



5 шагов для компенсации
технологических деформаций

REDITIVE.COMPENSATION

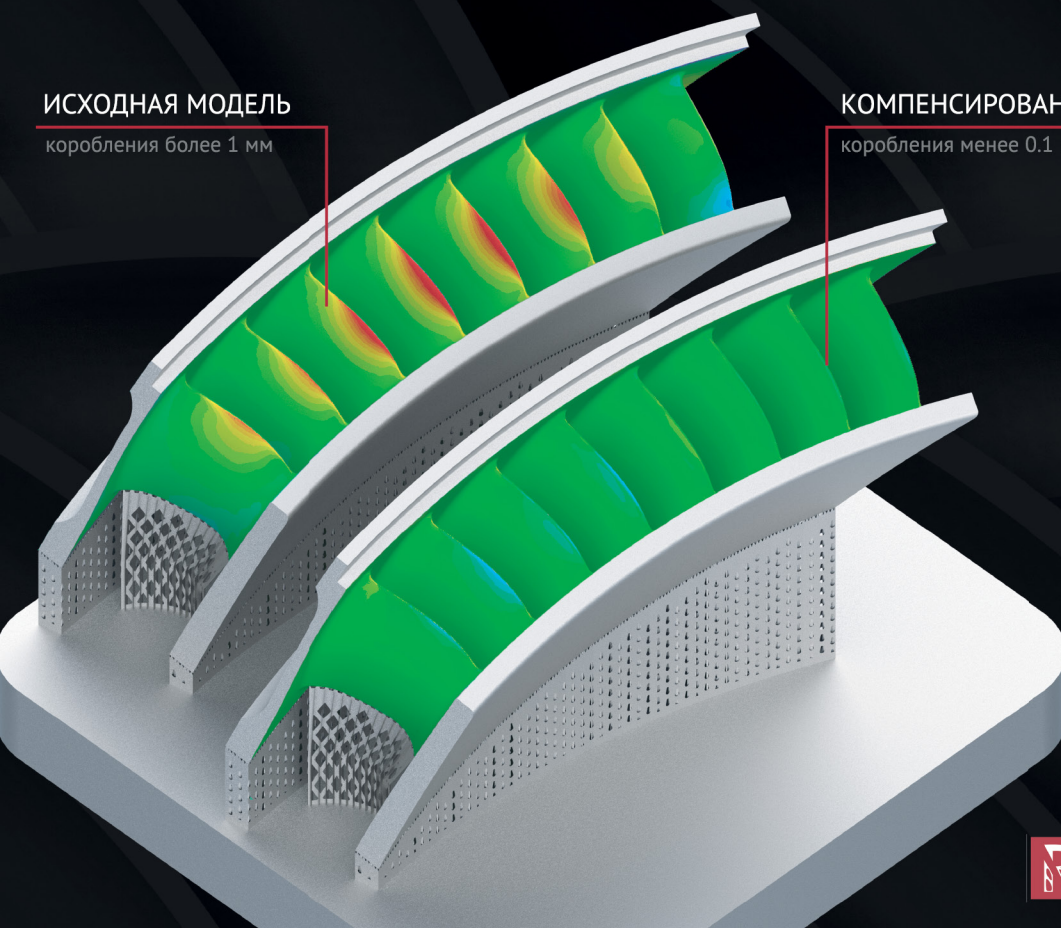
РЕШЕНИЕ ОДНОЙ ИЗ ГЛАВНЫХ ПРОБЛЕМ
АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ —
ДЕФОРМАЦИИ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ

ИСХОДНАЯ МОДЕЛЬ

коробления более 1 мм

КОМПЕНСИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ

коробления менее 0.1 мм



Импорт исходной
и фактической модели



Создание карты
отклонений



Настройка параметров
расчета компенсации



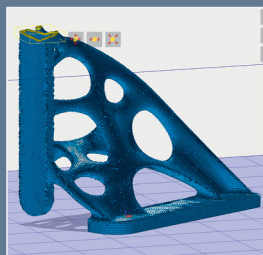
Предеформация
модели



Экспорт отчета
и компенсированной модели

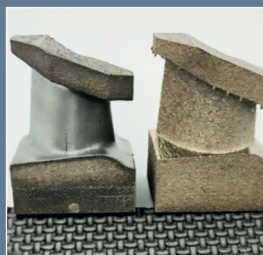


8 800 600-1-678 |
reditive.ru |
in@reditive.ru |



Неплоский
слайсинг

34



Электрохимическая
обработка изделий
аддитивного
производства
из металлов и
сплавов

49



АТ в медицине:
перспективы
развития,
ближайшие
ориентиры

58

SLS 3D-принтеры: печать полимерами



ONSINT SM400
«Высокопроизводительный»



ONSINT SM300
«Промышленный»



ONSINT SM200
«Настольный»

SLS (Selective Laser Sintering – послойное лазерное спекание) – технология, позволяющая получить точные детали сложной геометрической формы из пластиковых порошков. Высокая производительность, отсутствие слоистости, отсутствие поддержек

SLM 3D-принтеры: печать металлами

SLM (Selective Laser Melting) системы ONSINT – эффективное решение для аддитивного производства металлических изделий, позволяющее печатать детали из стали, алюминия и титана в среде инертного газа.

ONSINT AM350



ONSINT AM150



LightCLEAN

ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА

ИГРЫ КОНЧИЛИСЬ. ЧИСТИТ ВСЁ!



Мощность лазера
до **1000 Вт**

Ширина обработки
до **100 мм**

Фокусное расстояние
150 мм

Охлаждение
Воздушное

Вес
60 кг



ПРОИЗВОДСТВО И СЕРВИС НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

LightCLEAN – компактная и производительная система лазерной очистки. В систему интегрирован уникальный, мощный, импульсный волоконный лазер, который кратно повышает производительность обработки и даёт возможность дополнительных, тонких настроек технологического процесса, что позволяет производить очистку загрязнённой поверхности без её оплавления. Удобный промышленный дизайн и предустановленные режимы не требуют специальной квалификации оператора и позволяют сразу начать работу.

Преимущества LightCLEAN:

- Лучший баланс габаритных размеров и производительности
- Очистка без оплавления и повреждения поверхности
- Предустановленные режимы и ручные настройки
- Производство, сервис и поддержка на территории РФ

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

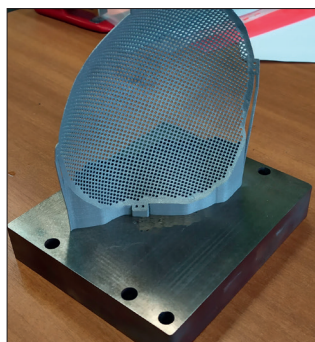
+7 (495) 968-99-32; sales@ntoire-polus.ru

www.ipgphotonics.com





16



26



46

СОДЕРЖАНИЕ

- 6** REDITIVE.COMPENSATION. Программное обеспечение для увеличения точности 3D-печати
- 12** Практическое исследование усадки 3D-печатных керамических деталей, изготовленных по DLP-процессу
- 16** Зеленоградские лазерные гении, или Новый символ 3D-печати
- 19** Двери ассоциации открыты для всех
- 22** Российский рынок оборудования для 3D-печати
- 26** Кто на новенького?!
- 30** Anisoprint: время развития и масштабирования
- 32** Рентгеновская компьютерная томография от Sanying — совершенный метод неразрушающего контроля в аддитивном производстве
- 34** Неплоский слайсинг
- 39** 3D-печать в литейном производстве как конкурентное преимущество
- 42** Методы машинного обучения в аддитивных технологиях
- 46** Сравнение традиционного и аддитивного методов изготовления направляющих аппаратов компрессора газотурбинного двигателя
- 49** Электрохимическая обработка изделий аддитивного производства из металлов и сплавов
- 58** Аддитивные технологии в медицине: перспективы развития, ближайшие ориентиры, долгосрочные цели
- 70** 3D-технологии в медицине



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.

СОЗДАВАЯ НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ,
КОНСТРУИРУЕМ БУДУЩЕЕ

ПРОИЗВОДСТВО ПОРОШКОВ из Ni, Ti сплавов методом PREP для аддитивных технологий





Совсем скоро откроется 23-я Международная специализированная выставка оборудования, приборов и инструментов для металлообрабатывающей промышленности — «Металлообработка-2023»

Количество подтвержденных участников уже достигло значений прошлого года, а продажи площадей превышают итоговые показатели выставки 2022 года более чем на 60%. По предварительным данным, в выставке примут участие более 900 компаний из 11 стран, а ожидаемое число посетителей превысит 40 000 человек.

На выставке вы сможете:

- найти альтернативных поставщиков металлообрабатывающей продукции, запасных частей, сервисных и инженеринговых услуг и много другого;
- узнать о тенденциях Индустрии 4.0, роботизации производства, инновациях отрасли, аддитивных технологиях и других новинках;
- найти инвесторов или новые перспективные проекты для вложения;
- увидеть оборудование от ключевых производителей отрасли в работе и самостоятельно оценить его эффективность;
- принять участие в мероприятиях деловой программы и узнать о текущих рыночных трендах от лучших спикеров и специалистов отрасли.

Среди экспонентов выставки этого года — крупнейшие компании из России, Турции, Индии, Республики Беларусь, Китая и других важнейших станкостроительных регионов: корпорация «Пумори», ассоциация станкоторговых компаний КАМИ, «Униматик», НТО «Ирэ-Полус», «Интервесп-М», «Балт-Систем», «Корлой РУС», ГК «ТСС», «Лазерный центр», научно-промышленная корпорация «Дельта-Тест», Липецкий станкозавод «Возрождение», «Лассард», «Норгау Рус-

ланд», Ajan Elektronik, Baykal, Sebora, Ermaksan, промышленная группа «ИнВент», «Дурма Русия», «Финвал», национальные экспозиции Китая, Республики Беларусь, коллективные региональные экспозиции Пермского края, Пензенской, Калужской, Липецкой и других областей.

Для многих станкостроительных компаний участие в выставке «Металлообработка-2023» — это не только способ получить конкурентное преимущество, но и обязательное условие сохранения позиций на рынке и дальнейшего развития. Комплектование выставки «Металлообработка-2023» подходит к финалу — 90% выставочной площади уже продано. Если ваша компания планирует участие со стендом, торопитесь оставить заявку на сайте!

В данный момент активно идет регистрация посетителей на выставку, количество пользователей, получивших билеты, уже в четыре раза превысило прошлогодние показатели. Прямо сейчас вы можете заполнить простую форму заявки на сайте мероприятия и получить свой электронный билет. Это поможет заранее спланировать посещение выставки и сделать его наиболее эффективным. ■



Ждем всех профессионалов станкоинструментальной промышленности на крупнейшем отраслевом событии — выставке «Металлообработка-2023»!

22-26 | 05 | 2023

Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



23-я международная
специализированная
выставка

МЕТАЛЛООБРАБОТКА

«Оборудование,
приборы и инструменты
для металлообрабатывающей
промышленности»



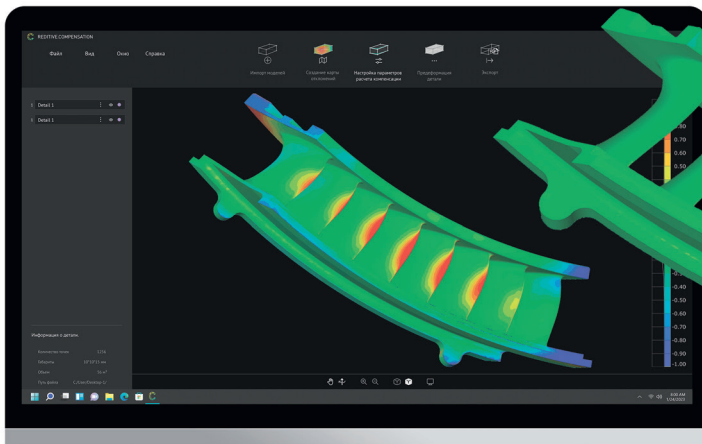
МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



www.metobr-expo.ru

12+ Реклама

ЭКСПОЦЕНТР



REDITIVE.COMPENSATION

Программное обеспечение для увеличения точности 3D-печати

ООО «КБ РЭДИТИВ»

Аддитивные технологии обладают множеством преимуществ перед механообрабатывающими и формообразующими методами производства. Достоинства 3D-печати заключаются в существенном снижении сроков и упрощении технологической цепочки производства, в возможности оптимизации конструкции и в увеличении эксплуатационных параметров детали.

Однако возникновение технологических деформаций в аддитивном производстве приводит к низкой точности конечных деталей и заготовок. Из-за этого увеличиваются срок, стоимость и трудоемкость их изготовления и постобработки. Таким образом, ключевые преимущества 3D-печати не реализуются.

В этой статье мы расскажем об основных методах предотвращения высоких короблений деталей, а также продемонстрируем собственную разработку для эффективного решения данной проблемы — REDITIVE.COMPENSATION©. Наше программное обеспечение

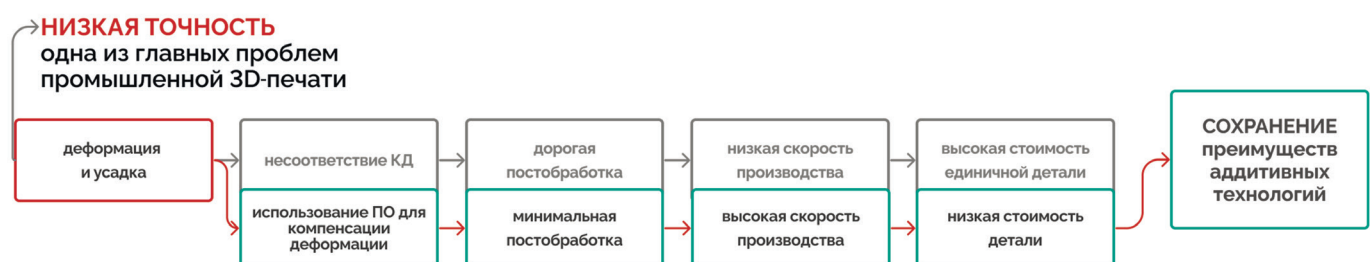
позволяет быстро и с минимальными усилиями решать проблемы технологических деформаций, как в металлической, так и в полимерной 3D-печати. REDITIVE.COMPENSATION© уже успешно применяется КБ «РЭДИТИВ» для снижения технологических деформаций в аддитивном производстве.

Технологические деформации в процессе аддитивного производства

В большинстве методов 3D-печати технологические деформации возникают из-за неравномерной усадки заготовки. Их интенсивность и неравномерность зависят от ряда факторов:

- тип используемой аддитивной технологии;
- режимы работы конкретной установки;
- конструкция и геометрия детали;
- последующие технологические операции.

Рис. 1. Влияние ПО для предеформации на эффективность аддитивного производства.



Технологических деформаций в процессе 3D-печати избежать невозможно. При этом они негативно сказываются на экономической и технологической эффективности аддитивного производства.

Дополнительный припуск, который может решить эту проблему, увеличивает стоимость и время 3D-печати заготовки, трудоемкость последующей механической обработки и износ инструмента. Технологические деформации на сложнопрофильных элементах конструкции, которые не имеют и не предполагают припуск для механической обработки, негативно влияют на геометрическую точность детали, ее прочность, аэродинамические и другие эксплуатационные характеристики.

Поэтому разработка методов снижения и предотвращения технологических деформаций является важной и актуальной темой для всей индустрии аддитивного производства.

Методы снижения технологических деформаций

На практике реализуются несколько способов предотвращения высоких короблений:

- метод технологической адаптации;
- метод предварительной деформации заготовки, где искажения модели в процессе 3D-печати не уменьшаются, а используются для смещения геометрического профиля до идеальной, номинальной формы. Для применения этого метода создается новая предварительно деформированная (предеформированная или скомпенсированная) модель заготовки.

Способы первой группы заключаются в оптимизации тепловложения и жесткости заготовки за счет ее положения, режимов 3D-печати, специальных конструктивных элементов (силовые пояса и ребра, теплоотводы). Это обеспечивает незначительное снижение короблений, но приводит к увеличению трудоемкости постобработки и удорожанию 3D-печати. Использование данного метода ограничено и не подходит для тонкостенных, сложнопрофильных деталей.

Метод предеформации является более эффективным и результативным (рис. 1). Он заключается в изменении исходной модели таким образом, чтобы возникающие в процессе 3D-печати технологические деформации, искажали геометрию детали до идеальной, требуемой формы. Получить предеформированную модель можно при помощи компьютерного моделирования аддитивного процесса или инверсией реальных отклонений.

Предеформация в REDITIVE.COMPENSATION© основана на продвинутых методах обработки результатов отклонений реальных деталей (рис. 2). Создание компенсированной заготовки происходит в несколько этапов:

- загрузка, анализ и выравнивание результатов отклонений (оптическое 3D-сканирование или компьютерная томография, формат STL) и номинальной CAD-модели (формат STL);
- создание и экспорт предеформированной модели.

Аналогичным образом происходит компенсация технологических деформаций в программах моделирования аддитивных процессов. Но у них есть ключевое отличие — деформированная модель вычисляется на компьютере при помощи специальных численных методов.

На данный момент используются следующие подходы компьютерного анализа 3D-печати: многоуровневое термомеханическое моделирование (ANSYS ADDITIVE©, FLOW-3D AM©, Autodesk Netfabb Simulation©), метод собственных деформаций (Oqton Amphyon©, Materialise Magics Simulation©, Simufact Additive©). Они достаточно корректно определяют деформации заготовок простейших форм, но в сложных случаях точность моделирования, а, следовательно, и эффективность предеформации снижается.

Это происходит из-за накопления ошибок на этапах гомогенизации поддержек (моделирование сложных периодических структур объемными элементами со специальными характеристиками), упрощения началь-

Рис. 2. Этапы компенсации технологических деформаций в REDITIVE.COMPENSATION©.

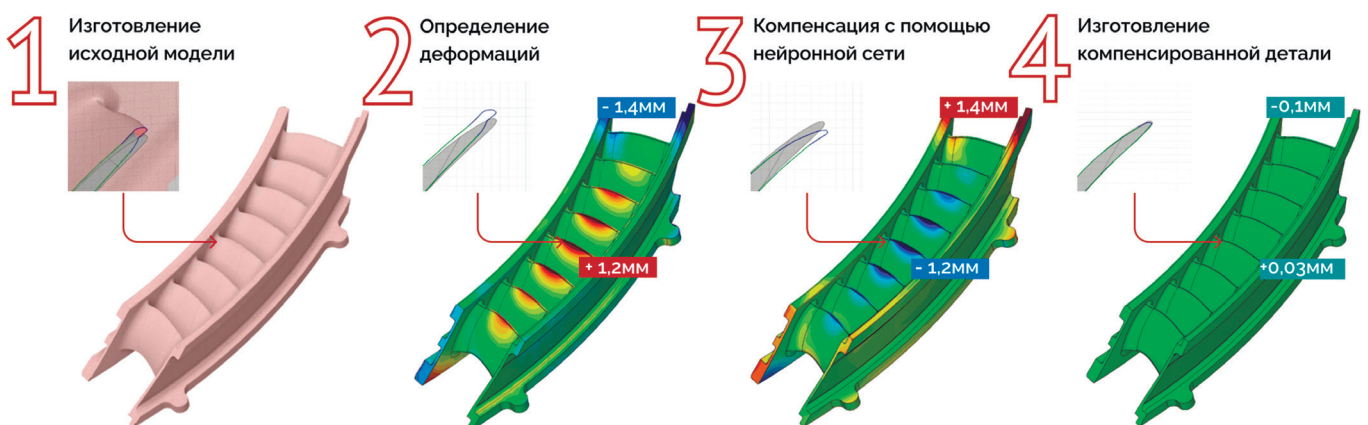
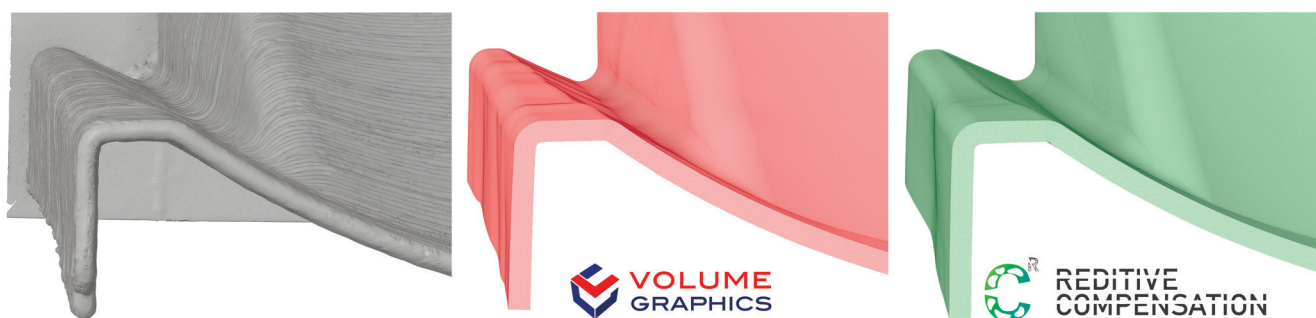


Рис. 3. Сравнение алгоритмов искажения компьютерной 3D-модели по результатам реальных отклонений, где REDITIVE.COMPENSATION© демонстрирует более точные и гладкие результаты аппроксимации исходных данных.



ных и граничных условий в механическом, тепловом или термомеханическом анализе процесса 3D-печати.

Сравнение REDITIVE.COMPENSATION© с конкурирующими решениями и подходами

Помимо нашего решения, метод предеформации по результатам реальных отклонений реализован в Volume Graphics© — программе для анализа и визуализации данных промышленной компьютерной томографии. В ходе тестирования и сравнения ПО на нескольких прикладных примерах мы определили, что REDITIVE.COMPENSATION© корректнее и точнее обрабатывает входные данные и создает предеформированную модель без геометрических ошибок.

Это обеспечивается за счет собственного алгоритма, в основе которого лежат методы машинного обучения, в частности нейронная сеть. Разработанная архитектура нейронной сети определяет общий характер деформации детали. При этом не учитываются локальные де-

фекты как самой заготовки (смещения, шероховатости, остатки от поддерживающих структур), так и дефекты 3D-сканирования (затененные зоны, несплошности, пустоты и другие). Благодаря этому, алгоритм точно вычисляет компенсированное состояние детали, а геометрия предеформированной модели имеет более сглаженные поверхности, чем у конкурентных решений (рис. 3).

В завершение сравнения выделим преимущества метода предеформации и ПО REDITIVE.COMPENSATION©:

- более высокая точность компенсации деформации для сложнопрофильных и крупногабаритных заготовок;
- процесс предеформации сокращается в разы, с нескольких дней до одного часа;
- для создания компенсированной модели не требуются опыт компьютерного моделирования, мощная вычислительная техника, большое количество исходных данных о материале и параметрах процесса;
- это полностью отечественная разработка.

Рис. 4. Результат предеформации на примере детали «корпус редуктора» (технология изготовления – SLM). Изображение слева – деталь, в центре – ее коробления до компенсации, справа – коробления после компенсации.

