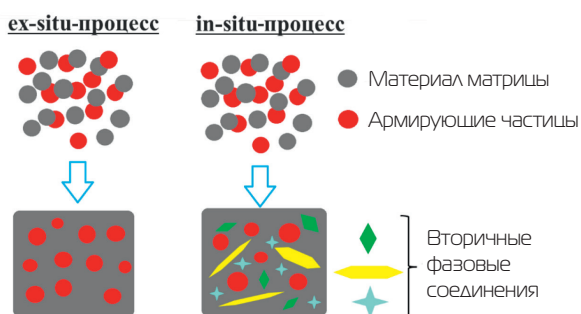
4. Методы с применением in-situ-реакции, при которой армирование формируется в процессе изготовления.

Традиционные подходы используются для создания деталей с простой геометрией. Однако, как правило, они не подходят для создания деталей сложной формы. Использование технологий аддитивного производства (АП) позволяет создавать детали с уникальным геометрическим дизайном [4]. В результате детали, сформированные технологиями АП, характеризуются меньшим весом в сочетании с более высокими прочностными свойствами.

Как правило, в качестве армирующих элементов используется разного типа керамика (оксиды, нитриды и карбиды), тогда как в качестве матричных материалов применяются сплавы титана, магния, алюминия, меди и никеля. В зависимости от характера формирования армирования металлокерамические материалы классифицируются как ex-situ- и in-situ-композиты (рис. 2). В ex-situ композитах введение различных керамических частиц, таких как B_4C , WC, TiC, Al_2O_3 и т.д., происходит непосредственно в металлическую матрицу или ванну расплава. В in-situ-композитах армирующие частицы синтезируются в самой матрице путем химических реакций между элементами [5].

Основным недостатком ex-situ-ММК является ограничение размера армирующей фазы, а также плохая смачиваемость между частицами и матрицей. Физические и механические свойства ММК в первую очередь опре-

Рис. 2. Схема формирования ex-situ- (а) и in-situ-композитов (б)



деляются размером и объемной долей армирования. Однородное распределение мелкодисперсных и термостабильных керамических частиц в металлической матрице желательно для достижения оптимальных механических свойств ММК. Таким образом, необходима разработка принципиально новых ММК, армированных in-situ-методом, в котором армирующие частицы синтезируются в металлической матрице в результате химической

реакции между элементами во время изготовления композита. Возможность произвольного протекания той или иной реакции определяется величиной энергии Гиббса [6]. Энергия Гиббса (ΔG) представляет собой максимальное значение энергии, которое доступно для выполнения полезной работы в результате химической реакции. Таким образом, химическая реакция протекает лишь в случае $\Delta G < 0$, т. е. в условиях, когда свободная энергия получаемых соединений меньше по сравнению с исходными компонентами. На рис. 3 представлена схема формирования металломатричного композита ВТ-6- B_4C в результате in-situ-синтеза.

ММК, армированные in-situ-методом, обладают многими преимуществами по сравнению с ММК, армированными ex-situ-методом:

- а) армирование термодинамически стабильно и приводит к меньшей деградации при повышенных температурах;
- б) сильная межфазная связь между матрицей и армированием из-за чистого интерфейса матрица — армирование;
- с) лучшие физические и механические свойства благодаря однородному распределению мелкозернистого армирования в матрице.

Использование технологии in-situ является перспективным способом формирования композитов как с технической точки зрения, так и экономических соображений. ММК с in-situ-армированием позволяют достигнуть лучших физических и механических свойств ввиду лучшего управления размером и уровня армирования, а также поверхности раздела матрица — армиро-

Рис. 3. Схема формирования металломатричного композита ВТ-6- B_4C в результате in-situ-синтеза