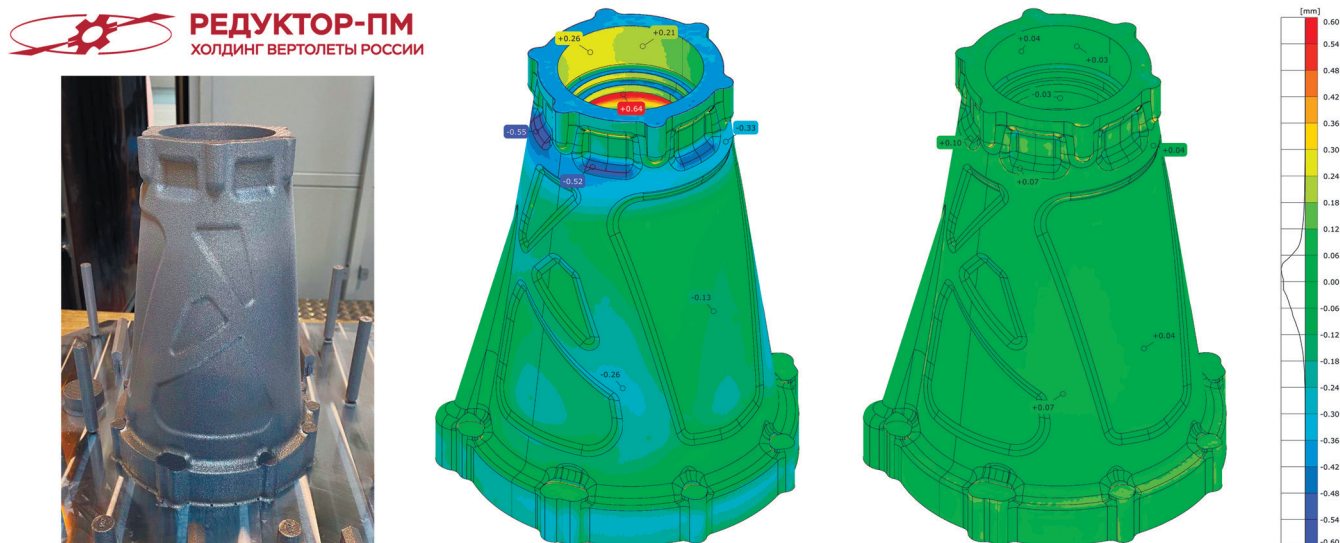
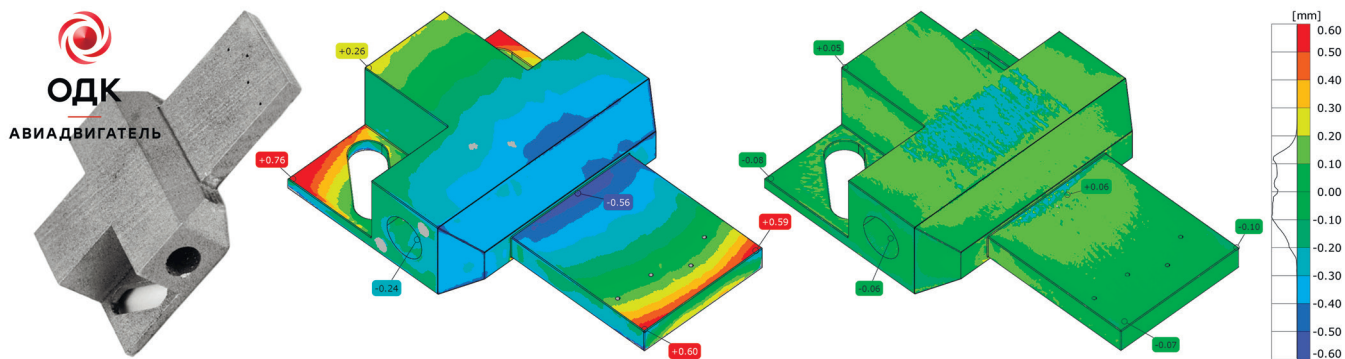


Рис. 5. Результат предеформации на примере детали «корпус датчика» (технология изготовления – SLM). Изображение слева – деталь, в центре – ее коробления до компенсации, справа – коробления после компенсации.



Примеры использования REDITIVE.COMPENSATION®

КБ «РЭДИТИВ» активно использует данный продукт в конструкторско-технологической подготовке аддитивного производства.

Первые пилотные проекты нашего решения: корпуса датчика (рис. 5) и редуктора (рис. 4), которые изготавливались по технологии SLM. Технологические деформации исходных конструкций превышали $\pm 0,6$ мм. После предеформации, коробления заготовок не превышали $\pm 0,1$ мм на ответственных поверхностях. Проекты выполнялись по заказу АО «ОДК-Авиадвигатель» и АО «Редуктор-ПМ».

Следующий сложный проект – предеформация крупногабаритных заготовок элемента авиационного двигателя (рис. 6). Первые партии изготавливались по технологии проволоочной наплавки из стали, а затем из титана. Из-за больших габаритов (высота заготовки – 900 мм) и сложного геометрического профиля в про-

цессе 3D-печати возникали высокие технологические деформации. Усложняла ситуацию термическая обработка. Она вносила дополнительные несимметричные коробления из-за особого расположения и фиксации заготовки в термопечи.

По завершении 3D-печати и термообработки максимальные технологические деформации титановой заготовки были около 10 мм. Предеформация, выполненная в REDITIVE.COMPENSATION®, позволила снизить технологические коробления до 2 мм. Благодаря этому припуск и, как следствие, материалоемкость заготовки, трудоемкость и стоимость постобработки были существенно снижены.

В результате скорость изготовления конечной детали сократилась с четырех месяцев до нескольких недель. Проект выполнялся по заказу АО «Пермский завод «Машиностроитель».

REDITIVE.COMPENSATION® может использоваться для снижения технологических деформаций и в полимерной 3D-печати. Это подтверждается со-

Рис. 6. Результат предеформации на примере крупногабаритной заготовки (технология изготовления – DED-W). Изображение слева – заготовка, в центре – ее коробления до компенсации, справа – коробления после компенсации.

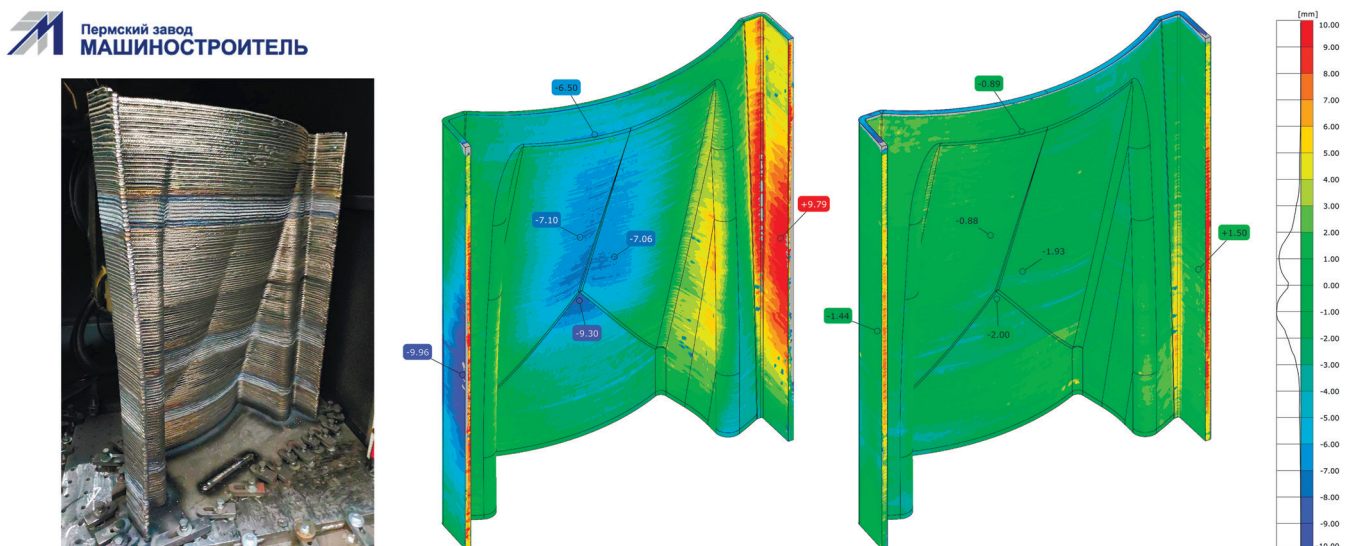
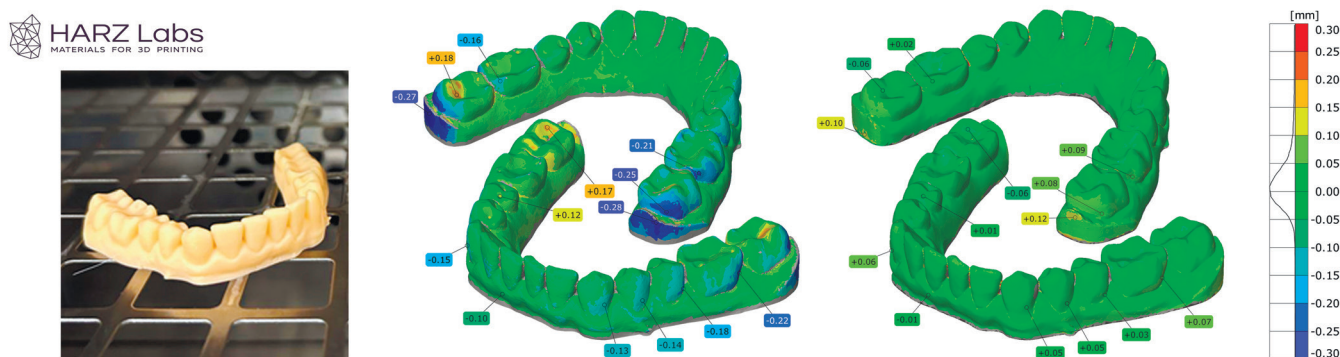


Рис. 7. Результат предеформации на примере стоматологической модели (технология изготовления – DLP). Изображение слева – модель, в центре – ее коробления до компенсации, справа – коробления после компенсации.



вместным проектом с Harz Labs (ведущий российский производитель фотополимеров для DLP/LCD и SLA 3D-принтеров), в котором удалось снизить технологические деформации стоматологических моделей для производства элайнеров более чем в два раза (рис. 7).

Проект, который невозможно реализовать без применения ПО REDITIVE.COMPENSATION©, – компенсация технологических деформаций деталей перспективного авиационного двигателя-демонстратора (рис. 8). Их коробления в процессе SLM 3D-печати были снижены более чем в несколько раз до $\pm 0,05$ мм. Это позволило запустить стабильное мелкосерийное производство деталей в пределах допуска. Проект выполнялся по заказу АО «ОДК-Авиадвигатель».

Заключение

На большом количестве практических примеров и кейсов мы показали эффективность программного

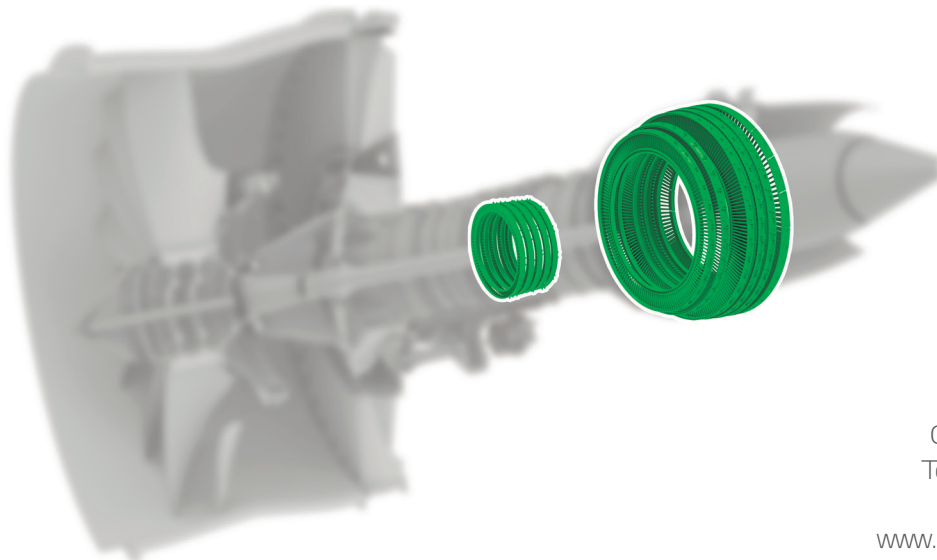
обеспечения REDITIVE.COMPENSATION©. Это решение имеет множество преимуществ перед прямыми и косвенными конкурентами в лице Volume Graphics©, ANSYS ADDITIVE©, Oqton Amphyon©, Materialise Magics Simulation© и других.

Используя REDITIVE.COMPENSATION© в своем технологическом процессе, вы получите:

- снижение остаточных деформаций и увеличение точности 3D-печати до десяти раз;
- быструю генерацию предеформированных моделей с минимальными усилиями, даже на основе исходных данных с дефектами фасетной сетки;
- снижение себестоимости аддитивного производства.

На сайте КБ «РЭДИТИВ» вы можете детально изучить принцип работы ПО, кейсы, а также заказать услугу по предеформации. Релиз REDITIVE.COMPENSATION© состоится во второй половине 2023 года. ■

Рис. 8. Предеформированные в REDITIVE.COMPENSATION© детали авиационного двигателя-демонстратора.



Контакты
 ООО «КБ РЭДИТИВ»
 Тел.: 8 (800) 600-1-678
 E-mail: in@reditive.ru
 www.reditive.ru | www.infcs.ru

 **Voxeldance Additive**

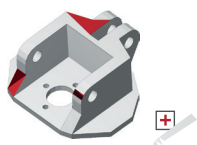
**Программное обеспечение
для технологической
подготовки к 3D-печати
(SLM, DMLS, SLS, SLA, DLP/LCD)**



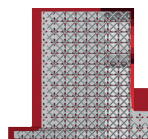
Процесс подготовки данных в Voxeldance Additive



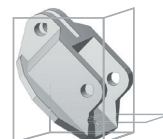
Импорт CAD



Исправление ошибок



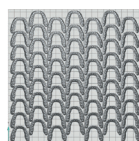
Редактирование



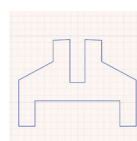
Ориентация



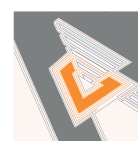
Моделирование
поддержек



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
в РФ — ИННФОКУС

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



Практическое исследование усадки 3D-печатных керамических деталей, изготовленных по DLP-процессу

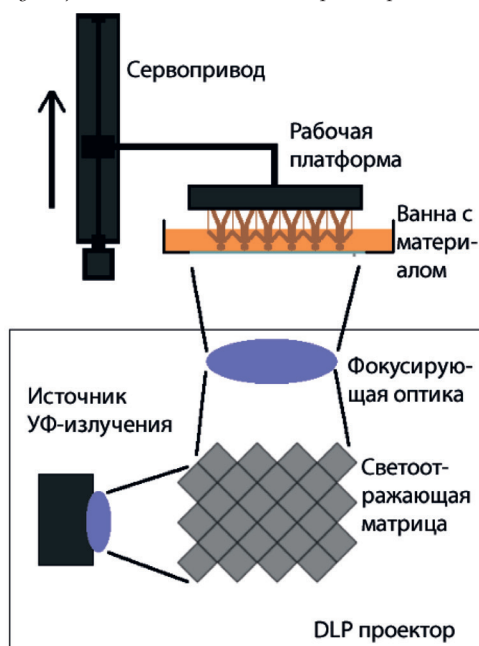


Антон Лихтнер, ведущий специалист по 3D-решениям
likhtner@i3d.ru, тел: +7 (495) 108 60 68

Специалисты Либерецкого и Каунасского технических университетов (Чехия, Литва) провели исследование изменения размеров

3D-печатных деталей из керамической суспензии после 3D-печати и после спекания в печи. В ходе экспериментов были напечатаны зеленые заготовки с различной толщиной слоя и параметрами отверждения. Для проведения работ использовался 3D-принтер с ультрафиолетовым DLP-проектором в качестве источника света. Пик интенсивности ультрафиолетового излучения находился в диапазоне от 385 до 405 нм. После печати каждая партия зеленых заготовок была очищена и подвергнута постотверждению в УФ-камере. Затем измерялись их размеры и рассчитывалась избыточная толщина каждого образца.

Рис. 1. Функциональная схема DLP-принтера



Следующим этапом эксперимента был обжиг в печи в соответствии со специальной программой. После вновь определялись размеры готовых деталей и рассчитывался коэффициент их усадки. Эксперимент показал высокое влияние параметров 3D-печати на паразитную засветку и практически полное отсутствие влияния на усадку деталей при термической обработке.

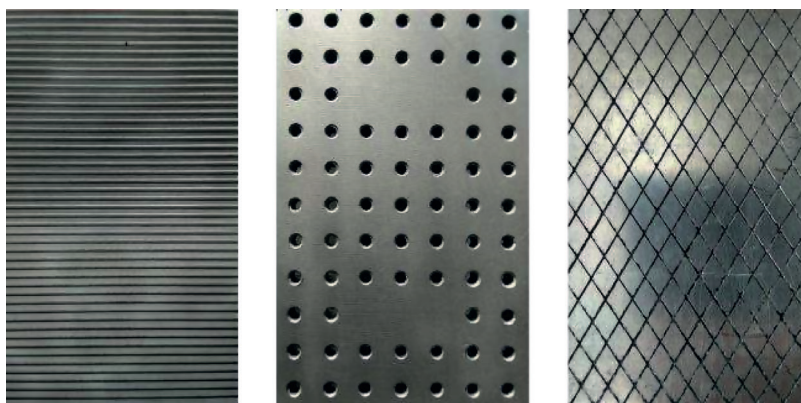
Во время 3D-печати первого слоя платформа опускается вниз до соприкосновения с дном рабочей ванны, а затем поднимается на толщину печатаемого слоя. Небольшое количество керамической суспензии остается между платформой и нижней поверхностью рабочей ванны. Из-за высокой плотности суспензии были использованы платформы со специальной поверхностью. Это необходимо для уменьшения силы всасывания при движении вверх и для уменьшения силы в противоположном направлении при движении вниз. Исследователи задействовали в работе платформы с тремя видами поверхности (рис. 2).

На левом изображении рис. 2 представлена поверхность платформы с горизонтальными канавками шириной 1 мм и глубиной 0,5 мм. На среднем изображении показана платформа с отверстиями диаметром 2,5 мм через всю поверхность. Правое изображение на рис. 2 – обработанная лазером платформа с диагонально ориентированными канавками шириной около 0,5 мм.

Таблица 1. Технические характеристики принтера

Параметр	Значение
Размер пикселя по XY	65 мкм
Разрешение по оси Z	5 мкм
Толщина слоя	25–100 мкм
Скорость печати	10–25 мм/ч
Длина волны света	385–405 нм
Область построения	97×60×100 мм
Разрешение проектора	1280×800 px

Рис. 2. Поверхности платформ

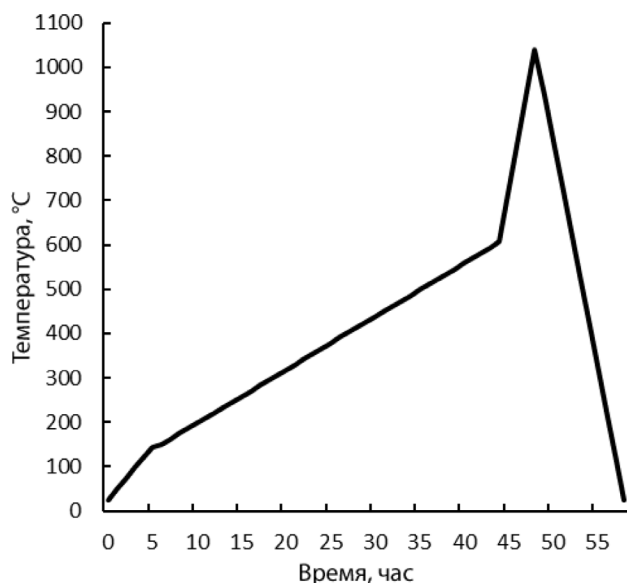


Первый шаг технологического процесса — подготовка 3D-модели для 3D-печати керамикой. При проектировании необходимо учитывать усадку конечного изделия. Самый простой способ — компенсировать все размеры детали в соответствии с коэффициентом усадки используемого материала.

Далее 3D-модель нарезается на слои. Большой разницы между нарезанием слоев (слайсингом) для 3D-печати керамикой и фотополимерами нет, поэтому она выполняется стандартным программным обеспечением для DLP-принтера.

Параметры процесса 3D-печати сильно зависят от вязкости материала. Фотополимер с керамическим наполнителем должен быть хорошо перемешан перед заливкой в ванну из-за разной массы частиц керамики и фотополимера. 3D-печать керамическими суспензиями не слишком отличается от процесса печати обычными фотополимерами, но из-за более высокой вязкости суспензий необходимо обеспечить правильное заполнение следующего слоя модели. Лучшие результаты в ходе решения этой задачи были достигнуты, когда использо-

Рис. 3. Кривая термической обработки



валась платформа с отверстиями внутри. А платформа с диагональными канавками показала самые слабые результаты. Для каждой из платформ, показанных на рис. 2, расход фотополимерной смолы был выше, чем для гладкой платформы.

Для керамической 3D-печати параметры засветки более важны, чем для фотополимерной 3D-печати. В процессе специалисты применяли засветку с разными параметрами для первого слоя, для слоев с поддержками и для основного тела модели.

После завершения 3D-печати и получения зеленой заготовки модель необходимо хорошо промыть, чтобы предотвратить нежелательную полимеризацию незапечатанного материала. Для фотополимерной 3D-печати необходимо еще и постотверждение — таким образом готовая модель получает монолитную структуру. В керамической 3D-печати этот этап не нужен, поскольку в дальнейшем заготовка будет спекаться в промышленной печи с помощью контролируемого термического процесса. Во время обжига связующий полимер газифицируется и высвобождается из модели.

Таким образом из керамического наполнителя формируется твердое тело. В то же время происходит сжатие (усадка) зеленой заготовки и превращение ее в конечную деталь.

Конечная деталь всегда имеет меньшие размеры, чем зеленая заготовка, ведь в процессе термической обработки связующее удаляется. Уменьшение массы зависит от типа конструкционного материала, а особенно — от доли керамического наполнителя и его фракционного состава.

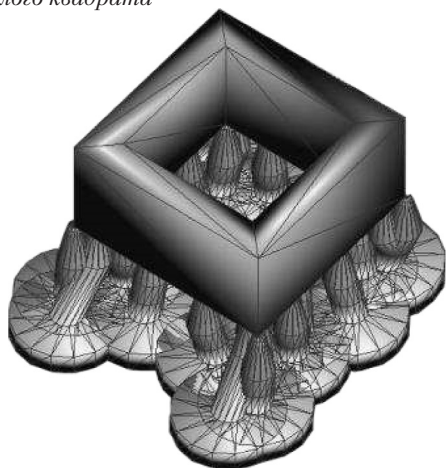
Кривая термической обработки зеленой заготовки в печи показана на рис. 3. Процесс начинается с сушки, где температура повышается до 150°C. Затем начинается самый ответственный процесс — обжиг — с повышением температуры до 600°C. Следующий этап — спекание. Температура повышается до максимальных для используемого материала 1060°C. Затем следует постепенное охлаждение. Весь процесс занимает более 60 часов. При этом для каждого материала необходимо подбирать индивидуальные оптимальные параметры.

Детали печатались из суспензии Vitrolite (производится в Европе). Это смешанная стеклокерамическая смола, обладающая высокой прочностью и крайне малой пористостью после обжига в печи при относительно низкой температуре. Производитель заявляет, что усадка составляет около 17%, в зависимости от геометрии печатаемого объекта.

Основные физические характеристики наполнителя:

- Средний размер частиц: 7,5 мкм.
- Цвет: от белого до белоснежного.

Рис. 4. Модель полого квадрата



- Содержание стекла: >87–95%
- Показатель преломления: 1,495.
- Невоспламеняющийся, нетоксичный материал.
- Низкое поглощение масла.

Полые квадраты имеют размеры 10×10×5 мм. Высота поддержек увеличена примерно до 10 мм. Толщина стенки каждой из сторон составляет 1,5 мм. Всего было напечатано 9 партий моделей, каждая из которых содержит 6 отдельных полых квадратов. 3D-модели были нарезаны на слои 50 мкм, 75 мкм и 100 мкм, после чего каждый слой отверждался в течение 3, 5 и 7 секунд соответственно. Параметры печати каждой партии приведены в таблице 2.

Прошедшие термическую обработку образцы были измерены повторно. Зеленые заготовки обжигались с поддержками, поскольку результаты предыдущих экспериментов показали: образцы без поддержек более подвержены деформации во время обжига.

Паразитная засветка уменьшается по мере сокращения времени отверждения. Партия 1 имеет более толстые стенки с неровной поверхностью, а партия 3 – более тонкие стенки с низкой шероховатостью. Этот эффект возникает из-за того, что свет рассеивается частицами стекла в смоле. Необходимо учитывать его при предварительной обработке 3D-модели.

Рис. 5. Отпечатанная партия перед промывкой



Таблица 2. Стратегия засветки при печати полых квадратов

Номер партии	Слой толщина, мкм	Время отверждения, с		
		Первый слой	Поддерживающие слои	Основные слои
1	100	13	9 (слои 2–50)	7 (слои 51–100)
2	100	13	7	5
3	100	13	5	3
4	75	13	9 (слои 2–67)	7 (слои 68–134)
5	75	13	7	5
6	75	13	5	3
7	50	13	9 (слои 2–100)	7 (слои 101–200)
8	50	13	7	5
9	50	13	5	3

В таблице 3 показаны средние значения прироста толщины стенок за счет паразитной засветки для обоих направлений и всех образцов из партии.

Эти данные говорят о том, что паразитная засветка выше при более длительном времени отверждения и меньшей толщине слоя. Величина фактической паразитной засветки должна быть учтена для каждой отдельной аддитивной установки еще на этапе проектирования модели. На рис. 6 показана диаграмма паразитной засветки в зеленых заготовках.

После завершения термообработки все без исключения конечные 3D-модели освобождали от поддержек, проверяли на наличие трещин и других повреждений. Кроме того, каждый образец во всех партиях был измерен, после чего усадка была рассчитана по следующей формуле:

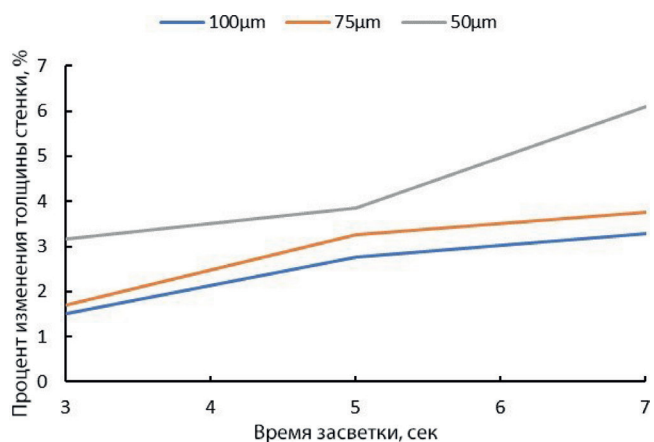
$$\text{Усадка (\%)} = \frac{\text{размеры перед отжигом} - \text{размеры после отжига}}{\text{размеры перед отжигом}} \times 100$$

Полые квадраты обмеряли в трех точках (двух углах и середине) как снаружи, так и внутри. В дальнейших расчетах фигурировало среднее значение. Три пары

Таблица 3. Нарастивание толщины стенок зеленых тел

Номер партии	Время отверждения, с	Толщина слоя, мкм	Средний прирост, %
1	7	100	3,29
2	5	100	2,76
3	3	100	1,51
4	7	75	3,76
5	5	75	3,25
6	3	75	1,69
7	7	50	6,1
8	5	50	3,85
9	3	50	3,17

Рис. 6. Представление паразитной засветки



групп с одинаковой толщиной слоя и разным временем отверждения одновременно анализировались на предмет общей размерной усадки (снаружи, внутри и толщина по осям X и Y). Значения средней усадки для каждой партии показаны в табл. 4.

Цифры показывают, что усадка для каждой партии не настолько сильно зависит от параметров 3D-печати, как паразитная засветка. Для каждой из партий коэффициент усадки приблизительно равен 20%. Для образцов внутри партии разброс несколько выше, но зависимости между ними не обнаружено.

Эксперименты и методы, описанные в этой статье, показывают: существуют простые способы улучшения качества керамических 3D-деталей, напечатанных с помощью технологии DLP. Величину усадки необходимо измерять для каждого керамического материала, так как она зависит от количества связующего в суспензии. При этом на усадку не оказывают значительного влияния ни толщина слоя, ни время отверждения.

Как видно из экспериментов, полученное значение усадки для исследуемого материала незначительно отличается от заявленного поставщиком. Это может быть вызвано как параметрами технологического процесса, так и наличием других факторов. Поэтому перед использованием керамических материалов для технологии DLP важно как рассчитать усадку для конкретного материала, так и подобрать максимально подходящие

Таблица 4. Усадка готовых деталей после обжига

Номер партии	Время отверждения, с	Толщина слоя, мкм	Средняя усадка, %
1	7	100	20
2	5	100	19,26
3	3	100	19,74
4	7	75	19,76
5	5	75	19,55
6	3	75	20,06
7	7	50	19,1
8	5	50	19,6
9	3	50	19,95

условия термообработки для печатаемой модели. Это может значительно повысить качество конечной детали.

Для производственной 3D-печати применяются материалы с различными характеристиками. Компоненты отличаются друг от друга:

- химическим и фракционным составом;
- типом, количеством и способом введения стабилизирующих и легирующих компонентов;
- реологическими свойствами;
- светопрозрачностью;
- другими параметрами.

Специалисты НПО «ЗД-Интеграция» выполняют 3D-печать из вакуум-плотных и пористых материалов на основе глинозема, а также из биосовместимых медицинских материалов на основе диоксида циркония, гидроксипатита, трикальцийфосфата и других.

Кроме того, мы решаем задачи: обрабатываем технологии производства изделий из металлических порошковых композиций, высокотемпературной оксидной керамики, сверхвысокотемпературной карбидной, нитридной, боридной и силицидной керамики и других материалов по техническому заданию заказчика.

Хотите узнать о технологиях подробнее? Есть определенный запрос? Появилась новая производственная задача? Свяжитесь с нами — мы поможем! ■

Источник:

<https://www.researchgate.net/publication/331569664>



3d@i3d.ru | +7 (495) 108 60 68

Зеленоградские лазерные гении, или Новый символ 3D-печати

Дмитрий Трубашевский, эксперт аддитивных технологий

Аддитивные технологии (АТ) из года в год все увереннее входят в нашу жизнь. Их скептикам сегодня живется несладко, так как даже в сложившейся эпидемиологической и политической ситуации технологии 3D-печати доказали свое лидерство и превосходство над старыми и неповоротливыми методами производства.

Львиная доля рынка АТ сегодня по праву принадлежит полимерам. И это неслучайно, ведь они, по сути, являются первопроходцами еще с 80–90-х годов прошлого столетия на зарождающейся арене технологий быстрого прототипирования.

Сегодняшнее развитие продуктов и услуг рынка аддитивного производства (АП) воодушевляет. Например, согласно отчету Wohlers Associates (рис. 1), его рост за 2022 год составил 18,3%.

Отчет от IDTechEx «Polymer Additive Manufacturing 2023–2033: Technology and Market Outlook» (рис. 2), прогнозирует рост потребления полимерных материалов для 3D-печати с 2023 по 2033 год до 21 млрд долларов США. По их информации, за 10 лет должен радикально измениться ландшафт лидеров. Если сегодня по убыванию спроса потребления это выглядит так: нить — смола — порошок, то через десять лет нас может ожидать следующий порядок: порошок — смола — нить.

АП из полимеров было ключевым запросом во время глобальной ситуации с COVID-19 в 2020 году. Тогда весь мир узнал из СМИ о том, что можно оперативно запустить серийную 3D-печать индивидуальных медицинских товаров в любом регионе мира. Немалый вклад в это внесло сообщество аддитивщиков-альтруистов.

Но даже сегодня с угасанием основного акцента АП на проблемы в здравоохранении роль 3D-печати сложно переоценить. На этом фоне хочется привести пример выдающихся заслуг известной итальянской компании CRP Technology S.r.l., снабжающей напечатанной продукцией заказчиков от мотоци-

клетного транспорта (рис. 3–4) до ракетостроения. Их основное ноу-хау состоит в уникальных порошковых полимерах под собственной маркой Windform, идеально подходящих для технологий PBF/SLS и HSS. Только представьте себе, что напечатанные этим материалом

Рис. 1. Мировой рынок аддитивного производства. Данные отчета Wohlers Associates

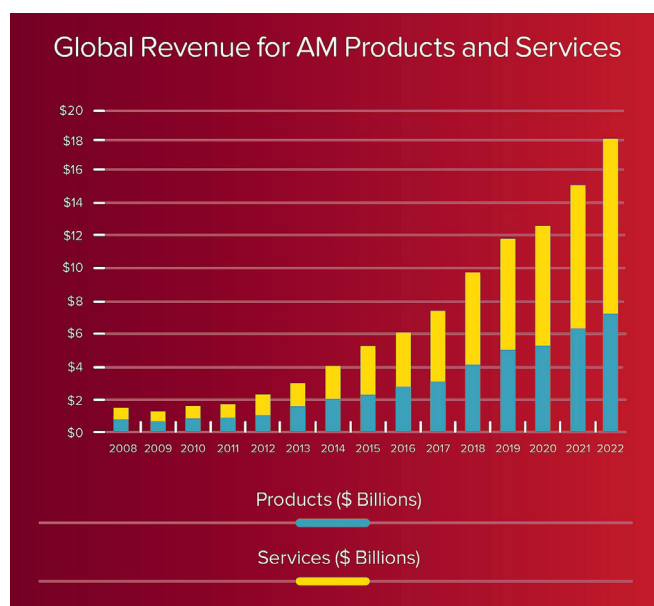


Рис. 2. Данные отчета IDTechEx по перспективам потребления полимерных материалов для 3D-печати на период 2023–2033 гг.

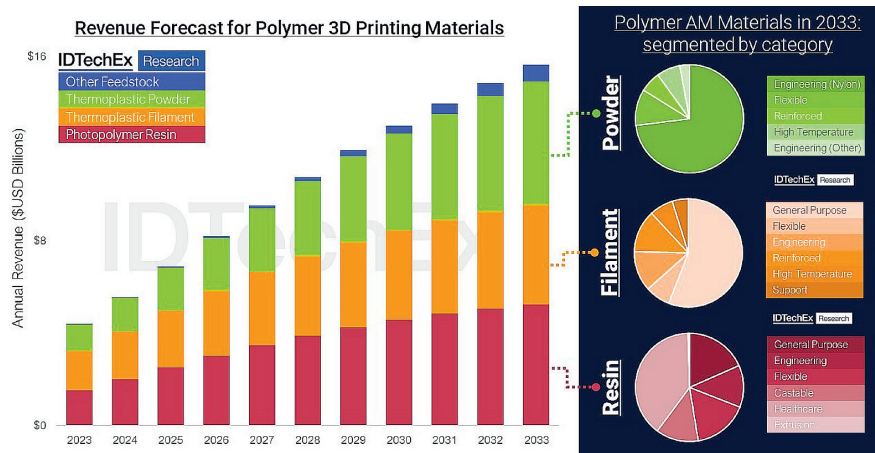


Рис. 3. Обтекатель электромотоцикла Energica Eva из армированного полиамида Windform XT 2.0 (CRP Technology S.r.l.)



Рис. 4. Напечатанный на 3D-принтере функциональный прототип автомобильного впускного коллектора



жидкостные шланги нещадно эксплуатировались в 24 часовых гонках в Ле-Мане при температуре до 120°C! Другие же угленасыщенные детали в коробке передач «носились» со скоростями до 340 км/ч, а перегородка масляного поддона двигателя показала даже лучшие характеристики, чем алюминиевая!

Думаю, вы уже почти готовы узнать правду о том, как же обстоят дела в России с отечественными полимерными АТ при настоящей санкционной политике. Позвольте рассказать вам о технологии SLS, которая, согласно ранее представленной информации, определит будущее развития АП в ближайшие 10 лет.

ООО «ОНСИИТ» — успешный производитель 3D-принтеров по технологиям PBF/SLS и LB-PBF/SLM. Разработчики не скрывают своей любви к лазерам и используют их для высокоточного спекания и сплавления порошковых полимеров и металлов. Могут ли лазерные 3D-принтеры компании трудиться только над задачами известных порошковых материалов, освою ли они промышленные фотополимеры — покажет время, и для этого, кажется, нет никаких сколь-либо значимых ограничений.

Есть ли у отечественного рынка потребность в новых технологиях, материалах и запрещенном к поставке оборудовании лидеров зарубежного рынка? Да, без сомнений! Сможет ли отечественное оборудование повторить успешные практические примеры, например, как у вышеописанной компании CRP Technology S.r.l., с доступными в России материалами? Безусловно! Откуда же берется такая уверенность в отношении «ОНСИИТ»? Давайте разбираться:

1. Сотрудники имеют богатый опыт в проектировании и производстве LB-PBF-3D-принтеров еще до основания своей компании. По этой причине стоит полагать, что сотрудники в «ОНСИИТ» извлекли уроки из проектов, в которых они участвовали, и смогут себя полноценно реализовать в новом амплуа, проще и быстрее приходя к более рациональным решениям.

2. «ОНСИИТ» развивается только в сфере АТ, приоритизируя для себя это направление. Возможно, ему удастся дистанцироваться от крупных госкорпораций, для которых «аддитивка» — это очередной вагон с факкультативными инновациями.

3. Финальный результат зачастую зависит от качества комплектующих, ПО и отработанной технологии, и тут у «ОНСИИТ» все хорошо:

- а. Используются проверенные промышленные лазеры и сканаторные системы ведущих мировых брендов, подтвердившие свою высокую стабильность и ресурс. В качестве импортозамещения компания тестирует отечественную электронику и систему управления.
- б. Завидная гибкость в плане интеграции ПО с известными мировыми решениями, например, Materialise, NetFabb, VoxelDance, а также российским «Глайсер».
- в. Специалисты компании уже отработали популярные зарубежные материалы: PA11/12, TPU, полистирол, полипропилен, PA6, PEKK, PEEK. Также «ОНСИИТ» активно тестирует российский полиамид 11/12 и полистирол, предоставляя производителю рекомендации по улучшению их свойств.
- г. Отдельно хочется отметить наличие специализированных версий принтеров, например, многолазерных и высокотемпературных.

4. Клиентоориентированность, поддержка и ответственность. «ОНСИИТ» ставит для себя амбициозную, но вполне осуществимую задачу — стать лидером лазерной 3D-печати в России. По этой причине очень важно заручиться поддержкой лояльных потребителей своей продукции. Специалисты компании на безвозмездной основе модернизируют поставленные ранее установки, заменяя устаревшие компоненты и приводя оборудование к актуальному состоянию: усиливают механику и моторы; устанавливают промышленные лампы нагрева с золоченым отражателем; устанавливают промышлен-

ленные пирометры, зону измерения которых удалось сместить на край платформы; обновляют управляющее ПО. В целом эти шаги позволили облегчить процесс поддержки поставленных систем у заказчика и повысить стабильность печати.

5. Доступность и узнаваемость. Цель «ОНСИИТ» — стать нарицательным брендом и символом доступной товарной категории, снабдив любого заказчика своей продукцией приемлемым по стоимости оборудованием для коммерчески выгодной 3D-печати с серийным качеством изделий. Например, в настольной SM200 отказались от элементов управления, ламп и других компонентов общего применения и заменили их на промышленные. Самый выгодный 3D-принтер в парадигме «ОНСИИТ» — это не тот, который дешевле конкурентов в момент покупки, а дешевле их по стоимости владения, максимально производителен и надежен для получения значимого бизнес-результата.

6. Новый дизайн у систем остался таким же строгим, но более опрятным (рис. 5–6). Обновленные версии 3D-принтеров SM200 и SM300 (рис. 5) можно будет посмотреть на выставке «Металлообработка-2023». Лучше, как говорится, один раз увидеть.

ОНСИИТ — не единственный в России производитель 3D-принтеров, но имеет свой внутренний стержень. Сегодня в компании не видят конкуренции для своей продукции среди подобных отечественных устройств с CO₂-лазером и сканаторной системой по той причине, что задела в виде выявления всех подводных камней технологии, разработки и тестирования различных решений, подбора и проверки на стабильность компонентной базы новичкам достичь не так-то просто. Что касается зарубежных аналогов, то санкции и волатильный рубль сделали их значительно дороже, а поставку и обслуживание принтеров европейского и американского производства — невозможными.

Рис. 5. SLS-3D-принтер «ОНСИИТ SM300» в модульном исполнении (с выкатным контейнером — построения)



В будущее в «ОНСИИТ» смотрят с оптимизмом, постоянно проводят работу над ошибками, модернизируют ранее поставленное оборудование, и не завышают цены на новое. В планах компании — внесение линейки своего оборудования в реестр отечественной продукции (СТ-1, реестр Минпромторга). Сегодня спрос на 3D-принтеры компании превысил производственные возможности, что при правильном управлении компанией должно позитивно сказаться на ее росте в плане численности сотрудников и последующем увеличении объемов выпуска нового символа 3D-печати, который так легко запомнить и которому так легко довериться, — «ОНСИИТ». ■

Рис. 6. Модельный ряд SLS-оборудования «ОНСИИТ»



Зинаида Сацкая



Ольга Оспенникова, д.т.н., исполнительный директор ассоциации, советник президента АО «ТВЭЛ».

Какова динамика развития ассоциации по числу членов, по числу решённых задач и какого масштаба эти задачи?

Ассоциация молодая. Её ядром стали компании-учредители: госкорпорация «Росатом» в лице «Русатом — Аддитивные технологии» (ООО «РусАТ»), АО «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз — Антей», ПАО «Газпром» в лице ООО «Газпромнефть — Цифровые решения», НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ, ГК «Роскосмос» в лице АО «НПО "Техномаш" имени С. А. Афанасьева», ГК «Ростех» в лице АО «Центр аддитивных технологий». В 2022 году ассоциация пополнилась семью новыми членами. Это МГТУ им. Н. Э. Баумана, АО «Институт пластмасс», АО «НИИ НПО ЛУЧ», АО «НПО «ЦНИИТМАШ» и три предприятия малого и среднего бизнеса — ООО «Харц Лабс», ООО «ЗД. РУ Дистрибушн», ООО «НПО «ЗД-Интеграция». В 2023 году в ассоциацию вошли два представителя малого и среднего бизнеса: АО «ЦТКАТ» из Воронежа и ООО «Стереотек» из Волгограда. На подходе еще два университета: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ) и Санкт-Петербургский государственный морской технический

университет (СПбГМТУ) — знаменитая Корабелка. Пусть ассоциация пока невелика по количеству членов, но качественно она сбалансирована — есть крупные компании, представители малого и среднего бизнеса, решающие локальные вопросы АТ, и три ключевых вуза, которые мощно развивают направление АТ, имеют свои центры аддитивного производства.

Работа ассоциации шла в двух важных направлениях. Первое направление — организационные дела самой ассоциации, такие как регистрация, общие собрания, создание сайта, формирование экспертного совета, в который вошли видные учёные в сфере аддитивных технологий и который возглавил ректор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого академик Андрей Рудской. Второе направление — действия по продвижению аддитивных технологий в стране. С этой целью были подписаны важные соглашения о сотрудничестве. С Минпромторгом России мы сейчас работаем над формированием мер государственной поддержки. На базе ассоциации разрабатываются предложения в федеральный проект по развитию станкоинструментальной промышленности, где отдельным блоком сформулированы предложения по АТ. Подписаны также соглашения с Промышленным кластером Республики Татарстан, Агентством стратегических инициатив, общественной организацией «Деловая Россия» и ассоциацией «Цифровые инновации в машиностроении». Наш экспертный совет в 2022 году выдал заключения по 15 проектам для включения в дорожную карту «Технологии новых материалов и веществ» в части продуктового направления «Аддитивные технологии». Из них 11 было включено в дорожную карту. Это работа в рамках соглашения, подписанного между госкорпорацией «Росатом» и правительством РФ. На ассоциацию возложена миссия по ведению дорожной карты, по актуализации проектов, которые в неё включены, отслеживанию динамики показателей.

Совместно с Петербургским политехническим университетом Петра Великого ассоциация выиграла грант Национальной технологической инициативы по направлению «TechNet». Это значимое событие, потому что это победа в конкурсе по поддержке структурных центров. В рамках гранта будет разработано шесть на-

циональных стандартов, которые будут представлены в ТК-182 — Технический комитет по стандартизации «Аддитивные технологии».

А что в ближайших планах?

Прежде всего выставка «Металлообработка», где ассоциация будет выступать с объединённым стендом. При поддержке Минпромторга мы готовим два мероприятия: большой круглый стол с институтами развития и научно-практическую конференцию. Как видите, здесь работа идёт в двух направлениях — стратегии развития и научном, что даст возможность коллегам рассказать, какие разработки по АТ сейчас ведутся. Предполагаем работать на форуме «Армия», «Иннопроме», то есть приурочиваем свои мероприятия к знаковым событиям, собирающим цвет науки и производства.

Сегодня объём российского рынка АТ составляет порядка 6 млрд рублей.

Наверняка у вас аккумулируется информация о состоянии российского рынка аддитивных технологий. Как выглядит сейчас динамика развития нашего рынка и каковы перспективы?

Вы правы. Постоянный мониторинг российского и зарубежного рынков — одно из ключевых направлений деятельности ассоциации. Сегодня объём российского рынка АТ составляет порядка 6 млрд рублей. Примерно 2,5 млрд руб. приходится на оборудование для 3D-печати и комплектующие; 1,2 млрд руб. — на материалы, около 2,3 млрд руб. — на услуги 3D-печати, которые, как видите, занимают сейчас ощутимую часть рынка. Конечно, мы наблюдаем снижение доли поставок зарубежного оборудования. Тем не менее на наш рынок выходят представители дружественных стран, в частности Китай, но главное — за последние несколько лет мы серьёзно продвинулись в создании своих продуктов. Это наши отечественные 3D-принтеры, которые «РусАТ» уже выводит на рынок, активно работают на этом рынке «Лазерные системы», есть несколько организаций, которые производят 3D-принтеры для печати пластика.