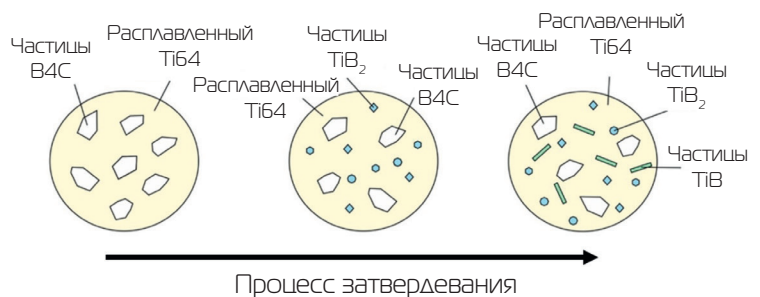
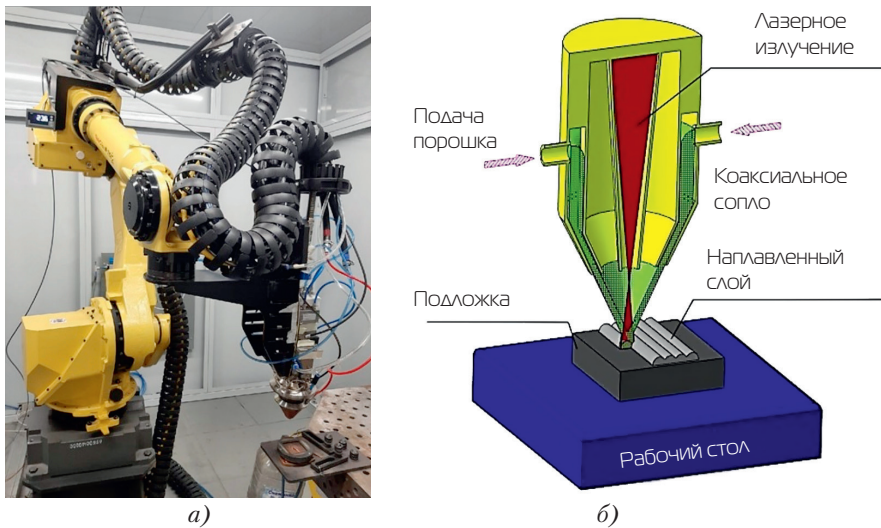


Рис. 4. Фотография АЛТК (а) и схематическое изображение процесса прямого лазерного осаждения металла (б)



нием остальных либо пренебрегают, либо по возможности учитывают в упрощенной постановке.

Становится актуальным экспериментальный поиск оптимальных условий получения качественных функциональных изделий с помощью аддитивных технологий.

Методология и результаты исследований

В ИТПМ СО РАН развивается лазерная микрометаллургия, включающая процесс прямого лазерного выращивания и процесс *in-situ*, зависящий от системы легирования сплавов и керамик, теплофизических свойств, режимов затвердевания, конвективного переноса расплава, быстротекучего локального неравновесного нагрева плавления и последующей кристаллизации материала, скорости охлаждения.

Изготовление градиентных модульных конструкций проводилось с помощью автоматизированной лазерной технологической установки. Лазерная установка включает в себя иттербиевый волоконный лазер фирмы IPG Photonics с длиной волны излучения 1,07 мкм и мощностью до 3 кВт (рис. 4а), роботизированную руку фирмы Fanuc, порошок дозатор Oerlikon Metco, наплавочную головку Precitec [7].

В качестве технологии выращивания была выбрана методика прямого лазерного осаждения, при которой порошок подается через специальное сопло, образуя локальную ванну жидкого расплава (рис. 4б). Данный метод благодаря более высокой скорости сканирования и охлаждения позволяет уменьшить влияние градиента температур и формирования вторичных фаз в зоне соединения. В качестве газа-носителя и защитной среды использовался аргон.

На рис. 5 и 6 приведены фотографии получаемых покрытий на основе титанового и никелевого сплава и керамик WC, B4C.

вание. Механические и физические свойства композитов с металлической матрицей в основном определяются свойствами матрицы, дисперсией армирования, межфазным сцеплением между матрицей и армированием и методом обработки. Использование лазерного излучения для формирования ММК с *in-situ*-армированием открывает новые горизонты для создания многофункциональных композитов с металлической матрицей, которые трудно получить с помощью традиционных производственных процессов. ММК могут быть получены либо реакцией *in-situ* между элементами порошковой смеси, либо реакцией *in-situ* между порошковой смесью и химически активными газами (азот, кислород и др.) во время лазерной обработки.