До 2019 года наблюдалась некая стагнация в развитии рынка, но к 2030 году прогнозируется серьёзный рост. Есть два сценария развития. Один из них полностью соответствует стратегии развития АТ, разработанной Минпромторгом, и сейчас ассоциация занимается её актуализацией. Мы прогнозируем, что к 2030 году объём рынка АТ достигнет 13,2 млрд руб. Но, учитывая, что госкорпорация «Росатом» подписала с правительством соглашение по дорожной карте «Технологии новых

материалов и веществ», мы можем говорить и об инновационном сценарии, реализация которого к 2030 году позволит достичь объёма рынка в 23,5 млрд руб. Мы рассчитываем, что сработает инновационный сценарий, поэтому постоянно мониторим ситуацию, постоянно опрашиваем предприятия, как они развиваются, какие компетенции наращивают. По последнему опросу мы видим, что у нас уже сформирован список из более чем 120 организаций, которые так или иначе развивают у себя аддитивные технологии.

Что касается технологических перспектив, то мы считаем, что в ближайшие годы технологии PBF, DED и MEX сохранят за собой доминирующую долю рынка.

У нас более 120 организаций, которые так или иначе развивают у себя аддитивные технологии.

Какова сейчас наша доля на мировом рынке?

Пока невелика, к сожалению, менее полутора процентов. Несмотря на то, что в текущих условиях АТ начали развиваться быстрее, чем, скажем, было два года назад, наша доля на мировом рынке пока не увеличивается.

Вы назвали 120 организаций, с которыми вы поддерживаете постоянную коммуникацию. Вы зовёте их в ассоциацию?

Мы приглашаем их на мероприятия, мониторим их развитие и в ассоциацию, конечно же, приглашаем. Двери в ассоциацию открыты, более того, когда мы прорабатываем с Минпромторгом меры государственной поддержки предприятиям, которые работают в сфере аддитивных технологий, мы акцент сейчас делаем именно на малом и среднем бизнесе.

На каждом мероприятии, посвящённом теме аддитивных технологий, прямо стон стоит по поводу сертификации. Из некоторых выступлений можно сделать вывод, что проблема нерешаема, особенно когда речь идёт о продукции для предприятий ОПК. Какова роль ассоциации в решении этой сложнейшей проблемы и за какую ниточку надо потянуть, чтобы развязать этот узел?

Действительно, это проблема из числа ключевых, потому что она тормозит внедрение аддитивных технологий. Мы работаем над развязыванием этого узла. Во втором квартале текущего года должно пройти большое

мероприятие с привлечением генеральных конструкторов, главных технологов предприятий оборонно-промышленного комплекса, чтобы конкретизировать проблематику, рассказать о преимуществах и сформировать дорожную карту продвижения аддитивных технологий. Для начала поделимся опытом «Росатома», где сформирована рабочая группа, начавшая работу с главными конструкторами, разработчиками изделий. Договорились, что начинаем внедрение аддитивных технологий. Начинаем с изделий неотвественных и несложных, параллельно начинаем заниматься ответственными деталями с выполнением соответствующих документов. На несложных деталях неотвественных конструкций мы нарабатываем опыт внедрения аддитивных технологий, чтобы плавно подойти к моменту, когда уже будет наработана достаточно большая база данных по свойствам материалов, когда оформятся необходимые нормативные документы, разрешающие применение аддитивных технологий в атомной отрасли. Мы планируем провести эту работу за полтора-два года. Вот об этом опыте мы будем рассказывать на совещании с главными конструкторами и технологами предприятий ОПК. Мы хотели бы аналогичную группу сделать на базе совета главных конструкторов предприятий ОПК, и ассоциации здесь принадлежит ключевая роль.

Вы сказали, что на выходе сейчас шесть национальных стандартов. Могли бы вы рассказать о них подробнее?

На данный момент на базе ТК-182 разработано 43 документа по стандартизации (межгосударственных стандартов, национальных стандартов, предварительных стандартов). В тех шести стандартах, которые мы будем разрабатывать, часть стандартов будет посвящена металлопорошковым композициям и методам их испытаний, часть — вопросам организации аддитивного производства.

На декабрьском лидер-форуме «Аддитивные технологии — расширяя горизонты» прозвучал тезис о том, что на базе ассоциации будет вестись работа по оценке консолидированного спроса на комплектующие для 3D-принтеров. Это должно способствовать выпуску отечественной продукции в экономически выгодных предприятиях объёмах. Есть ли сегодня уже какие-либо результаты?

Мы буквально в режиме нон-стоп мониторим потребности по комплектующим для 3D-принтеров, причём как для российских, так и под замену на действующих машинах зарубежного производства. По сравнению с тем, что было до 2022 года, спрос на комплектующие

заметно вырос, а на предприятиях «Росатома» активно идёт работа по их выпуску. РФЯЦ-ВНИИТФ создал лазеры именно для аддитивного производства, НПО «ЛУЧ» разработало трехосевой сканатор, а эти два элемента — сердце аддитивного оборудования. Совместно с РФЯЦ-ВНИИТФ создан так называемый виртуальный принтер, чтобы можно было моделировать процессы аддитивного производства. Сейчас это программное обеспечение работает в режиме опытной эксплуатации, и до конца 2023 года мы намерены сделать его уже коммерческим продуктом. По более мелким комплектующим уровня контроллера тоже ведём мониторинг. Сегодня практически полностью подобрали замену, пока, к сожалению, не в России. Работа идёт.

Проблема сертификации — из числа ключевых, потому что она тормозит внедрение аддитивных технологий.

Рейнжиниринг — это выход для решения проблемы комплектующих, которые после ухода зарубежных компаний стали недоступны?

В сложившейся ситуации — это один из очень хороших выходов. Именно эта технология позволяет не изобретать велосипед, а использовать лучшие практики, лучший зарубежный опыт и сделать свои комплектующие, своё оборудование. При этом есть возможность устранить недостатки и усилить преимущества, выявленные в процессе эксплуатации.

А насколько мы можем рассчитывать на себя в материалах для печати?

Это сейчас наиболее активно развивающаяся область аддитивного производства. Что касается металлических порошковых материалов, то у нас есть несколько предприятий, которые серийно выпускают металлопорошковые композиции. Это НПО «Центротех» из Новоуральска, одно из предприятий нашей госкорпорации «Росатом», «Сфера-М» из Челябинска, ВИАМ, НПО «Композит», «Русполимет» из города Кулебаки Нижегородской области. Они очень здорово продвинулись буквально за 2022 год. Так что поводов для опасений, что мы можем остаться без материалов, я не вижу. Немного хуже дело обстоит с полимерными материалами, но сейчас «Сибур» начал активно работать в этом направлении, Институт пластмасс за последний год серьёзно продвинулся с выпуском полиэфирэфиркетонов для АТ в том числе, и мы устраним дефицит, который сегодня наблюдается.






В целом я позитивно оцениваю наши перспективы. ■

Российский рынок оборудования для 3D-печати

Публикуя данную сводную таблицу производителей оборудования, основанного на аддитивных методах производства, редакция журнала «Аддитивные технологии» ставила целью оказать информационную поддержку ведущим российским игрокам рынка. Данные предоставлены компаниями или взяты из открытого доступа.

3D-принтеры

Наименование	Технология печати	Область построения, мм	Материал печати
 3DLAM +7 (921) 872-22-71 sales@3dlam.ru, www.3dlam.ru	SLM	Ø92×100, Ø150×200, Ø315×400	Жаропрочные никелевые сплавы, кобальт-хром, титан, алюминий, нержавеющие и химстойкие сплавы
 3DSLARU® Российские 3D-принтеры Triangulatica «3DSLARU – Российские 3D-принтеры» ООО «Эксклюзивные Решения» Санкт-Петербург +7 (911) 929 87 65 info@3dsla.ru, 3dsla.ru	SLM	Ø170×140, 4× Ø170×140, 200×200×200, 250×250×250, >280×280×250, объемы построения по размерам заказчика	Металлический порошок, стали, алюминий, кобальт-хром, инконели, титановые сплавы, другие сплавы. Допускаются несферические порошки
	DLP	объемы для микростереолитографии, объемы построения по размерам заказчика	Фотополимеры, высоконаполненные фотополимеры
	SLA	100×100×200 (керамики), объемы построения по размерам заказчика	Фотополимеры, фотошликеры, высоконаполненные фотополимеры
	SLS	500×500×300, объемы построения по размерам заказчика	Полиамиды, полистиролы
 ONSINT +7(964)718-62-85 info@onsint.ru onsint.ru	SLS	200×200×200, 300×300×400, 400×400×500	Полимеры в порошковой форме: полиамид, термополиуретан, полистирол, полипропилен
	SLM	150×150×230, 250×250×400, 350×350×400	Металлические порошковые материалы: алюминиевые сплавы, нержавеющие стали, мартенситностареющие стали, сплавы кобальт- хром, никелевые сплавы, титановые сплавы
 «3 D Аддитивные Технологии» НПП ООО г. Нижний Новгород +7 (800) 511-65-04 info@3dresin.ru, http://3dresin.ru https://gorkyliquid.ru https://kprint.tech	LCD	294×165×300, 127×92×200, 127×92×200	Фотополимерная смола собственного бренда Gorky Liquid 
 Volgobot г. Волгоград, +7 (988) 039-51-76 Sales@volgobot.com https://volgobot.com	FDM/FFF	600×600×600, 420×300×300, 420×300×500, 300×210×210, 300×250×210, 297×210×210	WAX3D, ABS, PET G, PLA, HIPS, PVA, ULTRAN 630, ULTRAN 6130, ASA, ABS/PC, PET, PC, FRICTION, CAST, RELAX, ETERNAL, FLEX, RUBBER, SEALANT, PETG, AEROTEX, CERAMO, WAX, SBS, SBS PRO, PROTOTYPER, SOFT, PRO-FLEX, TOTAL PRO, NYLON, PEKK, PEEK, TPUD70, TPUA85, PPSF, PSU, ULTEM, PEI, POK
	SLA	130×80×150	
 ZIAS Machinery г. Санкт-Петербург +7 (911) 120-41-16 BPrint@zias-machinery.com https://zias-machinery.com/ru/	Binder Jetting	1800×1000×800, 1200×700×600, 680×400×350	Кварцевый (хромитовый, синтетический) литейный песок + фурановое связующее, ПММА + органическое связующее
 Компания HardLight Москва, +7 (499) 350-00-86 Санкт-Петербург +7 (812) 309-40-27 info@hardlight.info https://hardlight.info	SLA	143,43×89,6×165, 143,43×89,6×200, 218,88×123,12×250, 298,08×165,60×400	Фотополимерная смола

Наименование	Технология печати	Область построения, мм	Материал печати
 ООО «Воплощение» +7 (960) 086-11-97 info@epit3d.ru www.epit3d.ru	FDM/FFF	240×240×240 (3D и 5D)	ABS, PLA, TPU, PA (Nylon), WAX, SBS, ASA, PET-G, ABS+CF, PA(Nylon)+CF, PA(Nylon)+GF, PETG+GF, ABS+GF
	FGF	600×600×600 (3D и 5D)	ABS, PLA, TPU, PA (Nylon), SBS, ASA, PET-G, ABS+CF, PA(Nylon)+CF, PA(Nylon)+GF, PETG+GF, ABS+GF, PP, PPS, PEI (ULTEM), PEEK, PEKK, PEEK+CF, PEKK+CF
 НТО «ИРЭ-Полус» г. Фрязино Московской области + 7 (495) 477-79-77 sales@ntoire-polus.ru www.ipgphotonics.com	DMD	2700×3600×3000, 5000×6000×4000	Металлический порошок
	DMD тел вращений	600×2500×3400, 6500×2500, 9400, 12300×2500×3400	Металлическая проволока
 «Лазерные системы» Санкт-Петербург тел.: + 7 (812) 612-02-88 sales@lsystems.ru, office@lsystems.ru lsystems.ru	SLM	250×250×280, 350×350×390	Металлический порошок
 ГК «Лазеры и аппаратура» Москва, Зеленоград +7 (499) 390-90-86 stanki@laser-app.ru, laserapr.ru	DMD	1500×600×1500, 600×400×400, 400×400×400, 500×400×400, 300×300×300	Металлически порошок, металлическая проволока
	SLM, в т. ч. многопорошковая	100×100×200, 250×250×280	Металлический порошок
 ООО «Новые аддитивные технологии» г. Санкт-Петербург +7 (812) 679-28-18 +7 (995) 623 50 64 info@printsilicon.com https://printsilicon.com	RDM	220×200×160	Силикон, полиуретан, эпоксидная смола, прочие двухкомпонентные RTV-материалы
3DQuality*	FDM/FFF	200×200×255, 260×240×200, 400×400×560, 400×400×800, 400×400×860, 400×400×1240	ABS-пластик, PLA-пластик, PVA-пластик, HIPS, нейлон, FLEX, Watson
3DiY	FDM	200×200×300, 300×300×400, 200×200×270, 300×300×330, 350×350×700, 500×500×700	ABS, PLA, PETg, HIPS, PVA, FLEX, RUBBER, CPE, PC, Nylon
	LCD	278×156×400	Фотополимерная смола
Addsol	SLM	90×90×90, 250×250×400, 500×500×500, 800×800×800	Металлический порошок (Ti, Al, Ni, Fe, Co, Mg, W, Mo, NiTi и другие)
AM.TECH	PBF (SLM)	Ø160×200	Металлопорошковыми композициями на основе титана, никеля, кобальт-хрома и др.
	MBJ	400×220×200, 500×450×400	Порошки на основе железа, медные порошки, порошки из нержавеющей стали
	CDLP	96×54×100, 136×76×200, 600×600×300	Al ₂ O ₃ , AlN, ZrO ₂ , SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , SiC, TCP, HA, Bioglass и аналогичные
	EBM	150×150×1180, 400×400×400	Ti6Al4V, H13, 316L и прочие стали, чистая Cu, TC4, TA15, Zr2.5Nb, Ta, Ti48Al2Cr2Nb
	SLA	300×300×300, 400×400×400, 600×600×400, 800×800×500, 1200×600×500, 1600×800×600, 1700×880×650	Фотополимерные смолы
F2 innovations	FDM/FFF	450×350×600, 100×600×1000, 600×600×600	ABS, PLA, PP, PE, TPU, PA (Nylon), PC, ASA, PETg, PMMA, PP, PEI (ULTEM), PEEK, PEKK, PSU, ABS+CF, PA(Nylon)+CF, PEEK+CF, PEKK+CF, PA(Nylon)+GF, PETG+GF, ABS+GF
	FGF	100×600×1000, 600×600×600, 4000×2000×1000	ABS, PLA, PP, PE, PETg, TPU, PA, Keltran, ABS+CF

3D-принтеры

Наименование	Технология печати	Область построения, мм	Материал печати
FABERANT 3D-принтеры	FFF	200×200×245	PEEK, АБС, нейлон, поликарбонат, ПЛА, FLEX, Rubber, полиуретан, HIPS, PVA, SBS, PETG, полипропилен (PP), Воск (Wax3D) и др.
Geralkom-3D	FDM/FFF	300×210×300, 300×300×400, 420×300×400	ABS, PLA, PETg, HIPS, PVA, FLEX, RUB-BER, CPE, PC, Nylon
IMPRINTA	FDM/FFF	300×200×300, 400×300×600, 600×400×900	ABS, PLA, PETG, PA, PP, TPU, CF & GF Composites, PEEK, PEKK, BASF 316L & 17-4 PH
INDIGO 3D	FDM/FFF	200×200×200	ABS, PLA, Flex, PETG, HIPS, NYLON, PC, PP, POM, PVD, PND, conductive (токопроводящий), Rubber
IVILOL	FDM/FFF	200×200×270, 200×200×260	ABS, PLA, PETG, Nylon, SBS, HIPS, FLEX, PC
MAESTRO	FDM/FFF	240×240×300, 240×240×210, 240×240×400, 400×400×640, 180×180×180	ABS-пластик, PLA-пластик, HIPS, нейлон, FLEX, Prototyper
Magnum	FDM	260×180×180, 205×240×200, 235×170×180, 210×170×170	ABS, PLA, POM, PVA, HIPS, PETG, FLEX, PP, RUBBER, CARBON, ETERNAL, SBS, PC-ABS, NYLON, WOOD
	FFF	700×700×850, 1100×500×500, 1100×700×850, 1100×1100×850, 2000×2000×1500	PLA, PETG, ASA, стеклонаполненные и угленаполненные композиты
PICASO 3D	FDM/FFF	201×201×210, 360×360×610	PA6, PA12, PA66, ULTRAX, PP, ABS, FORMAX, HIPS, PC, PSU, PEI, PEEK, ASA, ABS/PC, TPU, PET, PETG, PLA, PVA, WAX, SBS и другие материалы, в том числе с наполнением стекло- и углеволокном
PROTOTYPE	FDM	200×200×200, 240×210×250, 400×300×300	PLA, ABS, HIPS, PET, PCL, PVD, POM, NYLON, PC-ABS, PPSU, FLEX
Robotech	Binder Jetting	600×500×400, 2000×1000×1000	Кварцевый песок, фурановая смола, отвердитель
Stereotech	FDM/FFF	300×300×230 (в режиме 5D) 300×300×300 (в режиме 3D)	Серия Sealant: TPV80, TPU93, TPE, SEBS, TPU Серия Metalcast: 316L, AL99 Серия Enduse: SBS, ABS, PETG, PP Серия Fiberpart: ABS G4, TPU C5, ABS/PA G8, TPU G30; Серия Proto: PLA Совместимые материалы: ABS, PLA, HIPS, PVA, ASA, PETG, ABS/PC, TPU, PC, PBT, FLEX, SBS, NYLON
TotalZ*	FDM/FFF	250×250×250, 250×250×400, 250×250×550, 450×450×450, 500×500×500, 1200×650×1200, 650×500×650, 950×650×950, 1200×1000×1000, 300×300×300, 1000×500×900	Гранулы, ABS, ASA, SBS, PC, PLA, PetG, CERAMO, композиты на основе PLA (дерево, металл), TPU, FLEX, RUBBER, KAUCHUK ELASTIK, HIPS, PVA, PMMA (CAST), WAX3D
	FGF	до 12000	Гранулы, PLA, PETG, SBS, HIPS, TPU, ABS, ASA, PPS, PrintaForm, PA (Nylon), PC, PP, PEEK и другие
	SLS	250×250×250	Порошок
Vortex-3D*	FDM/FFF	320×320×400, 180×180×520, 550×550×800, 320×320×940	ABS, PLA, HIPS, FLEX, RUBBER, RELAX, ETERNAL
xWELD	WAAM, PAW	1200×1200×700, 800×600×600	По заказу проволока – ВТ6, ВТ20, конструкционные стали, нержавеющие стали, никелевые и алюминиевые сплавы, бронзы
ZENIT	FDM/FFF	230×210×230, 240×215×230, 190×190×230, 150×190×230, 240×215×230, 190×215×230, 194×195×230, 160×195×230, 300×300×400	ABS, PLA, PVA, HIPS, Flex, PC, Nylon, Rubber, PETG, SBS, PC
«Инженерная фирма АБ Универсал»	SLM	125×125×200, 180×180×200	Металлические порошки
ООО «Аддитивные технологии»	Binder Jetting	500×300×300, 700×700×450, 1000×600×500, 1200×1000×700, 1800×1000×700	Песок, смола
АО «Обуховский завод» концерна ВКО «Алмаз-Антей»	FDM/FFF	300×200×300	ABS, FLEX, PETG, SBS, PLA
	FDM/FFF	300×300×300	ABS, FLEX, PETG, PLA, HIPS, TPU, PA, PC, PPSU, ASA, ESD-SAFE, ULTEM, PEEC

* Из открытых источников

3D-принтеры

Наименование	Технология печати	Область построения, мм	Материал печати
ГК «АМТ»	FDM/FFF	2500×2300×800, 3500×3100×1000, 7500×7100×1050, 11000×11000×4000, 11000×11000×7000, 7000×11000×7000, 29000×11000×14000	PLA, пескобетон М300–М500, геополимерный бетон, гипс, специализированные смеси
ИЛИСТ	DMLS	1300×1300×800, 1500×1500×1000, 600×600×400, 2200×2200×600, 2200×2200×1000, 3000×3000×2000	Металлический порошок
Институт машиностроения, материалов и транспорта ФГАОУ ВО «СПбПУ»*	DMD/LENS	600×3200, 1000×800, 800×800×500, 1100×1600×1800	Металлический порошок
ИПЛИТ РАН	SLA	120×120×120, 250×250×250, 350×350×500	Фотополимерная смола
ИФПМ СО РАН*	EBM	1200×800×400	Металлическая проволока
ГК «Калашников»*	DMD + фрезерование	600×500×500	Металлический порошок
«ЛАР Технологии»*	SLM	100×100×200, 200×200×200, 300×300×300	Металлические порошки
АО «НИАТ»*	SLM	800×600×500	Металлический порошок
ОАО «НИТИ Прогресс»	EBM	500×500×500	Металлическая проволока
МГТУ им. Баумана*	SLM	250×250×250	Металлический порошок
ООО «Московский центр лазерных технологий»*	SLM	110×110×200, 250×250×300, Ø150, h=200; Ø350, h=400	Металлический порошок
ООО «РВС 3Д»	FDM, 3DCP	13000×24000×9000, 3000×6000×3000	Пескобетон М300–М500, геополимерный бетон, специализированные смеси
РИЦ УрФУ*	SLM	500×500, 500×750, 500×750, 500×1000, 500×1250	Металлический порошок
РусАТ	SLM	300×300×300, 610×610×500, 300×300×370, 600×600×600	Металлические порошки
	DMD	1500×1500×900	Металлические порошки
	EBAM	1500×1200×1400	Металлическая проволока
	FFM	300×300×300	Пластик
НПК ТЭТА	EBM	1500×1200×1400	Металлическая проволока
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»*	FDM	200×200×220	Термопласты
Царь3D	FDM,	1200×600×900, 1200×1200×600, 600×600×800, 500×450×700	PLA, PETG, SBS, PVA
	FGF+фрезеровка	1000×1000×850, 2000×1500×800, 2000×4000×800	ABS, ABS-GF, PLA, PP, PETg, TPU, PA, PA-GF
НПО «ЦНИИТМАШ»	SLM	160×160×160, 250×250×250, (100×100×150), Ø300×300, 450×450×450 (150×150×150), 550×450×450 (Ø75×75; 150×150×150)	Металлический порошок
ПАО «Электромеханика»*	SLM	450×450×600	Металлический порошок
ЭПОС-Инжиниринг	SLM	100×100×110	Металлические порошки

3D-сканеры

Наименование	Ручные	Стационарные
3DQuality*	да	Программно-аппаратные комплексы, настольные
TEXEL		Программно-аппаратные комплексы
Объемные технологии Volume Technologies	да	да
Thor3D	да	
RangeVision		Программно-аппаратные комплексы, настольный сканер
Scanform	да	

* Из открытых источников



*Сергей Геннадиевич Селезнев,
руководитель производства опытного оборудования ООО «ИФ АБ Универсал»*

Уважаемый читатель, наступило время познакомиться вас с новой российской разработкой в области аддитивных технологий, а именно — с установкой послойного синтеза методом селективного лазерного плавления металлических порошков в среде инертного газа ULS-125, созданной коллективом ООО «ИФ АБ Универсал».

Опираясь на большой опыт в поставках, эксплуатации и обслуживании импортных аддитивных установок, специалисты нашей фирмы составили техническое задание для разработки собственного проекта. Прежде чем выпустить коммерческий вариант установки, был изготовлен стенд для отработки конструкторских решений, на котором выявили и устранили проблемы, препятствующие качественному синтезу деталей. И только после этого этапа осуществили запуск в производство рабочего варианта ULS-125, который сейчас постоянно синтезирует детали, необходимые заказчикам. Итак, ULS-125 (Universal Laser Sintering) представляет из себя классическую однолазерную установку послойного синтеза деталей из металлических порошков, использующую SLM-процесс построения. Общие характеристики машины представлены в таблице 1.

Рис. 1. Основной и вспомогательный блоки установки ULS-125



Конструктивно установка ULS-125 состоит из двух основных блоков (рис. 1):

1. Головного блока, в котором располагаются непосредственно камера построения деталей, сканирующая система, система управления, органы загрузки и выгрузки металлопорошковых композиций, электрошкаф автоматики.

2. Вспомогательного блока обеспечения.

В камере построения располагаются (рис. 2): бункер с порошком, платформа построения, узел нанесения порошка на платформу, приемный коллектор неиспользованного порошка и диффузоры системы подачи инертного газа в зону построения. На верхней крышке камеры построения смонтированы системы сканирования, видеонаблюдения и протоколирования процесса, узел освещения рабочей камеры.

В нижней части камеры построения расположены приемный бункер неиспользованного порошка и циклон системы рециркуляции инертного газа.

Таблица 1. Характеристики установки ULS-125

1	Модель	ULS-125
2	Тип процесса	SLM
3	Тип лазера	Иттербиевый
4	Количество лазеров	1
5	Мощность лазера	400 Вт (max)
6	Модель лазера	ЛК-400
7	Рабочая зона (чистая)	125×125×190 мм
8	Размер платформы построения (максимальная зона построения)	127×150 мм
9	Минимальная толщина слоя	20 мкм
10	Газовая среда	Аргон / Азот (баллон, магистраль, встроенный генератор азота)
11	Габарит установки (без периферии)	2700×1480×2050 мм
12	Вес	400 кг
13	Напряжение питания	380 В

Рис. 2. Камера построения установки ULS-125 (основной блок)

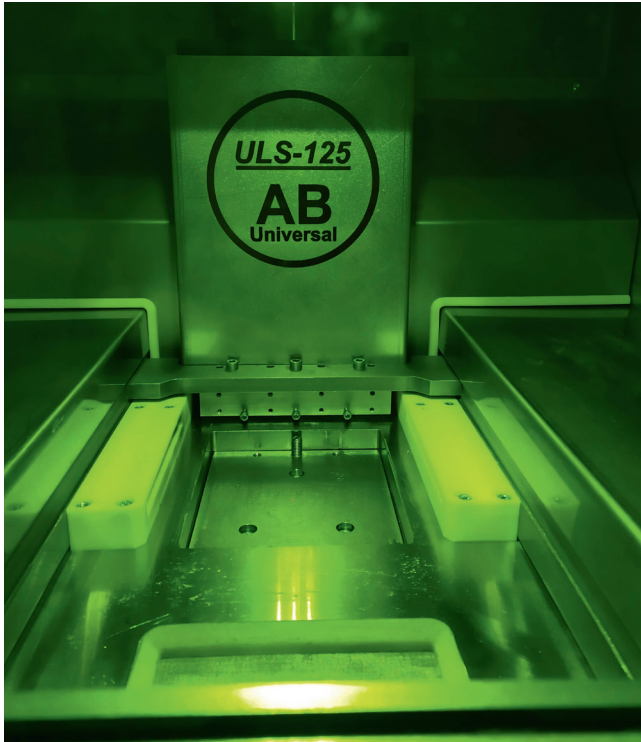


Рис. 3. Система фильтрации, газораспределения, лазер, генератор азота установки ULS-125 (вспомогательный блок).



Во вспомогательном блоке обеспечения находятся системы: подготовки воздуха, генерации азота, рециркуляции инертного газа, фильтрации, эжекции рабочей камеры, а также лазер. Общий вид этих систем представлен на рис. 3.

Для удобства оператора установка в базовом исполнении снабжена перчаточным модулем и модулем загрузки порошка (рис. 4), позволяющими минимизировать контакт оператора с металлопорошковыми композициям.

Загрузка металлопорошковых композиций может осуществляться как с использованием малогабаритного контейнера непосредственно оператором, так и при помощи контейнера большой емкости с применением подъемной электротележки. В установке предусмотрен контур безопасности, не позволяющий осуществлять включение установки при открытом периметре. Система удаленного управления позволяет оператору контролировать процесс построения в дистанционном режиме и принимать необходимые решения. Интегрированная система визуальной световой и звуковой сигнализации также обеспечивает оператору удаленный контроль за работой установки.

Рис. 4. Перчаточный модуль и модуль загрузки МПК установки ULS-125



Рис. 5. Интерфейсы программного обеспечения установки ULS-125



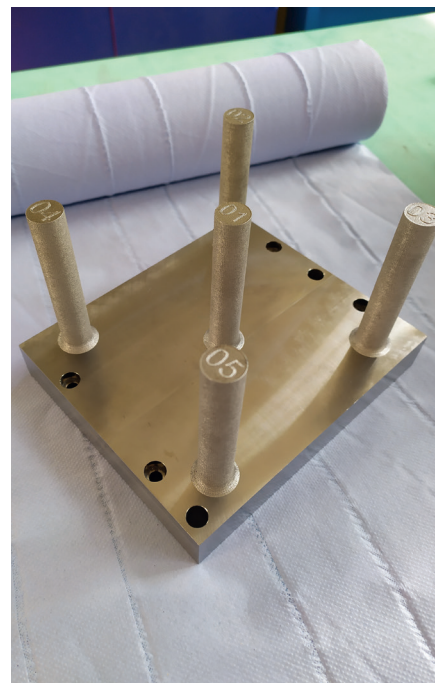
Рис. 6. Пример применения в дизайне



Рис. 7. Ювелирная промышленность



Рис. 8. Исследовательские работы (материаловедение)



При создании установки во главу угла были поставлены условия максимального использования отечественной программно-аппаратной базы. Контроллеры управления, модули ввода/вывода, датчики, компьютер подготовки данных, сканаторная система произведены в Российской Федерации. Импортные комплектующие использовались только при отсутствии аналогов, производимых в нашей стране.

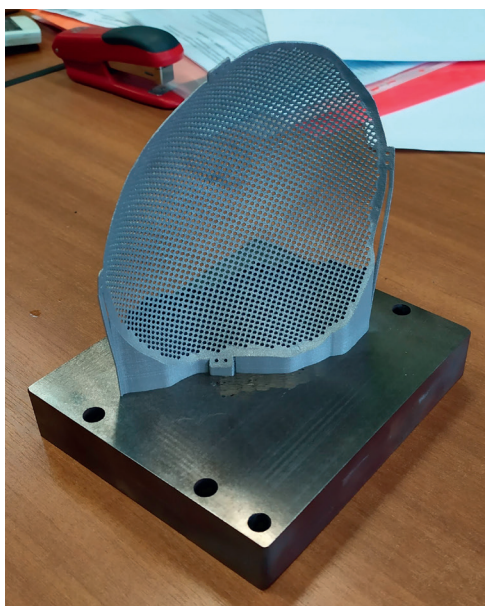
Установка ULS-125 комплектуется отечественными программными продуктами (рис. 5), которые управляют как непосредственно самой установкой, так и осуществляют подготовку данных для качественного построения

деталей и высокоточных заготовок. Программное обеспечение разработано совместно специалистами ООО «ИФ АБ Универсал» и фирм-партнеров.

При этом программно-аппаратный комплекс не ограничивает пользователя в области применения иных программных продуктов для подготовки данных для синтеза. Таким образом, в качестве подготовительного программного обеспечения могут использоваться как отечественные, так и зарубежные программные продукты.

В базовой комплектации установка может осуществлять дозагрузку материала без остановки процесса

Рис. 9. Детали медицинского назначения, полученные на установке ULS-125



построения. Благодаря небольшой рабочей зоне установка позволяет экономить на объеме порошка. Его расход во многих случаях делает нерентабельным применение установок с большой рабочей зоной при использовании их для синтеза небольших деталей. Установка комплектуется преимущественно отечественными расходными материалами (ракеты, фильтры, уплотнения).

Установка ULS-125 показала хорошие результаты при синтезе деталей для таких прикладных задач, как дизайн, ювелирное дело, исследовательские работы, медицина, авиакосмическая промышленность (рис. 6–9).

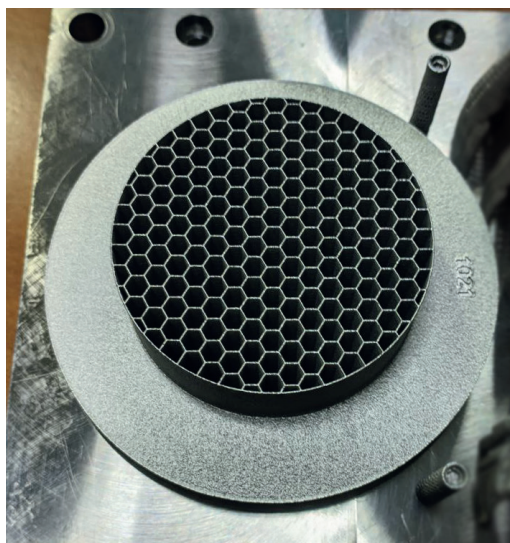


Рис. 10. Тестовый образец детали «Пламегаситель»

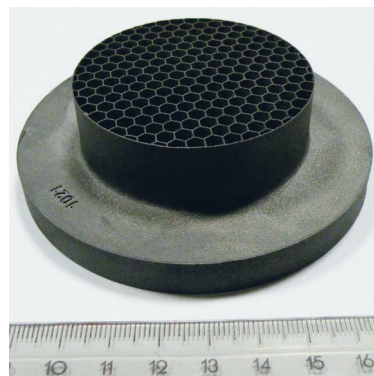


Рис. 11. Люминесцентный контроль детали «Пламегаситель»

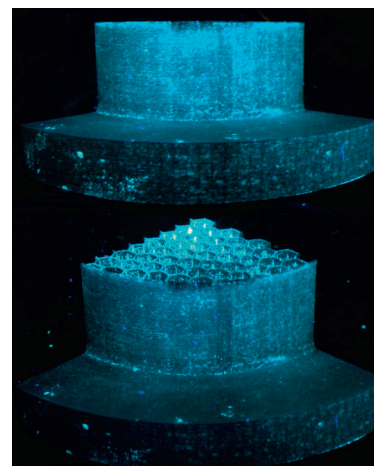
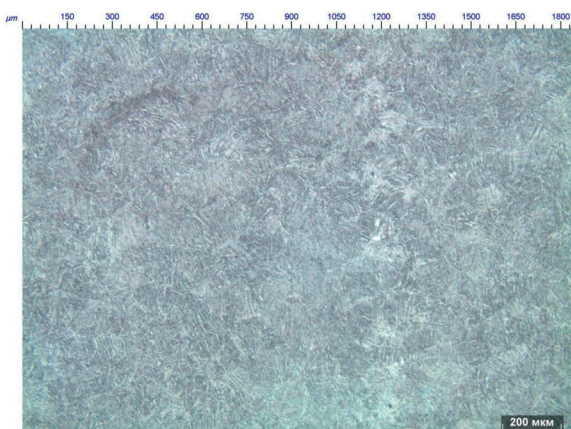


Рис. 12. Фото микроструктуры травленного шлифа детали «Пламегаситель»



Особым пунктом стоит отметить применение установки ULS-125 для решения задач медицины в области 3D-печати имплантатов для челюстно-лицевой хирургии, а также краниоимплантов для реконструктивной нейрохирургии (восстановление геометрии черепов травмированных людей). Машина показала хороший уровень результатов не только с точки зрения качества получаемых деталей, которые синтезируются с применением закрытых процесс-параметров для титана, но и с точки зрения экономики.

Примером построения деталей для предприятий авиакосмической отрасли являются работы по синтезированию тестовых образцов детали «Пламегаситель», представленной на рис. 10.

При проведении комплексного исследования образца получены следующие заключения.

Томографический и рентгеновский виды контроля дефектов материала заготовки детали «Пламегаситель» не обнаружили.

При люминесцентном контроле фрагмента заготовки детали «Пламегаситель» выявлены линейные свечения люминофора по слоям построения/синтеза,

более интенсивное свечение люминофора наблюдается внутри сот заготовки. Интенсивных линейных свечений, идентифицируемых как трещины, расслоения, и точечных, идентифицируемых как рыхлоты, пористость, несплошности, не обнаружено.

Внешний вид свечения люминофора на поверхности фрагмента заготовки детали «Пламегаситель» представлен на рис. 11.

Для оценки качества структуры материала детали «Пламегаситель» были изготовлены и исследованы микрошлифы в продольном и поперечном сечениях. Фото микроструктуры травленного шлифа представлено на рис. 12.

Микроструктурное исследование показало хорошее качество полученной детали.

Проведенные исследования характеризуют установку ULS-125 как оборудование, способное осуществлять синтез сложных геометрических изделий методом процесса SLM (DMLS) для решения широкого круга прикладных задач.

В течение 2023 года ООО «ИФ АБ Универсал» планирует представить рабочий вариант аддитивной машины ULS-180, отличающейся увеличенной рабочей зоной.

В заключение этого обзора мы — специалисты ООО «ИФ АБ Универсал» приглашаем к сотрудничеству организации, которым необходимы как сервис по 3D-печати металлических деталей, так и создание собственных аддитивных производств. ■



ООО «ИФ АБ Универсал»
 info@abuniversal.ru
 www.abuniversal.ru
 +7 (495) 380 05 15
 115201, Россия, г. Москва,
 Каширский проезд,
 д. 13, этаж 4, пом. XV, ком. 15Б

Anisoprint: время развития и масштабирования

В последние годы аддитивные технологии приобретают всё большую популярность. Если раньше их использовали лишь в строительстве и авиации, то сейчас они распространены в медицине, пищевой отрасли и даже повседневной жизни. За этими технологиями будущее. Но что если оно уже настало?

3D-печать – это важный революционный шаг в производстве.

3D-печать позволяет создавать сложные и качественные детали без необходимости многократных процессов изготовления и сборки. С развитием технологии 3D-печать становится всё более доступной и эффективной, и она представляет собой мощный инструмент для создания кастомизированных изделий и прототипов.



Об особенностях построения бизнеса в сфере 3D-печати рассказал Роман Савченков — руководитель ООО «Анизопринт Рус».

Компания является единственным авторизованным дистрибьютором Anisoprint на территории Российской Федерации и стран Таможенного союза.

Расскажите о технологии и оборудовании, которое вы продаёте.

Наша компания занимается технологией 3D-печати композитными материалами. Оборудование представляет собой 3D-принтеры, которые позволяют печатать изделия из пластика, армированные углеродным или базальтовым волокном. В результате мы получаем композиты, которые по прочности не уступают металлам и выигрывают по массе.

В чём особенность технологии Anisoprint? Её отличие от других?

С помощью технологии анизопринтинга мы можем армировать изделия непрерывными композитными волокнами. Такая методика повышает прочность изделия до 30 раз. Особенностью технологии является отдельная подача армирующих нитей и пластика в экструдер (рис. 1).

Если сравнивать Anisoprint с компаниями-конкурентами в сфере 3D-печати, то мы владеем единственной в мире технологией, где армирующую нить можно

выкладывать в местах, где это необходимо, локально менять объёмную долю волокна и пластика в каждой точке, подавая меньше или больше пластика. Это позволяет нам управлять степенью анизотропии и печатать сетчатые конструкции с пересечениями волокон внутри одного слоя (рис. 2). Мы можем укладывать армирующие волокна друг на друга под любыми нужными углами, не увеличивая толщину слоя в месте пересечения, а только изменяя объёмную долю. Этот процесс называется коэкструзией.

В процессе печати мы добавляем отдельно пластик к волокну. Результатом такого процесса является двухматричный композит, где реактопласт между волокнами обеспечивает пропитку, а термопласт связывает волокна между собой.

Технология позволяет использовать любой пластик, который подходит для различных нужд, включая негорючий, цветной или химически и термически стойкий.

Почему вы начали работать именно с этой технологией?

Мы следили за тенденциями развития производства, анализировали новинки и перспективные направления. Однако свой выбор остановили на Anisoprint. Ведь он находится на стыке двух перспективных областей: 3D-печать и композитные материалы. Применение каждой из этих отраслей по отдельности постоянно растёт. А их совмещение, т.е. 3D-печать композитными материалами, — своего рода «голубой океан» (термин взят из книги Р. Моборн и В. Чан Ким «Стратегия голубого океана»), новый перспективный сегмент на российском рынке. Именно поэтому нам было интересно подключиться к этой технологии в самом начале пути.

Мы уверены, что у этого направления большое будущее.

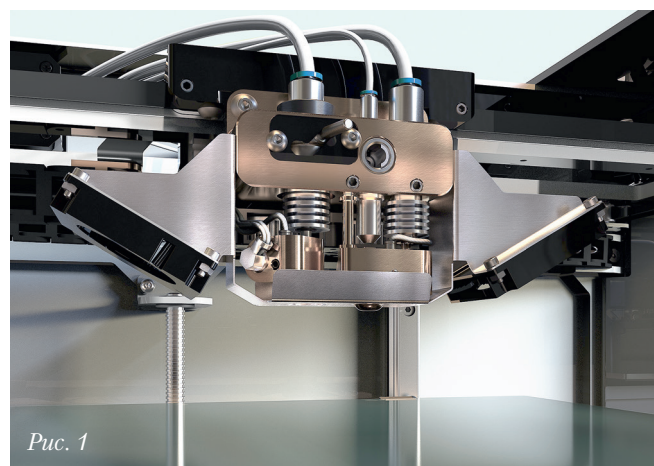
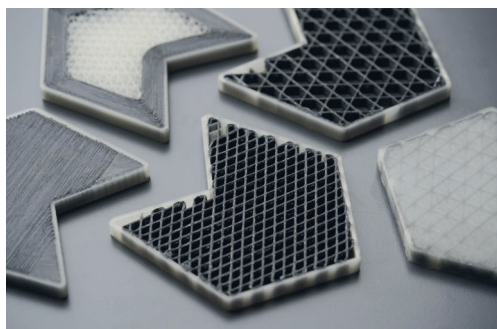


Рис. 1

Рис. 2



В каких областях можно применять технологию?

Технология была придумана для космоса и авиации. Однако стала востребована и в других отраслях. Одно из наиболее интересных направлений — изготовление производственной оснастки. В условиях санкций наша технология является решением вопроса быстрой замены вышедших из строя элементов производственных линий там, где пластиковые элементы не обладают требуемой прочностью.

Какие виды принтеров сейчас представлены в вашей компании?

В настоящее время наша продуктовая линейка состоит из настольных моделей (рис. 3): Composer A4, Composer A3, а также индивидуальных принтеров на базе промышленных роботов. С весны 2023 года мы вновь предлагаем промышленный принтер PROM IS 500.

Какое будущее вы пророчите компании?

Уверен, что у нас большие перспективы. Благодаря санкциям в России увеличивается спрос на развитие новых технологий.

В 2022 году на территории Ярославской области мы организовали совместное производство армирующих нитей (рис. 4). В ближайшее время мы планируем расширить линейку материалов.

Рис. 4



Рис. 3



Мы также участвуем в популяризации технологии печати композитов. В конце 2022 года на базе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого был организован совместный обучающий центр подготовки кадров в сфере аддитивного производства для сотрудников промышленных предприятий. В данном центре будет использоваться оборудование и ПО (слайсер Auga — расширенная версия) от компании Anisoprint. Безусловно, это даст возможность более активно знакомить промышленников с технологией печати композитов.

Что больше всего вам нравится в вашей работе?

Работа с новыми технологиями. Осознание того, что наша команда не просто продаёт оборудование, а способствует внедрению современных методов производства и материалов на российских предприятиях.

Какие у компании планы на ближайшие 2–3 года?

Мы планируем в несколько раз увеличить продажи оборудования на территории страны. Спрос у предприятий есть.

Хотим расширить продуктовую линейку армирующих материалов. К уже существующим углеродной 1,5k и базальтовой нитям планируем добавить стеклянную и углеродную нить 1k.

На стадии разработки находятся обучающие продукты по применению нашей технологии, оборудования и особенностей проектирования изделий под анизопринтинг. Эти продукты помогут промышленникам эффективно внедрять нашу технологию в своё производство.

Мы видим перспективы в развитии 3D-печати, внедрения её в различные сферы жизни и виды производств. Время этих технологий уже наступило, а значит, наступило время развития и масштабирования и нашей компании. ■



<https://anisoprint-russia.ru>



<https://vk.com/anisoprintrus>



<https://t.me/AnisoprintRus>

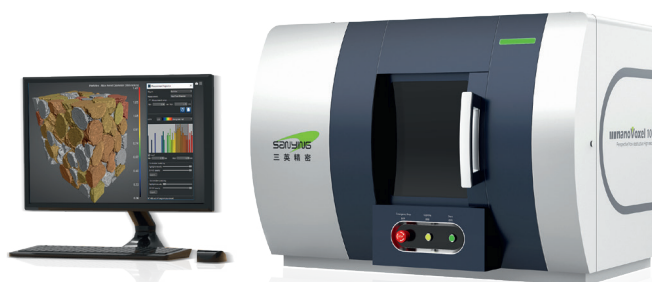
Рентгеновская компьютерная томография от Sanying — совершенный метод неразрушающего контроля в аддитивном производстве

Так же как аддитивные технологии являются одним из совершенных современных методов изготовления деталей сложных форм, основанных на прямом синтезе детали из подводящего материала путем его наращивания на основу, рентгеновская компьютерная томография является совершенным методом неразрушающего контроля и позволяет исследовать детали любой формы.

В рамках аддитивного производства применение рентгеновских компьютерных томографов Sanying позволяет проводить:

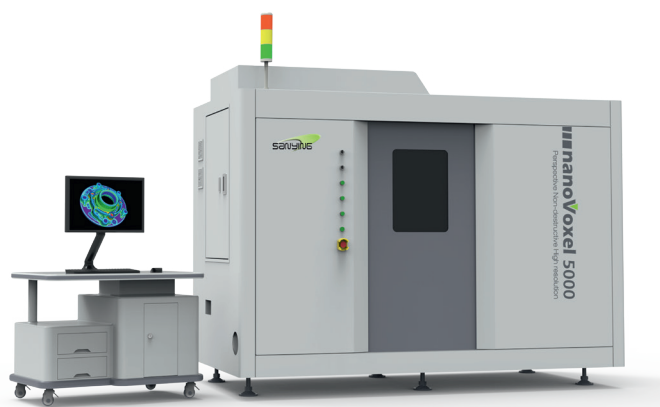
- контроль качества исходного сырья (порошка): подсчитывать коэффициент заполнения порошка, размер частиц, сферичность и собирать другую информацию о порошке;
- контроль таких дефектов производства, как внутренние поры, трещины, участки с непроплавленным порошком;
- количественный подсчет общей доли несплошностей в образце и определение характерных параметров каждой несплошности, таких как объем, эквивалентный диаметр и т.д.;

Полный цикл реверс-инжиниринга: с помощью томографов Sanying вы можете получить исходные данные об изделии, изучить его внутреннюю структуру, провести сегментацию на детали, экспортировать модель, преобразовать данные в поверхности или 3D-тела, провести конечноэлементное моделирование для исследуемых объектов, провести последующее редактирование объекта и отправить его на печать.