При практическом использовании аддитивных технологий необходимо знать, как зависят оптимальные параметры процесса, прежде всего — мощность лазерного излучения и скорость перемещения, размер фокального пятна, от объема расплавляемого материала. Это важно знать как при выборе лазера в соответствии с производственными потребностями и при оценке его производительности, так и при практической работе. Поэтому выбор технологических параметров актуален на сегодняшний момент.

В большинстве теоретических работ на эту тему используются принцип ограниченного моделирования. Выбирается один основной процесс, а влия-

Рис. 5. Фотография внешнего вида покрытия В4С – Ti64

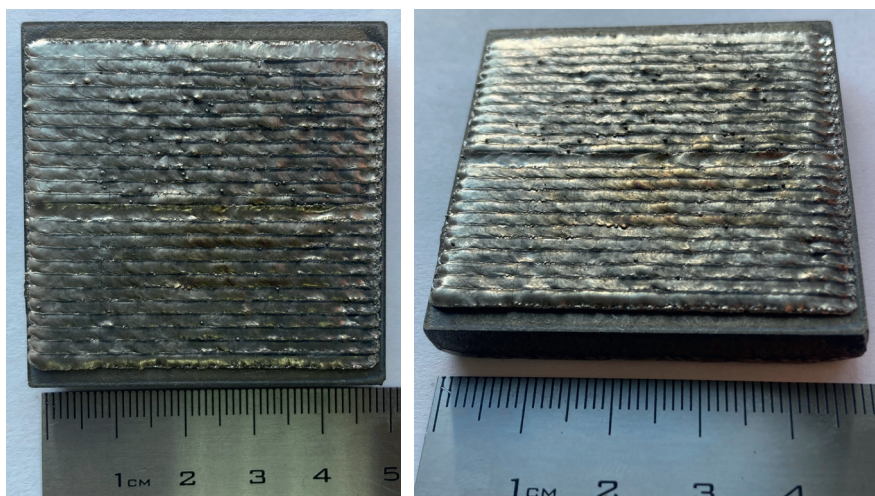
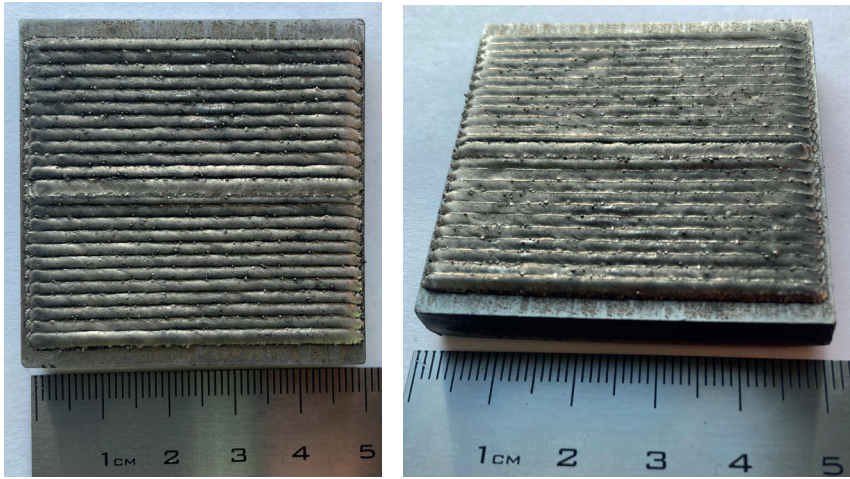


Рис. 6. Фотография внешнего вида наплавленного покрытия WC – NiCrSiB



На рис. 7 представлены изображения поперечных шлифов ММК, полученных с помощью электронного микроскопа при разном увеличении [8]. Получено, что наплавленный материал имеет сложную развитую микроструктуру. Исходные керамические частицы окружены вторичными фазами (вискерами и субмикронными частицами), образованными в результате экзотермической реакции между карбидом бора и титаном (TiB, TiB₂, TiC).

Рис. 7. EDX-изображение микроструктуры образца В4С – ВТ6 с соотношением 1:9% масс

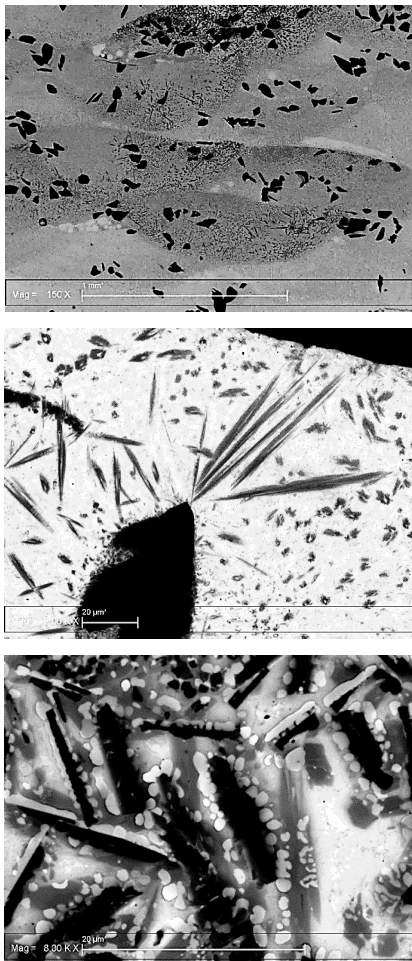


Рис. 8. Микротвердость (а) и износостойкость (б) образцов при разной концентрации карбида вольфрама

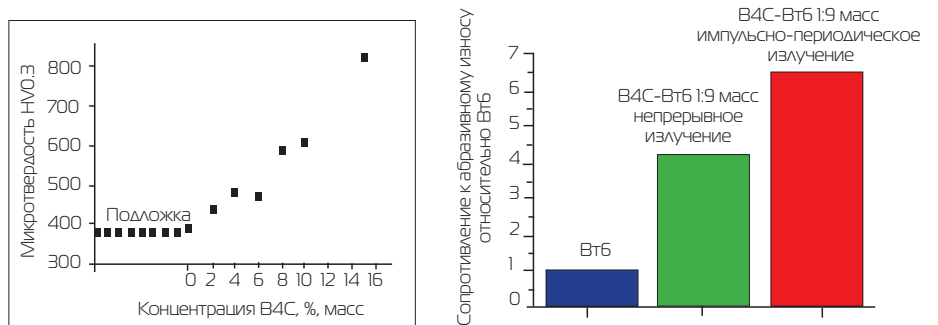
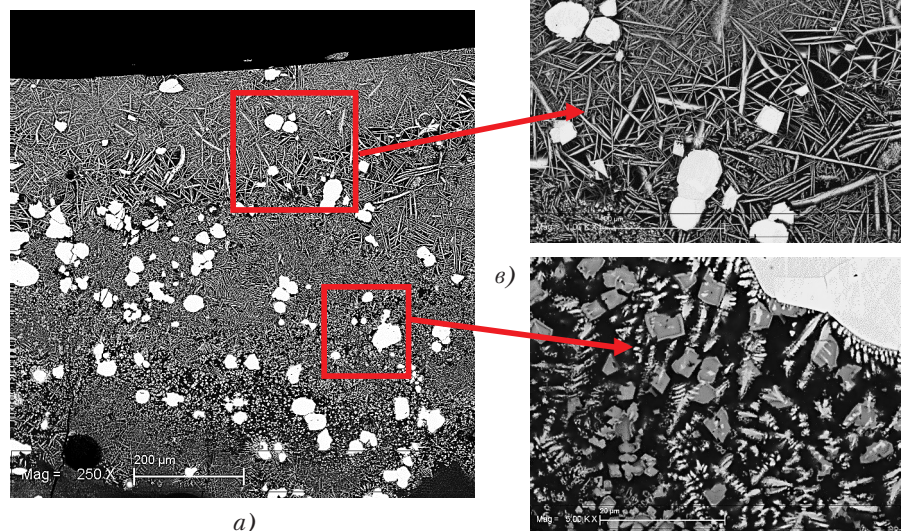