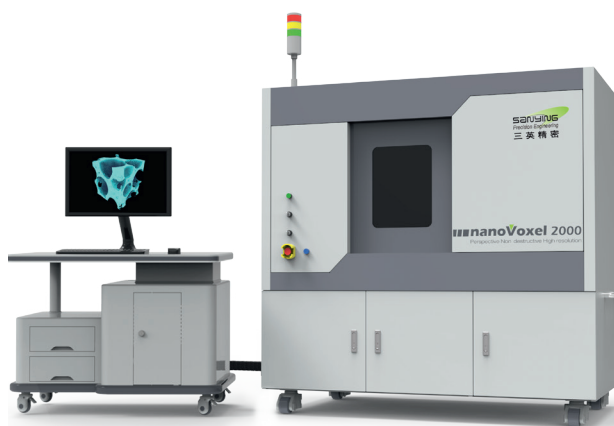


Настольные системы томографии

- контроль остатков порошка во внутренних каналах образца;
- обратный инжиниринг путем получения внутренней структуры образца, экспортируемой в файл, пригодный для 3D-печати соответствующего продукта;
- сравнение и анализ проектной модели САПР и данных компьютерной томографии для выявления отклонений между ними, подсчета и измерения ошибки в геометрии изделия;
- виртуальные испытания по полученной модели реального изделия.



Исследовательский микротомограф с двумя трубками



Микротомографы

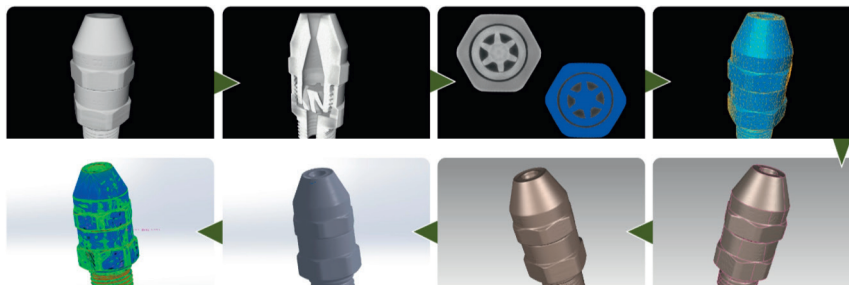
- полноценную 4D-томографию путем совмещения системы томографии с машинами для механических и/или температурных испытаний, что позволяет осуществлять непрерывное сканирование и исследование объекта в момент проведения испытания.

Sanying — мировой лидер в производстве томографов. В модельном ряду компании Sanying представлены самые различные системы компьютерной томографии для решения широкого круга задач:

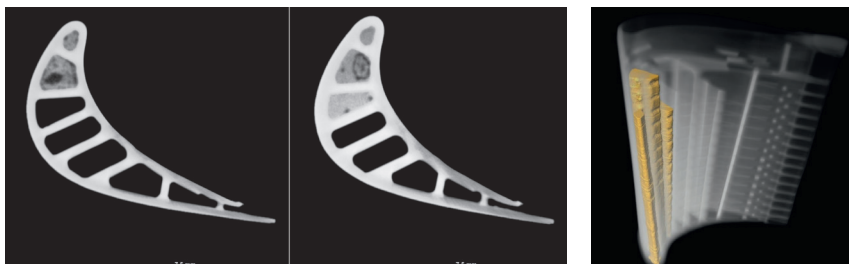
- настольные системы микротомографии;
- системы микротомографии со сверхвысоким разрешением и рентгеновским микроскопом;
- системы микротомографии высокой мощности;
- системы микротомографии с двумя рентгеновскими трубками;
- универсальные промышленные томографы высокой мощности.

Системы томографии Sanying различаются по пространственному разрешению, техническим параметрам и возможностям исследования объектов с различными габаритами, рентгеновской плотностью и т.п. Имеют широкий набор опций, в том числе полностью изменяемую геометрию «источник — образец — детектор», широкий энергетический диапазон, большой набор детекторов и рентгеновских трубок. ■

Полный цикл реверс-инжиниринга



Остатки порошка во внутренних полостях



Москва
info@melytec.ru
+7 (495) 781-07-85

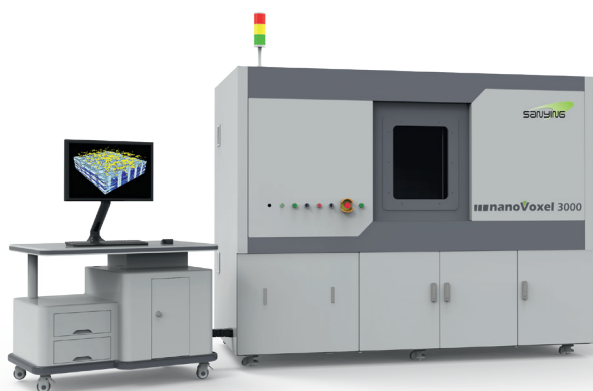
Санкт-Петербург
infospb@melytec.ru
+7 (812) 380-84-85

Екатеринбург
infoural@melytec.ru
+7 (343) 287-12-85

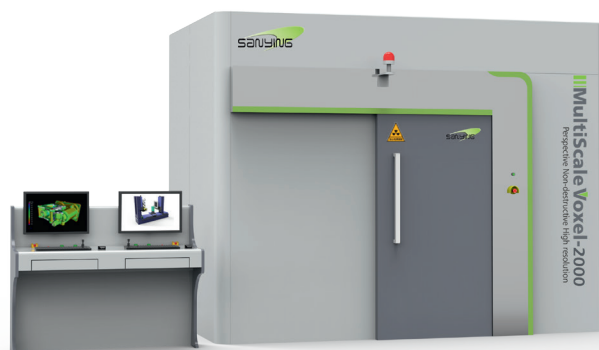
Усть-Каменогорск
infokz@melytec.ru
+7 (7232) 41-34-18

Таллин
info@melytec.ee
+372 (5) 620-32-81

www.melytec.ru
www.melytec-testing.ru



Системы томографии с рентгеновским микроскопом



Универсальный промышленный томограф высокой мощности



Сергей Зеленев,
технический директор ООО «Аддитивные технологии», s.v.zelenov@yandex.ru

Вместо вступления

В нашей предыдущей статье в журнале «Аддитивные технологии» мы рассказывали о системе технологической подготовки «Глайсер» и ее интеграции с российскими производителями 3D-принтеров. За прошедший год наша компания расширила как географию своих пользователей, так и количество поддерживаемых отечественных платформ аддитивного производства. Коммерческие инсталляции «Глайсера» появились в ведущих вузах (МЦЛТ (инжиниринговый центр при МГТУ им. Н.Э. Баумана), МИСиС) и предприятиях страны.

В этот раз хотелось бы отойти от обсуждения реальных устройств и примеров их использования и порассуждать о том, в каких направлениях могут и будут развиваться технологии послойного синтеза в ближайшем будущем. И главное для нас как разработчиков ПО в том, какое программное обеспечение в этом будущем потребуется.

Естественно предположить, что дальнейшее развитие будет идти по пути преодоления технологических ограничений, а его целью будет устранение общих недостатков, свойственных всем технологиям 3D-печати. Эти недостатки являются следствием общего технологического принципа — плоского послойного синтеза. И ключевое слово здесь — плоский. Именно плоская геометрия слоев определяет основные проблемы современных принтеров, а именно:

- шероховатость зависит от нормали поверхности детали,
- необходимость проектирования и синтеза поддержек,
- анизотропия вследствие единого направления роста.

Опыт нашей компании и взаимодействие с коллегами по цеху позволяет утверждать, что одним из направлений развития технологий послойного синтеза является разработка программно-аппаратных решений для выращивания деталей с использованием неплоских слоев. Конструктивно реализация

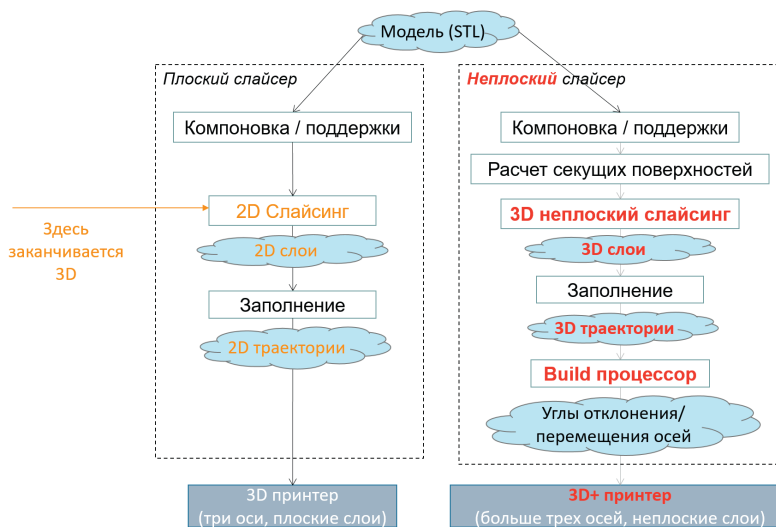
таких решений заключается в добавлении в устройство дополнительных осей — степеней свободы. Работу таких устройств можно увидеть уже сегодня. Есть FDM-принтеры с поворотным столом. Для неплоской печати металлами существует решение по совмещению технологии прямой наплавки с роботом-манипулятором.

Наша компания уже более двух лет занимается разработкой неплоского слайсера. В этой статье мы попытаемся систематизировать те особенности технологической подготовки неплоской печати, с которыми мы столкнулись, и поделиться некоторыми результатами.

Объект изучения

Под термином «слайсер» будем понимать программное обеспечение технологической подготовки трехмерной печати, результатом которого является управляющая программа для принтера (робота) в G-код подобном формате, то есть задачи слайсера не ограничиваются непосредственно нарезкой и заполнением слоев. Таким образом, за входные данные будем принимать модель в формате STL, а за выходные — траектории движения головы принтера в формате отклонений его осей. Исходя из этого, состав неплоского слайсера представляется следующим образом.

Рис. 1. Сравнение компонентов и структур данных для обычного и неплоского слайсеров



Состав неплоского слайсера:

- среда геометрического моделирования компоновки и поддержек,
- построение (импорт) секущих поверхностей,
- неплоский слайсер — нарезка 3D-модели неплоскими слоями,
- расчет заполнения — расчет траекторий движения рабочего элемента по поверхности слоя,
- пересчет траекторий в виде отклонений и углов поворотов осей принтера.

Если провести аналогию с составом обычного слайсера и его структурами данных, то такое сравнение можно представить схемой, приведенной на рис. 1.

Математический аппарат неплоского слайсера существенно отличается от обычного. В обычном слайсере трехмерность исчезает сразу после нарезки на слои. Слой представляется в виде множества двумерных контуров. Третья координата едина для всего слоя. Алгоритмы расчета заполнения и экспорта траекторий оперируют двумерными координатами.

При неплоском слайсинге слой представляется в виде трехмерной поверхности. Точка траектории заполнения содержит 6 координат: 3 пространственные координаты и вектор нормали.

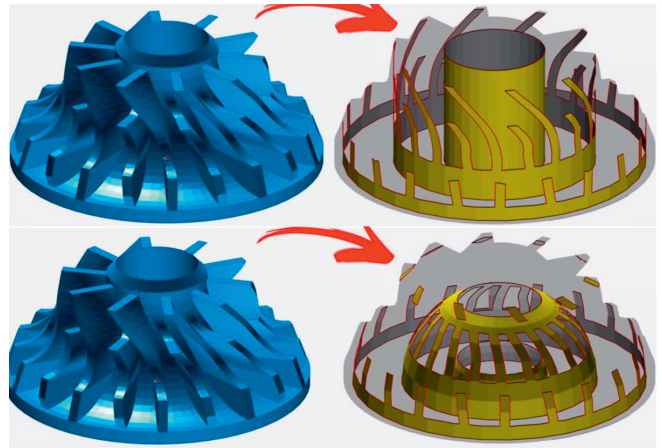
Поэтому алгоритмы нарезки и расчета заполнения обычного слайсера не подходят для неплоского. В частных случаях неплоский слайсинг можно свести к двумерным алгоритмам, но в самом общем случае алгоритмы обычного слайсера неприменимы.

Далее попробуем рассмотреть подробнее те структурные элементы, которые появляются при неплоском слайсинге, и способы их реализации. Примеры будем иллюстрировать скриншотами из нашего ПО «Глайсер».

Расчет секущих поверхностей

Если в обычном слайсере секущая поверхность — это плоскость, перпендикулярная оси Z, то в нашем

Рис. 2. Цилиндрические и сферические секущие поверхности (задание поверхностей параметрическое или через эквидистантные оффеты базовой поверхности)



случае это множество трехмерных поверхностей. Этими поверхностями на этапе слайсинга мы будем рассекать электронную модель детали. Результатом этих сечений будут поверхности слоев.

Конечно, геометрия секущих поверхностей определяется конструктивными особенностями и ограничениями того принтера, для которого мы готовим печать. Однако, на наш взгляд, здесь можно выделить несколько общих подходов (таблица 1).

При параметрическом задании сечений (рис. 2), секущая поверхность для каждого слоя может быть рассчитана с нужной точностью триангуляции.

В отдельных случаях, когда нет параметрического представления сечений, а есть поверхность первого слоя, то поверхности последующих слоев можно получить эквидистантным офсетом базовой поверхности. Случай подходит, например, для печати поверх оснастки (на подложке).

В отдельных случаях неплоская печать может осуществляться плоскими слоями (рис. 3). Для этого над секущей плоскостью на каждом слое выполняется ли-

Рис. 3. Пример плоского некопланарного слайсинга в «Глайсере»: модель, послойное представление в контурах и несколько заполненных слоев

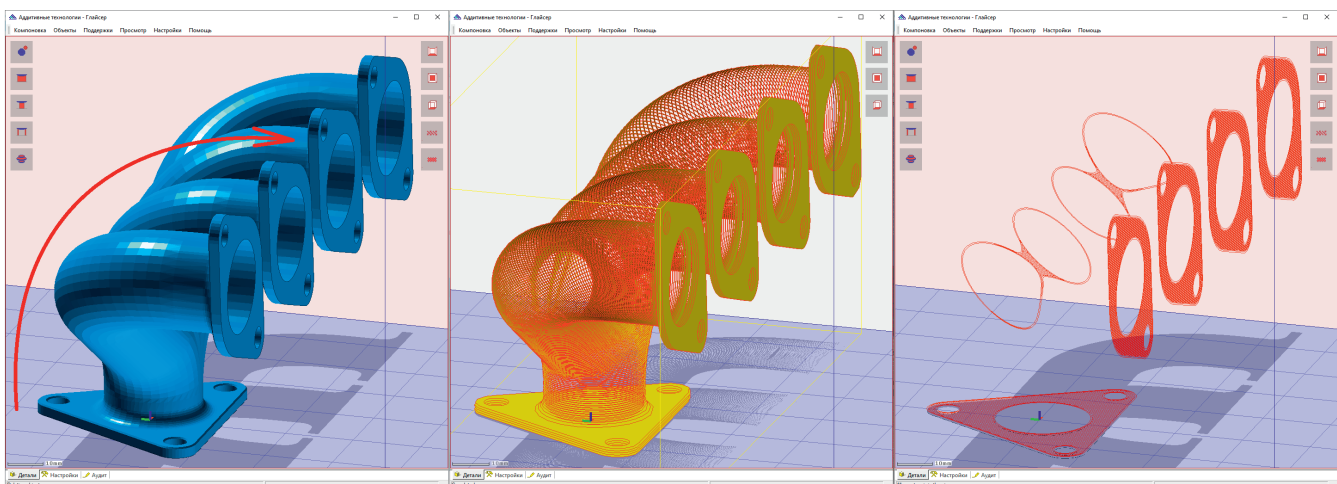


Таблица 1. Варианты построения секущих поверхностей (слоев)

<p>Параметрическое задание поверхности</p>	<p>Поверхность можно рассчитать по ее параметрической модели, подобрав параметры на каждом слое, — применимо для частных случаев, например, когда слои представляют собой цилиндрические, сферические, конические и т.д. поверхности.</p>
<p>Эквидистантные офсеты базовой поверхности</p>	<p>Применимо для случаев, когда печать идет на каком-то заданном основании (подложке).</p>
<p>Интерполяция граничных поверхностей</p>	<p>Поверхность получается линейным преобразованием от предыдущей (поворот и сдвиг базовой плоскости), протяжка по образующей.</p>
<p>Динамический расчет секущих поверхностей</p>	<p>Секущая плоскость рассчитывается исходя из кривизны поверхностей модели, например, с целью оптимизации шероховатости.</p>

нейное преобразование: поворот, сдвиг. Способ подходит для деталей, где направление печати интуитивно понятно: трубопроводы, коллекторы и т.д. Назовем это плоским непараллельным (некомпланарным) слайсингом.

Отдельно выделим динамический способ расчета секущих поверхностей (рис. 4). Способ актуален для станков, работающих по технологии прямой лазерной наплавки, где направление подачи материала может меняться. Здесь важно, чтобы расстояние между слоями на поверхности модели было везде одинаковым. На основе этого принципа, были разработаны программные компоненты, позволяющие построить слои соответствующим образом.

Сечение модели неплоской поверхностью

На этапе неплоской нарезки, имея множество секущих поверхностей, необходимо построить множество неплоских слоев. Новый технологический модуль в «Глайсере» решает задачу генерации неплоских слоев различными способами. Пример слайсинга всем известной модели эллиптическими слоями (рис. 5). Пример нужно воспринимать как демонстрацию нового подхода, и, конечно, слои такой геометрии не предполагают изго-

товления детали. Акцент сделан на то, что слайсинг реализован по модели в STL-формате, геометрия секущих поверхностей не ограничена, в т. ч. по направлению нормалей. Результат слайсинга — трехмерная поверхность, тоже в формате STL. В показанном примере секущие поверхности рассчитаны эквидистантными офсетам от базовой поверхности (эллипса), расположенного в центре модели.

Вообще, помимо эквидистантных офсетов базовой плоскости можно придумать множество способов расчета секущих поверхностей. В каждом конкретном случае секущие определяются исходя из геометрии детали и технологии печати. Так, например, при печати неплоских слоев на обычном трехосевом принтере, секущие поверхности обычно строят так, чтобы верхняя поверхность детали печаталась одним слоем. Это позволяет убрать «ступеньки» на верхней поверхности, сделать ее более гладкой и, в некоторых случаях, улучшить механические характеристики (рис. 6).

Расчет заполнения

На этом этапе необходимо рассчитать траектории движения рабочего элемента принтера для заполнения неплоского слоя. Слой традиционно заполняется

Рис. 4. Динамический расчет секущих поверхностей в «Глайсере»: модель, несколько слоев, послыное представление

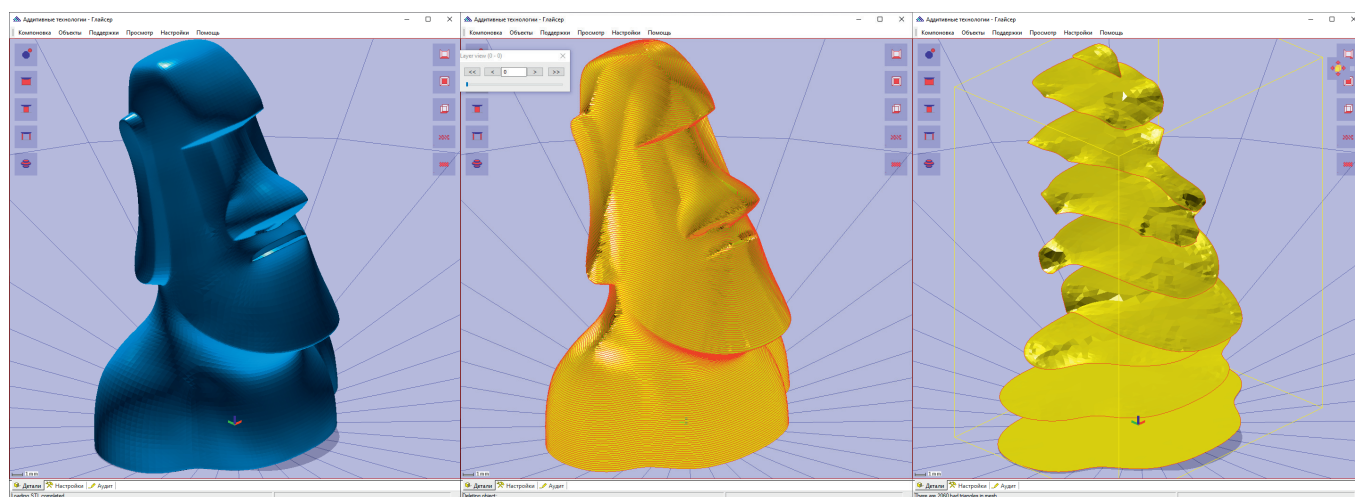


Рис. 5. Пример расчета эллиптических слоев в «Глайсере»: модель, послойное представление и один слой.

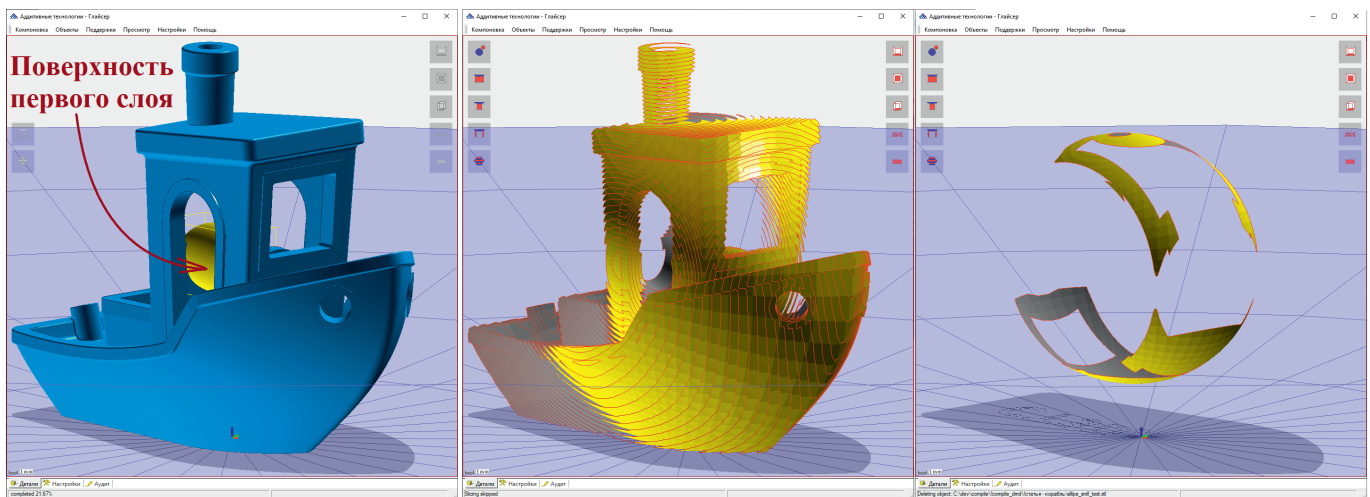


Таблица 2. Способы заполнения слоев при неплоском слайсинге

Плоская некопланарная печать	Поскольку слой плоский, то заполнять его можно двумерными алгоритмами, как при обычной печати.
Неплоская печать в развертках	В частных случаях неплоский слой можно развернуть в плоскость, в этом случае задача опять сводится к 2D алгоритмам
Самый общий случай	Слои неплоские, развернуть их в плоскость невозможно. Необходимо наличие 3D-алгоритмов заполнения (офсеты периметров и штриховки) на трехмерной поверхности

эквидистантными офсетам периметра и штриховкой. К расчету заполнения можно подходить с нескольких сторон, приведем их в таблице 2.

Технологическое ядро ПО «Глайсер» позволяет рассчитывать заполнение неплоских поверхностей в общем виде. Заполнение строится из заданного количества эквидистантных офсетов периметра и штриховки. Пример заполнения сложного трехмерного слоя приведен на следующих рисунках (рис. 7). Показана поверхность

слоя, заполнение только офсетом, заполнение офсетом и штриховкой, контроль нормалей.

Как частный случай можно выделить расчет траекторий для выращивания тонкостенных изделий (рис. 8). В данном примере направление роста на каждом слое выбирается автоматически исходя из направления нормали к поверхности модели.

В некоторых технологических процессах, например, при прямой лазерной наплавке, с целью уменьшения

Рис. 6. Пример расчета неплоских слоев с целью получения новых свойств изделия: модель, плоские слои, неплоские слои — гладкая верхняя поверхность.

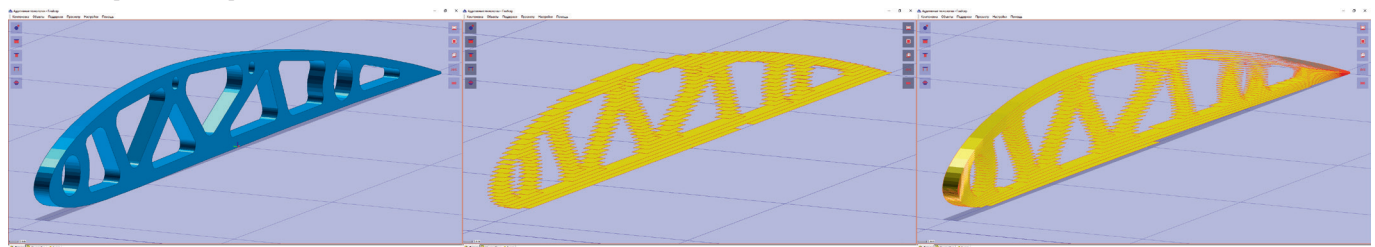


Рис. 7. Пример заполнения трехмерной поверхности-слоя в общем случае: офсеты периметров + штриховка, красным показаны траектории заполнения, синим — нормали в точках траекторий.

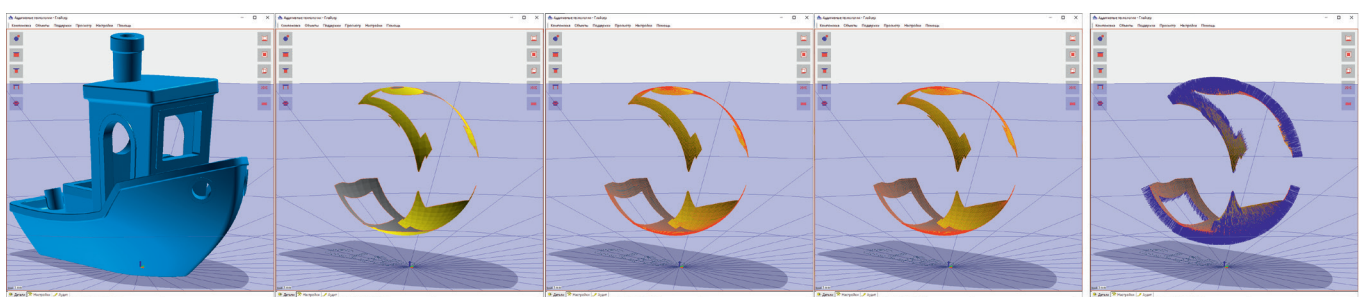
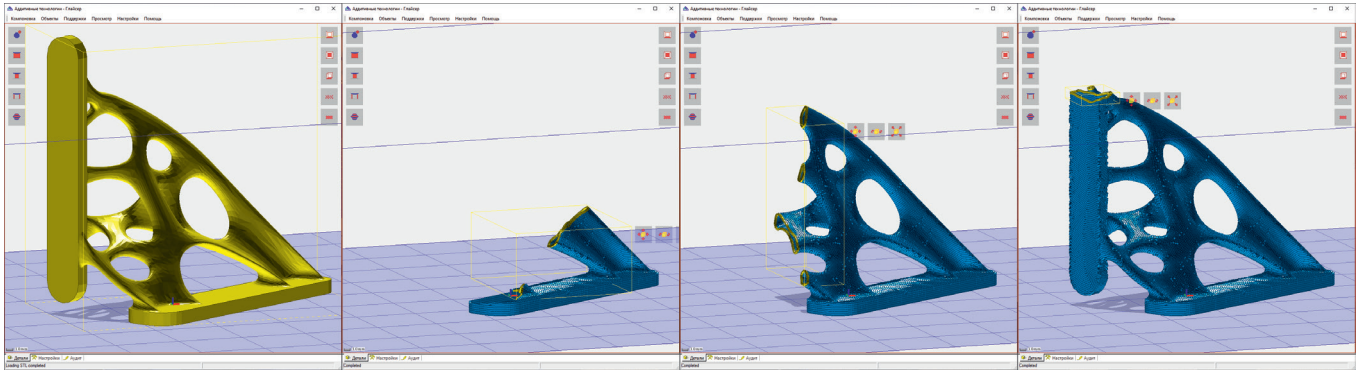


Рис. 8. Расчет траектории синтеза тонкостенных деталей: модель, послойное представление



шероховатости детали, важно, чтобы подача материала осуществлялась по касательной к поверхности. Модуль расчета траекторий позволяет управлять направлением нормали в точках траектории (рис. 9).

Постпроцессор

Заключительный этап работы слайсера — это экспорт управляющей программы, которая зависит от особенностей конкретной аппаратной платформы. Пространственные координаты траекторий и вектора нормалей должны быть пересчитаны в изменения положений, соответствующих исполнительным механизмам и осям 3D+ принтера с учетом его кинематической схемы.

Одной из важных особенностей современного слайсера является возможность визуализации и моделирования всех процессов синтеза. Чем сложнее принтер и его кинематическая схема, тем более востребовано визуальное моделирование процесса печати с точки зрения контроля таких показателей, как достижимость, контроль пересечений, коллизий и т.д.

Наша компания ведет разработки в этой области. Уже реализовано моделирование нескольких кинематических схем, в том числе с использованием манипуляторов. Подробнее с материалами об этом приглашаем познакомиться на нашем канале по ссылке ниже на рис. 10.

В заключение хочется отметить, что мы как софтверная компания понимаем, что наше развитие неразрывно связано с успехами производителей оборудования. Поэтому мы всегда открыты к сотрудничеству со всеми разработчиками принтеров, роботов и другого оборудования с целью создания новых инновационных производственных цепочек. Со своей стороны мы готовы к новым технологическим задачам и вызовам. ■

Рис. 9. Направление нормалей траекторий: модель, неплоские слои, нормали слоя направлены по касательной к поверхности модели, нормали слоя определяются секущей поверхностью.

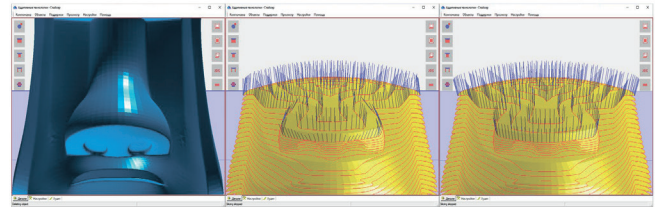
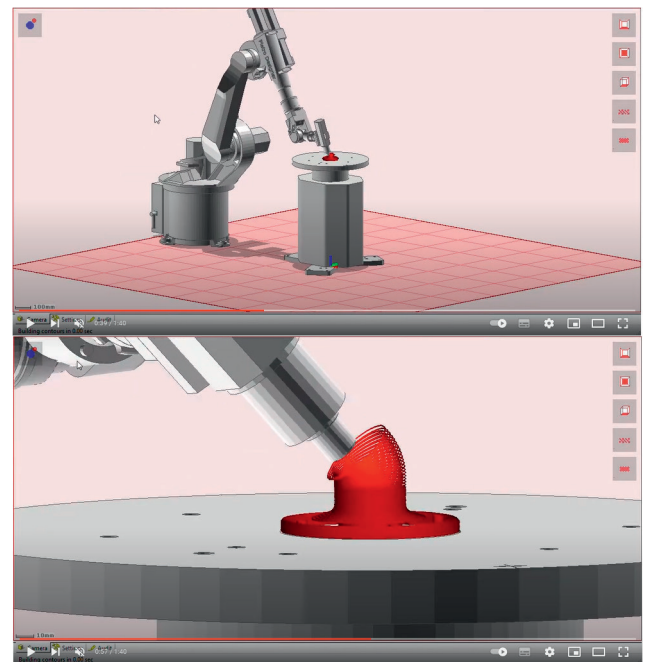


Рис. 10. Моделирование процесса выращивания на принтерах сложных кинематических схем



Больше информации о ПО «Глайсер» можно найти на сайте www.atssgroup.com, а также обучающие русскоязычные видеуроки на нашем youtube-канале:



3D-печать в литейном производстве как конкурентное преимущество

Семен Попадюк, главный редактор блога iQB Technologies
Полный вариант статьи в блоге blog.iqb.ru

Сегодня предприятия самого разного масштаба вовсю пользуются преимуществами 3D-печати, которая легко интегрируется в литейное производство. Благодаря аддитивным технологиям известные с глубокой древности процессы изготовления литейных форм и оснастки упрощаются и ускоряются, а развитие самой 3D-печати позволяет постепенно переходить от прототипирования к мелкосерийному и даже массовому выпуску продукции. А в сочетании с 3D-сканированием и моделированием для контроля качества и реверс-инжинирингом компании получают еще больше возможностей оптимизировать производство.

Преимущества 3D-печати для литейных заводов, предприятий и малого бизнеса

- **Создание сложнейших продуктов.** Пользователи 3D-решений избавляются от ограничений традиционных технологий — теперь воплотить в жизнь можно любую геометрию, любые бионические формы.

- **Повышение качества конечной продукции.** Качество литья по моделям, напечатанным на 3D-принтере, отличается высокой точностью и минимальными отклонениями. В производственном сценарии снижаются потери и минимизируется работа по последующей обработке литых деталей.

- **Сокращение времени выполнения заказа.** На этапе изготовления оснастки можно сэкономить до 90% времени и в несколько раз сократить сроки выполнения заказа на всех последующих стадиях. Чем быстрее вы реализовываете продукцию, тем больше у вас клиентов и тем выше их лояльность.

- **Оптимизация затрат.** Аддитивное производство исключает необходимость в создании дорогостоящей и сложной в изготовлении специальной оснастки — готовое изделие сразу печатается на 3D-принтере. Время, сэкономленное на этом этапе, позволяет ускорить производственный процесс, уменьшить издержки и повысить общую эффективность.

- **Гибкость.** Недостатки конструкции можно устранить сразу, внося правки в САД-модель, — нет необходимости в доработках и переделках, и проектирование

выходит на более эффективный уровень. Все это повышает ценность бизнеса с точки зрения уменьшения расходов и повышения гибкости.

- **Экономия на логистике.** 3D-принтер можно установить непосредственно в цеху, офисе, мастерской, лаборатории. Вы мгновенно получаете результат и не тратите время и средства на транспортировку.

Литье и аддитивные технологии

С распространением 3D-печати использовать традиционное изготовление литейных мастер-моделей и оснастки при единичном, мелко- и среднесерийном производстве стало нецелесообразно.

Рассмотрим, как включение 3D-принтеров в технологическую цепочку помогает оптимизировать процессы литья по выплавляемым и выжигаемым моделям, а также производство песчаных форм и формообразующих элементов пресс-форм из металла. Для решения задач литейных предприятий применяются разные аддитивные технологии, каждая из которых однозначно станет конкурентным преимуществом. Наш материал поможет вам выбрать аддитивный метод и оборудование, подходящие под задачи вашего литейного процесса. Отметим, что в статье мы касаемся не всех видов литья и не всех применимых в этой отрасли 3D-технологий.

MJP: высокоточные выплавляемые модели из воска

Литье по выплавляемым моделям — один из древнейших способов литейного производства, предназначенный для изготовления изделий сложной геометрии с высокой точностью. Здесь как нельзя кстати оказывается многоструйная 3D-печать воском (MJP).

Главное достоинство MJP-технологии — в способности обеспечить высочайшее качество и идеальную гладкость поверхности конечных изделий. 3D-печать восков особенно востребована в ювелирном деле и стоматологии, поскольку позволяет реализовать геометрию любой сложности и существенно снизить финансовые и временные издержки (рис. 1).

Существуют также фотополимерные МЖП-принтеры, но о печати фотополимерами мы расскажем ниже применительно к созданию выжигаемых моделей на стереолитографических машинах.

SLA: крупные выжигаемые модели из фотополимера

Еще один вид точного литья предполагает использование выжигаемых моделей, которые применяются при выпуске ответственных деталей в машиностроении, приборостроении, авиакосмической, автомобильной, судостроительной промышленности и других отраслях. Напечатанные модели могут быть значительно тоньше, чем традиционно изготавливаемые в пресс-формах из пенополистирола.

Лазерная стереолитография (SLA) обеспечивает печать объектов с исключительно гладкой поверхностью, что положительно влияет на качество готовой отливки. Качество поверхности ниже, чем в МЖП-технологии, но большое преимущество SLA — в возможности печатать крупногабаритные изделия для промышленных нужд (рис. 2). Еще больше оптимизировать процесс можно с помощью метода QuickCast, который заключается в создании на SLA-принтере полой модели с внутренней



Рис. 2. Элемент декоративного барельефа для литья гипса через силикон (проект компании TWIZE):

- 3D-принтер: ProtoFab SLA600 DLC
- Толщина слоя: 0,1 мм
- Габариты объекта: 280×144×64 мм
- Время печати: 8 часов
- Результат работы: мастер-модель, пригодная для создания силиконовой формы для получения гипсовой копии



Рис. 3. Восковки из материала WAX3D компании Filamentarno и отливки по ним © filamentarno.ru



Рис. 1. Пример внедрения МЖП-технологии: 3D-печать восковок для массового производства:

- Время печати: 12 моделей за 1 час 20 минут
- 3D-принтер: FlashForge WaxJet 400
- Вес восковой модели: 1,25 г
- Выгоды по сравнению с традиционным процессом: на 50% ускорился выход продукта на рынок, на 30% сократились трудозатраты

ячейкой структурой. Благодаря такому решению модель складывается внутрь при термическом расширении и оболочка не разрушается. QuickCast дает возможность минимизировать расход материала и конечную зольность при выжигании — таким образом, мы получаем качественную поверхность, расходуя меньше материала и снижая вес.

DLP/LCD: быстрая и недорогая фотополимерная печать

Выжигаемые модели можно печатать из фотополимерной смолы с помощью еще двух технологий, основанных на стереолитографии, — DLP и LCD. Принтеры выпускаются чаще всего в настольном исполнении и подходят для печати объектов небольшого и среднего размера. Если в SLA-технологии засветка слоев выполняется лазером, то в DLP используется проектор, а в LCD — ЖК-экран. В последних двух случаях объекты печатаются быстрее, так как целые слои создаются одновременно (а в SLA требуется ручное отслеживание размеров каждого слоя с помощью лазера). DLP-решения стоят дороже и позиционируются как более профессиональные в сравнении с LCD.

FDM: экономичный способ создания выплавляемых и выжигаемых моделей

Еще одна технология 3D-печати, которую можно включить в процесс литья по выплавляемым и выжигаемым моделям, — послойное наплавление пластиковой нити (FDM/FFF). Как известно, это самая распространенная и бюджетная аддитивная технология, но ее основные ограничения — низкая точность построения и невысокая производительность принтеров.

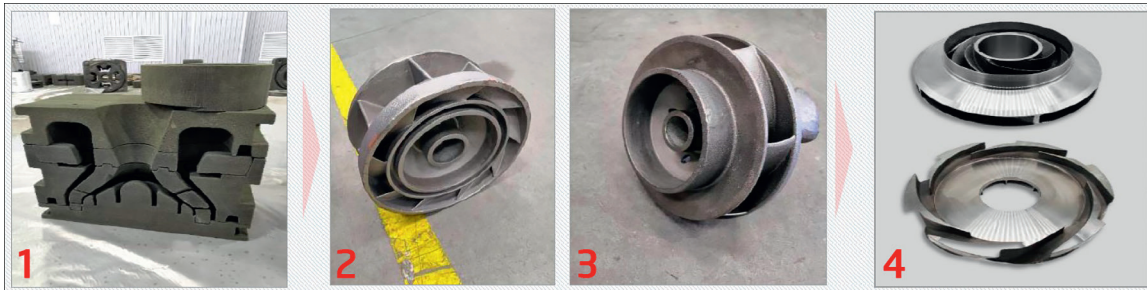


Рис. 4. Отливка рабочих органов насосов в АО «Новомет-Пермь»: • 3D-принтер: Robotech R-2000 • Результат: уменьшение временных и материальных затрат в несколько раз. 1. Песчаная форма. 2–3. Отливки (рабочие органы центробежного насоса). Класс точности отливок – 7.9, шероховатость – от 16 Ra. 4. Изделия после механической обработки

Такие пластики, как полиметилметакрилат (ПММА) и PLA, оставляют небольшую зольность и подходят для крупноформатного литья. На рынке доступны и воскоподобные филаменты (к примеру, WAX3D от российской компании Filamentarno, рис. 3). Они отличаются гибкостью применения и подходят для небольших компаний.

Binder Jetting: изготовление сложных песчаных форм

Литье в песчаные формы — один из самых популярных способов получения отливок (рис. 4). Процесс создания песчаных форм можно оптимизировать благодаря технологии Binder Jetting, позволяющей исключить этапы изготовления модельной оснастки и обжига форм. Метод заключается в послойном склеивании композитного порошка связующим веществом (обычно на основе кварцевого песка или гипса). Кроме песка расходным материалом могут быть гипс, полимеры, керамика или металлы. Метод Binder Jetting, широко распространенный во всем мире, сейчас активно набирает обороты в России. ВJ-принтеры имеют, как правило, большие камеры построения и подходят для крупных предприятий с массовым выпуском деталей на заказ.

SLM: печать оптимизированных элементов пресс-форм

3D-печать металлами (SLM, или селективное лазерное плавление) находит свое применение в сфере НИОКР, единичного, мелкосерийного и экспериментального производства. Особое место занимает возможность усовершенствования литейной оснастки с помощью SLM-принтеров, в частности, речь идет о печати формообразующих элементов пресс-форм с конформным охлаждением (для литья термопластов и металлов под давлением) — рис. 5.

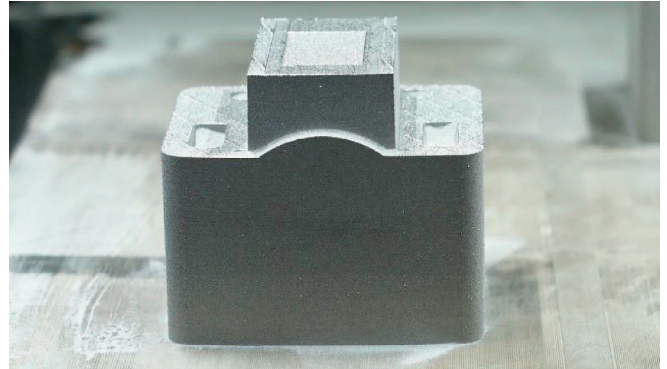


Рис. 5. Процесс аддитивного производства вставок для пресс-форм с конформным охлаждением и «дышащей» структурой:

- 3D-принтер: HBD 350
- ПО для подготовки модели к печати: VoxelDance Additive
- У пресс-форм с каналами конформного охлаждения выше эффективность охлаждения и больше площадь теплоотдачи
- Обеспечивается равномерное распределение температур, позволяющее избежать различных дефектов
- Эффективность производства выше на 35%
- Значительное сокращение цикла изготовления форм и экономия расходов

Каналы конформного охлаждения, которые можно реализовать благодаря 3D-печати, позволяют сократить время охлаждения формованной детали и, соответственно, цикл литья по сравнению с традиционной механической обработкой.

На сегодня селективное лазерное плавление является самой сложной и дорогостоящей аддитивной технологией, однако она преодолевает ограничения классических методов и дает проектировщикам настоящую свободу творчества. Благодаря взаимодействию топологической оптимизации и 3D-печати металлами открывается путь к улучшению существующих деталей и созданию уникальных инновационных продуктов. ■



Если у вас возникли вопросы или вы готовы опробовать **3D-решения в литейном производстве**, свяжитесь с нами. Специалисты **iQB Technologies** оценят возможности внедрения 3D-оборудования на вашем предприятии и подберут подходящие варианты. Мы хотим вместе с вами способствовать росту вашего бизнеса! **blog.iqb.ru**



Методы машинного обучения в аддитивных технологиях

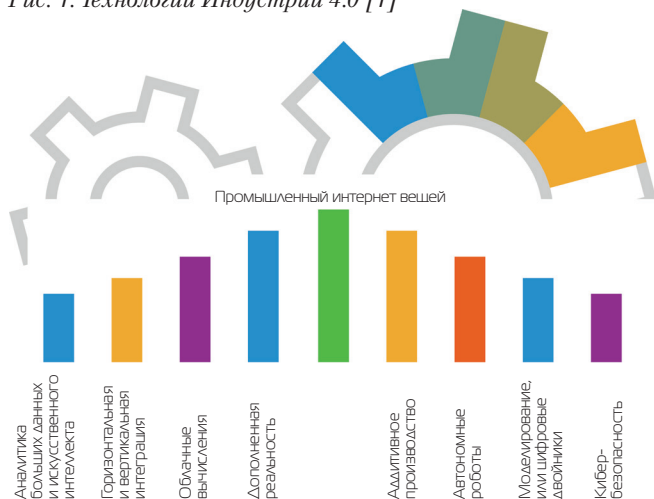


П.А. Петров, Б.Ю. Сапрыкин
Московский политехнический университет, г. Москва

Аддитивное производство (ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015) предполагает реализацию технологического процесса изготовления деталей путем создания физического объекта по электронной геометрической 3D-модели путем добавления материала. Добавление материала осуществляется последовательно, слой за слоем. Процесс не требует изготовления инструмента; реализуется на основе исходных цифровых данных. Аддитивное производство является одним из направлений модели «Индустрия 4.0» (рис. 1) [1], направленной на развитие цифровых промышленных технологий через массовое внедрение информационных технологий в промышленность, автоматизацию бизнес-процессов и распространение искусственного интеллекта.