Рис. 9. СЭМ-изображение образца NiCrSiB + WC 6:4 масс



На рис. 8а представлена зависимость микротвердости от концентрации керамики в порошковой смеси. В данном случае используется усреднённая микротвердость по 10 измерениям в разных точках по всему образцу. Видно, что с увеличением концентрации керамики микротвердость возрастает. Исследование износостойкости проводилось для двух образцов: ВТ6 и В4С – ВТ6 с соотношением 1:9% масс. Получено, что образец с содержанием карбида бора 10% масс в 4,2 и в 6 раз обладает большим сопротивлением к износу по сравнению с образцом без керамики в зависимости от выбранного типа лазера.

На рис. 9 представлена микроструктура образца NiCrSiB + WC 4:6 масс, полученная с помощью электронного микроскопа [9]. На рис. 6 видно, что формируются продолгова-

тые висеры в результате химической реакции между металлической матрицей и армирующими частицами (CrB , $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$ и Cr_{23}C_6).

На рис. 10а представлена зависимость микротвердости от концентрации керамики в порошковой смеси. Видно, что с увеличением концентрации карбида вольфрама микротвердость возрастает и составляет более чем $1000\text{HV}_{0,3}$ для 40% NiCrBSi – 60% WC покрытия. Это объясняется тем, что в процессе лазерного воздействия в ванне расплава могут образовываться вторичные армирующие фазы типа Ni_2B , CrB , Ni_5Si_3 , $\text{Ni}_{13}\text{Si}_{12}$, Ni_3Si , $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$ и Cr_{23}C_6 . Измерение износостойкости показало, что покрытие с добавлением керамики 40% позволяет в 2,5 раза уменьшить износ по сравнению с покрытием без керамики.

Заключение

В ИТПМ СО РАН проведены передовые исследования по выращиванию различного типа модульных биметаллических и металлокерамических структур с повышенным содержанием керамики методом прямого лазерного выращивания. Созданы объемные модульные композитные материалы с минимальными дефектами, и исследовано влияние состава исходного порошка на структурно-фазовый состав и механические свойства формируемых покрытий. Показано, что добавление керамических частиц резко повышает механические характеристики формируемых покрытий, микротвердость, абразивный износ. ■

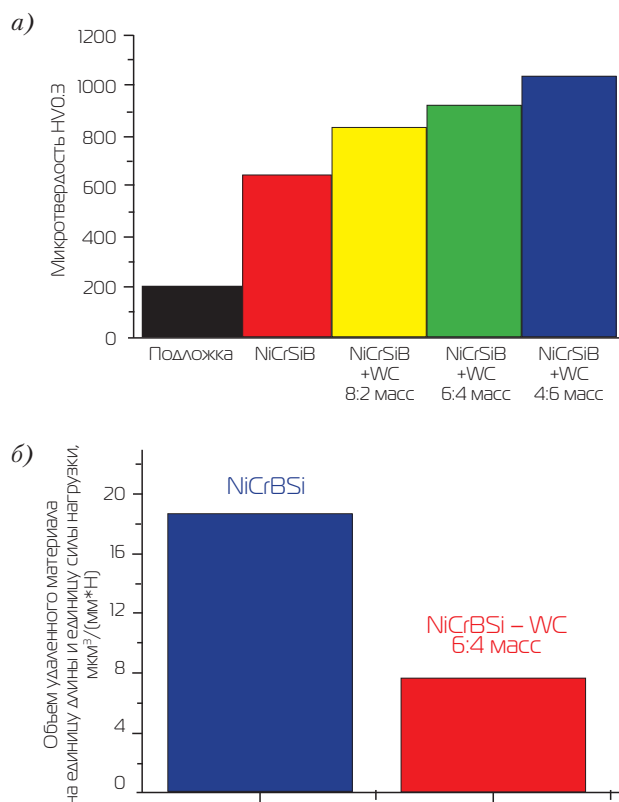
Благодарность

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2023 гг. (код проекта 121030900259-0).

Литература

1. Голышев А.А. Аддитивное производство in-situ армированных композитов с Металлической матрицей (обзор) / А.А. Голышев // Композиты и наноструктуры. 2022. Т. 14. № 2(54). С. 93–116. DOI 10.36236/1999-7590-2022-14-2-93-116
2. Маликов А.Г. Современные тенденции лазерной сварки и аддитивных технологий (обзор) / А. Г. Маликов, А. А. Голышев, И. Е. Витошкин // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64. № 1(377). С. 36–59. DOI 10.15372/PMTF202215159
3. Голышев А.А. Влияние керамического волокна SiC в металломатричном композите на его стойкость при высокоскоростном нагружении / А. А. Голышев, С. В. Долгова // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63, № 6(376). С. 145–149. DOI 10.15372/PMTF20220616
4. Фомин В. . Создание функционально-градиентного материала методом аддитивного лазерного сплавления / В. М. Фомин, А. А. Голышев, А. Г. Маликов [и др.] // При-

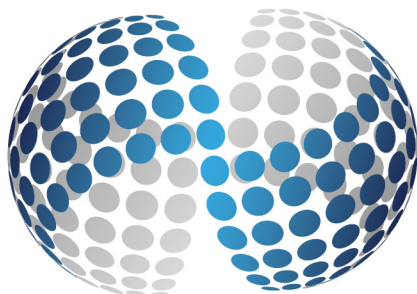
Рис. 10. Микротвердость (а) и износостойкость (б) образцов при разной концентрации карбида вольфрама



кладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61, № 5(363). С. 224–234. DOI 10.15372/PMTF20200523

5. Фомин В. М. In-situ-синтез в процессе прямого лазерного выращивания функционального градиентного материала на основе поликристаллического бора и сплава Ti64 / В. М. Фомин, А. Г. Маликов, А. А. Голышев [и др.] // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25. № 4. С. 34–43. DOI 10.55652/1683-805X_2022_25_4_34
6. Голышев А.А. Влияние параметров лазерного воздействия на формирование ванны расплава металлокерамической смеси В4С – Ti-6Al-4V / А. А. Голышев, А. М. Оришич // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63, № 2(372). С. 104–116. DOI 10.15372/PMTF20220210
7. Голышев А.А. Исследование микроструктуры и механических свойств (TiB + TiB2 + TiC)/Ti-6Al-4V композитного материала, сформированного в процессе in-situ синтеза при SLM / А.А. Голышев, А.Г. Маликов, В.М. Фомин [и др.] // Инженерно-физический журнал. 2022. Т. 95. № 7. С. 1851–1857.
8. Фомин В.М. Создание гетерогенного материала на основе титанового сплава и борида титана методом управляемого лазерного воздействия / В. М. Фомин, Т. А. Брусенцева, А.А. Голышев [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. 2021. Т. 62. № 5(369). С. 58–67. DOI 10.15372/PMTF20210506
9. Golyshev, A. Effect of Repetitively Pulsed Laser Radiation on the Morphology, Microstructure and Mechanical Properties of WC – NiCrBSi Coatings Obtained by Laser Surface Cladding / A. Golyshev, N. Bulina, M. Gulov // Lasers in Manufacturing and Materials Processing. 2022. Vol. 9, No. 4. P. 590-609. DOI 10.1007/s40516-022-00193-3.

Проект аддитивных технологий
в промышленности в рамках
выставки RUPLASTICA



Additive Minded

23-26 янв
2024
МОСКВА
РОССИЯ

23–26.10.2023

ТЕХНОФОРУМ



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



www.technoforum-expo.ru

«Оборудование
и технологии
обработки
конструкционных
материалов»

Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

Реклама



12+

ЭКСПОЦЕНТР