Понятие «искусственный интеллект» связывают со способностью вычислительной системы имитировать некоторые функции человека, в том числе обучение и решение задач, связанных с анализом данных, принятием решения и прогнозированием развития ситуаций

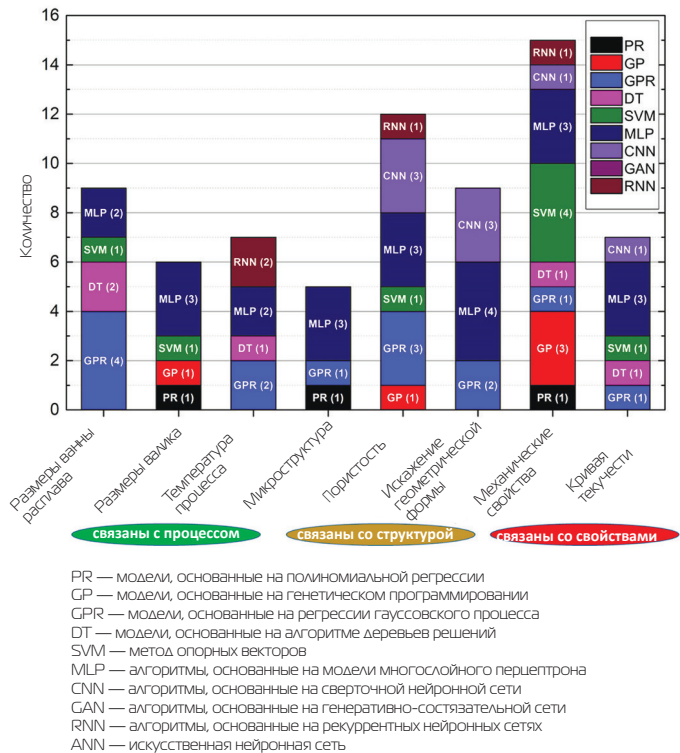
Рис. 1. Технологии Индустрии 4.0 [1]



в предметных областях. Одним из подразделов искусственного интеллекта является машинное обучение (Machine Learning, ML), с которым и связана данная статья в контексте аддитивного производства.

В общем случае машинное обучение заключается в построении моделей с помощью поиска закономерностей в данных (комм. — больших данных, следуя терминологии модели «Индустрия 4.0», или данных на основе статистики) и использовании их для прогнозирования. Например, применение методов машинного обучения при обработке больших объемов данных об исследуемых материалах позволяет прогнозировать необходимое количество физических экспериментов для определения свойств материала; при обработке больших объемов данных о технологических операци-

Рис. 2. Частота применения моделей машинного обучения при моделировании различных характеристик, связанных с процессом, структурой, свойствами в аддитивных технологиях [2]



ях обработки физических объектов позволяет также прогнозировать качество изготавливаемого изделия за счет вычитания материала (механическая обработка), формообразования материала (обработка давлением, литье) или послойного добавления материала (аддитивные технологии). Машинное обучение находит все большее применение при решении исследовательских, конструкторских, технологических задач в аддитивном производстве.

На рис. 2 показана частота применения различных алгоритмов машинного обучения при моделировании количественных показателей, характеризующих процесс изготовления изделия, его структуру и свойства [2]. Показатель «частота» на данном рисунке имеет условное значение и отражает популярность применения различных методов машинного обучения, включая и методы, относящиеся к глубокому обучению, — модели, основанные на нейронных сетях. Диаграмма (рис. 2) основывается на представлении об аддитивной технологии, как сочетании четырех компонентов: 1) исходные (входные) характеристики (признаки), характеризующие аддитивную технологию (процесс), структуру и свойства материала; 2) количественные (выходные) показатели, прогнозирующие характеристики процесса, структуру и свойства изделия; 3) модель, основанная на данных и применяемая для моделирования; 4) источник данных (физический и вычислительный эксперимент). Модель, основанная на данных, связывает входные характеристики с выходными показателями. В качестве входных характеристик рассматриваются: размер ванны расплава, размеры валика (трека), температура процесса, микроструктура, пористость, искажение геометрической формы, механические свойства, кривая текучести

материала изделия, отражающая его сопротивление деформированию, или, как еще говорят, текучесть.

Рассмотрим некоторые прикладные примеры реализации моделей и алгоритмов машинного обучения в аддитивном производстве.

Для применения технологии лазерной наплавки (DMD) необходимо определить параметры процесса, при которых обеспечиваются требования к качеству наплавленного валика, а также к форме его поперечного сечения, в том числе: минимальное перемешивание наплавленного слоя с основным металлом, расплавленным при наложении валиков. Выполнение данного требования обеспечивает формирование в изделии наплавленного слоя (валика) с минимальным проплавлением основного металла и как следствие минимум остаточных напряжений и деформаций [3]. Точного аналитического решения этой задачи не существует [3]; задачу решают экспериментально либо на основе компьютерного имитационного моделирования. При адекватной модели моделирование позволяет сократить количество натуральных экспериментов и воспроизвести физический процесс. На основе модели может быть исследовано качество изготавливаемого изделия, характеризующееся размерами ванны расплава, размерами валика, величиной остаточных напряжений и деформаций (рис. 3) [4]. Решение может быть построено на основе применения модели многослойного перцептрона (MLP) [4], связывающего входные характеристики процесса (параметры лазера и скорость подачи) с выходными показателями, характеризующими качество наплавленного валика (ширина, глубина и высота).

Точность предсказания оценивается метрикой RMSE, определяемой как среднеквадратическое отклонение каждого из размеров валика и принимающей значения 0,59 (ширина)/0,53 (глубина)/0,14 (высота) мм [2]. Как правило, ширина и глубина не сильно отличаются друг от друга. Наиболее существенным является прогнозирование высоты валика, так как от этого показателя зависит точность управления процессом построения по оси Z.

В работе [5] решается интересная практическая задача, характерная для экструзионной аддитивной технологии, — снижение риска термической деграда-

Рис. 3. Прогнозирование качества наплавленного валика на основе применения модели многослойного перцептрона (MLP) [4]

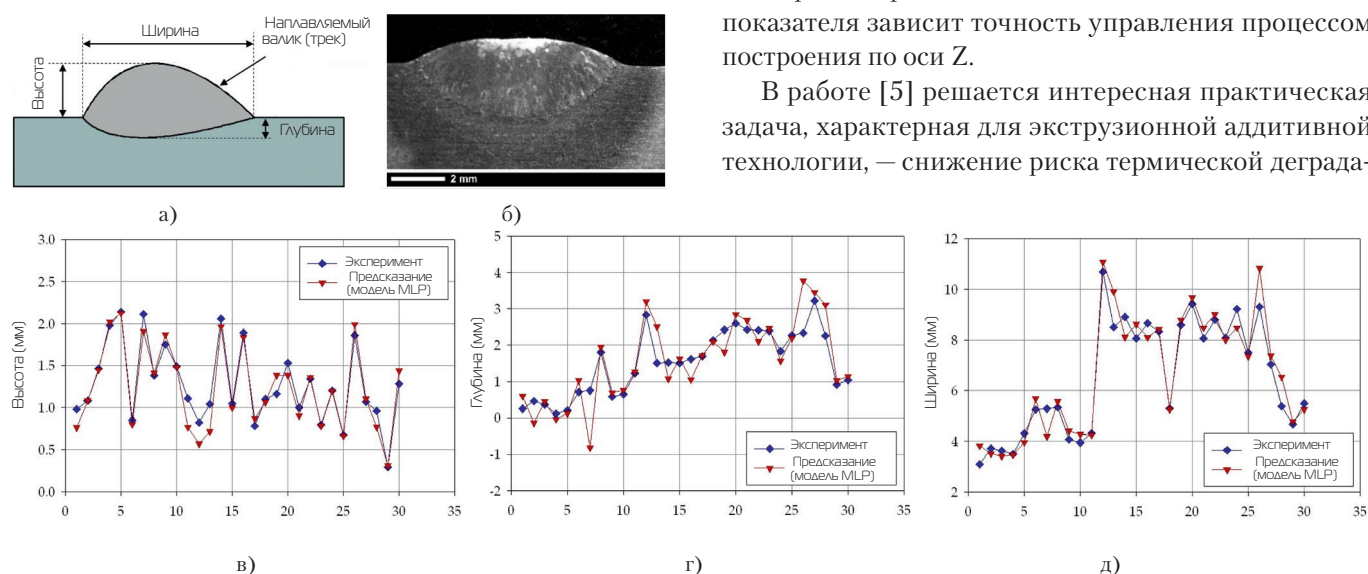
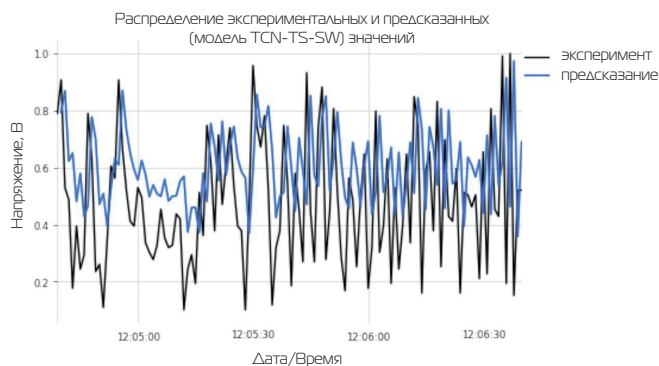


Рис. 4. Предсказание температуры на кончике сопла при экструзионной аддитивной технологии [5]



ции изготавливаемых изделий, предотвращение сбоев при печати, а также снижение риска засорения сопла печатающей головки. Построенная система контроля и управления позволяет выполнять оценку термического состояния на кончике сопла в процессе 3D-печати. Система построена на основе применения модели временной сверточной нейронной сети с двухфакторным скользящим окном (TCN-TS-SW, temporal neural network with a two-stage sliding window strategy) [5]. На рис. 4 показано предсказание для выходного показателя — температуры, измеряемой термопарой в единицах измерения электрического напряжения.

Точность модели TCN-TS-SW оценивается по величине коэффициента детерминации R2, наибольшее значение которого составило 0,923, что указывает на то, что модель имеет высокую значимость.

В работе [6] показан еще один пример применения машинного обучения. Изделие изготавливается по аддитивной технологии — синтез на подложке. С целью повышения стабильности качества продукции и надежности процесса предлагается в режиме реального времени проводить диагностику и предсказание формирования дефектов и пор. В качестве методов выбраны: метод акустической эмиссии и методы машинного обучения. На рис. 5 показано расположение датчика акустической эмиссии, регистрирующего упругую волну в процессе 3D-печати. Собранные данные в виде частотной харак-

Рис. 5. Схема установки датчика акустической эмиссии на рабочей зоне установки для синтеза на подложке [7]

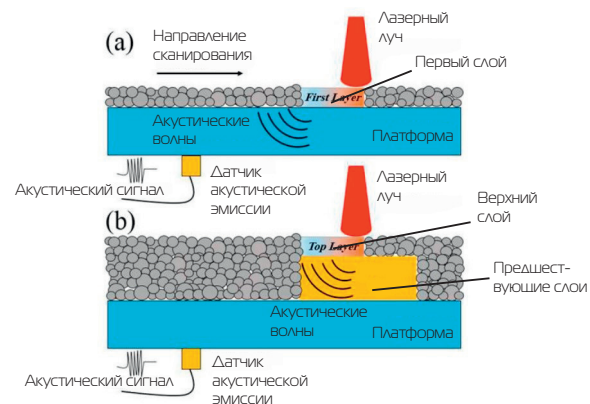
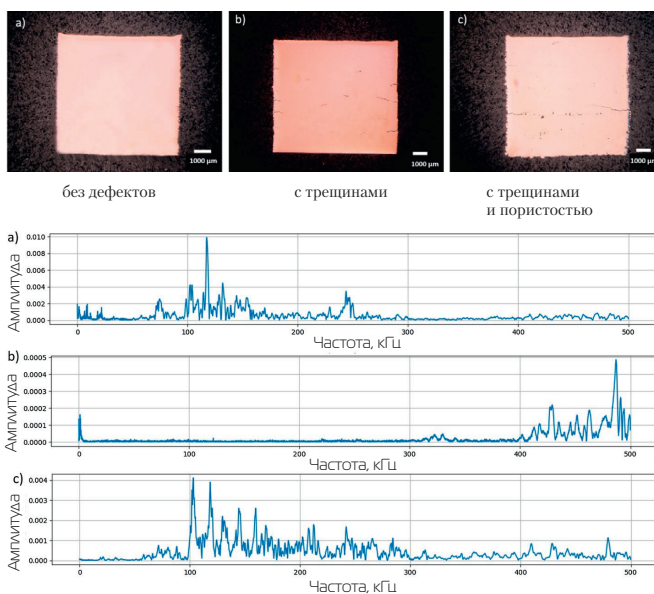


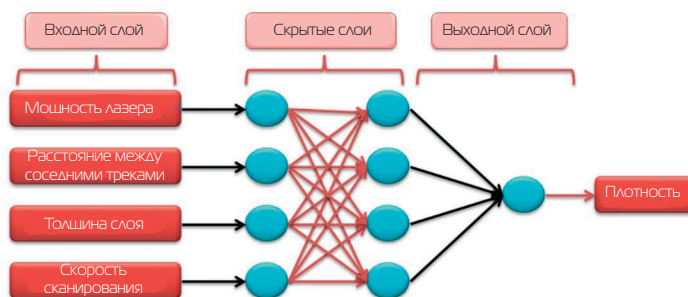
Рис. 6. Типы дефектов и форма сигнала, регистрируемая методом акустической эмиссии [6]



теристики (рис. 6) анализируются с применением методов машинного обучения: метод К-средних (K-means) и глубокая нейронная сеть (DL). Метод К-средних используется для разметки данных, собранных с применением акустической эмиссии; нейронная сеть — для сопоставления акустического сигнала с типом дефекта, формируемого в поперечном сечении образца по его высоте. Выделено три класса: класс 1 — без дефектов, класс 2 — только с трещинами, класс 3 — как с трещинами, так и с пористостью. Точность предсказания каждого класса составила более 90%.

В работе [8] показано, как, применяя методы машинного обучения, оказывается возможным выполнить прогнозирование плотности материала изделия из стали 316L, изготавливаемого с применением технологии синтез на подложке. В качестве алгоритма машинного обучения применяется модель искусственной нейронной сети (artificial neural network, ANN), архитектура которой показана на рис. 7. Точность прогнозирования моделью плотности оценивается по метрике R-квадрата и составляет 0,95, что свидетельствует о хорошей устой-

Рис. 7. Прогнозирование плотности изделия с применением модели ANN [8]



чивости модели (95% экспериментальных значений модель описывает).

Таким образом, в аддитивном производстве машинное обучение все больше находит свое применение при решении задач:

- построение классификации дефектов, прогнозирование их формирования в процессе 3D-печати (рис. 6) и оценка качества изделия [9];
- мониторинг процесса 3D-печати в режиме реального времени (рис. 4);
- предсказание времени 3D-печати изделия и прогнозирование стоимости изделия;
- оптимизация параметров процесса 3D-печати (рис. 2). ■

Литература

1. Что такое «Индустрия 4.0»? [электронное издание] URL: <https://www.sap.com/cis/insights/what-is-industry-4-0.html>.
2. Zhuo Wang, Wenhua Yang, Qingyang Liu, Yingjie Zhao, Pengwei Liu, Dazhong Wu, Mihaela Banu, Lei Chen. Data-driven modeling of process, structure and property in additive manufacturing: A review and future directions. *Journal of Manufacturing Processes*. Volume 77. 2022. Pages 13-31, ISSN 1526-6125. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.053>
3. Хоменко М. Д. Сопряженные процессы теплопереноса, конвекции и формирования микроструктуры при лазерной наплавке с коаксиальной подачей металлических порошков. Дисс. на соиск. уч.ст. канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ имени М. В. Ломоносова, 2019. 123 с.
4. Caiazza F, Caggiano A. Laser Direct Metal Deposition of 2024 Al Alloy: Trace Geometry Prediction via Machine Learning. *Materials*. 2018. 11(3):444. <https://doi.org/10.3390/ma11030444>
5. Agron, D.J.S.; Lee, J.-M.; Kim, D.-S. Nozzle Thermal Estimation for Fused Filament Fabricating 3D Printer Using Temporal Convolutional Neural Networks. *Appl. Sci*. 2021, 11, 6424. <https://doi.org/10.3390/app11146424>
6. Mohammad Ghayoomi Mohammadi, Dalia Mahmoud, Mohamed Elbestawi. On the application of machine learning for defect detection in L-PBF additive manufacturing, *Optics & Laser Technology*. 143. 2021. 107338, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107338>
7. Mohammad Ghayoomi Mohammadi, Mohamed Elbestawi, Real Time Monitoring in L-PBF Using a Machine Learning Approach, *Procedia Manufacturing*. 51. 2020. Pages 725-731, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.102>
8. Gor M. Dobriyal A., Wankhede V., Sahlot P., Grzelak K., Kluczyński J., Łuszczek J. Density Prediction in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: Machine Learning-Based Techniques. *Applied Sciences*. 2022; 12(14):7271. <https://doi.org/10.3390/app12147271>
9. Mojtaba Khanzadeh, Sudipta Chowdhury, Mohammad Marufuzzaman, Mark A. Tschopp, Linkan Bian, Porosity prediction: Supervised-learning of thermal history for direct laser deposition, *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 2018, Pages 69-82. ISSN 0278-6125. <https://doi.org/10.1016/j.jmsys.2018.04.001>

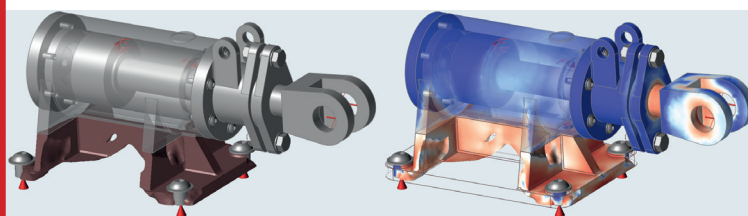


МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ

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-штамповочное оборудование;
- 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 производства и обработки давлением» (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



Сравнение традиционного и аддитивного методов изготовления направляющих аппаратов компрессора газотурбинного двигателя

А.Г. Аксенов, Е.М. Лизунов, Ю.В. Самусина, Р.Н. Фасхутдинов, Р.М. Алиев,
АО «ОДК – Авиадвигатель», www.avid.ru

В данной работе представлены результаты сравнения традиционного и аддитивного методов изготовления направляющих аппаратов (НА) компрессора газотурбинного двигателя (ГТД). Данные результаты включают в себя: сравнение с фрезерованным способом изготовления НА компрессора ГТД, сравнение с паяным способом изготовления НА компрессора ГТД, выбор ориентации 3D-модели детали на платформе построения; создание технологической 3D-модели, учитывающей припуски и элементы поддержки; выбор основных технологических условий процесса селективного лазерного сплавления (СЛС). Показано, что при изготовлении НА компрессора ГТД технологией СЛС трудоемкость изготовления НА снижается до 2,5 раз по сравнению с традиционным методом изготовления НА компрессора ГТД, полученные технологией СЛС, не уступают в пределе выносливости НА компрессора ГТД традиционного изготовления.

Введение

На сегодняшний день аддитивные технологии (АТ) являются одним из наиболее инновационных и перспективных методов изготовления изделий для авиационной промышленности. А одним из направлений аддитивных технологий является технология селективного лазерного сплавления (Selective laser melting, SLM, СЛС) – метод аддитивного производства трехмерных физических объектов за счет сплавления металлических порошков [1]. Технология СЛС позволяет производить детали сложной геометрии в короткие сроки практически без использования технологической оснастки,

за счет чего резко сокращается цикл производства изделий [2–5].

В технологии СЛС используется лазер высокой мощности для расплавления тонкого слоя порошка в соответствии с 3D-моделью [6]. В последнее время наблюдается значительный рост применения аддитивных технологий при производстве сложнопрофильных деталей из сложнообрабатываемых материалов [7].

Актуальной является задача по исследованию возможности изготовления НА компрессора ГТД с помощью технологии СЛС взамен традиционного способа пайки лопаток.

Методика исследования и оборудование

Конструкция двухпорных НА компрессора ГТД (рис. 1) к настоящему моменту реализуется в производстве с помощью пайки отдельно изготовленных лопаток либо фрезерованием лопаток из монолитной заготовки. И тот и другой способ изготовления НА компрессора ГТД характеризуются повышенной трудоемкостью и высокой нормой расхода материала.

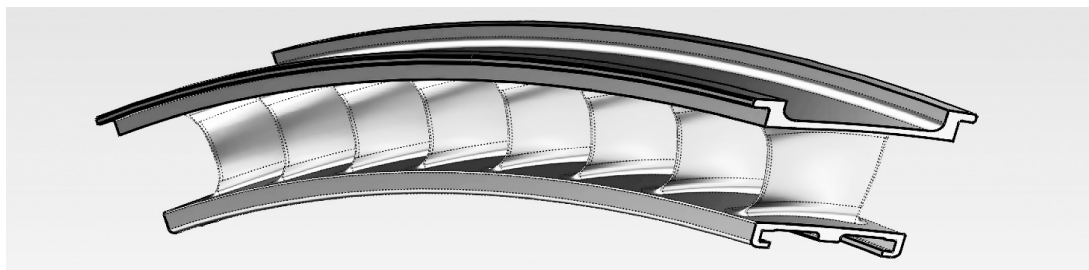
Фрезерованный способ изготовления НА компрессора ГТД включает в себя:

- фрезерование базовых поверхностей и лопаток из заготовки (увеличенное машинное время на обработку больших площадей, высокая сложность программы обработки, ограниченность в инструменте в виду недостаточного доступа к лопаткам);

- полирование проточных поверхностей и лопаток.

Паяный способ изготовления НА компрессора ГТД включает в себя этапы:

Рис. 1.
Геометрическая модель
НА компрессора ГТД



- штамповка лопаток;
- механическая обработка лопаток;
- пайка лопаток;
- механическая обработка НА компрессора.

В условиях изготовления опытных комплектов изделия данная технология имеет следующие негативные факторы:

- высокая суммарная трудоемкость изготовления;
- наличие множества переходов, связанных с операциями двустадийной пайки и дальнейших термообработок;
- низкая адаптивность технологического процесса к возможным изменениям конструкции в ходе доводки узла;
- необходимость изготовления широкой номенклатуры оснастки.

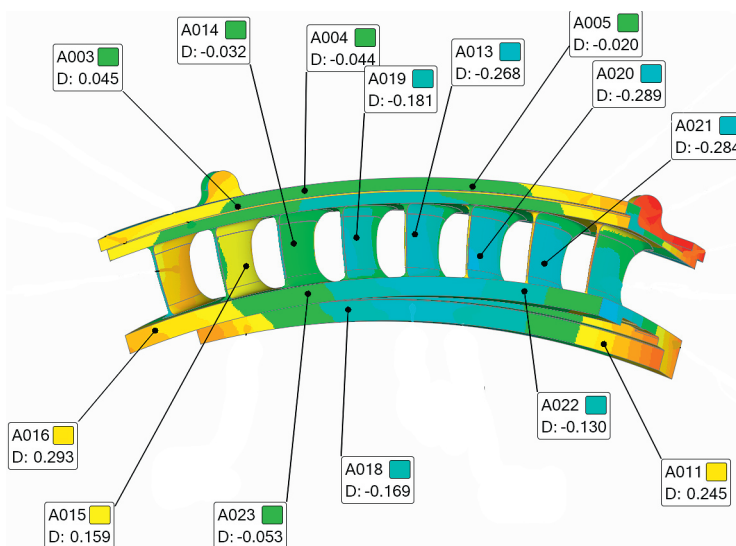
Аддитивный способ изготовления НА компрессора ГТД включает в себя:

- изготовление СЛС заготовок с припуском под полировку лопаток;
- фрезерование базовых поверхностей;
- полирование лопаток и проточных поверхностей.

С целью снижения высокой суммарной трудоемкости изготовления и создания более адаптивной технологии была реализована концепция изготовления заготовок НА компрессора ГТД методом СЛС. Выпущена конструкторская документация на направляющие аппараты компрессора ГТД с учетом оптимизации конструкции под аддитивный способ изготовления.

Выполнена работа по изготовлению нескольких прототипов НА компрессора ГТД на установке аддитивного производства из отечественного сплава ЭП648 (пр-во НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) с возможностью применения горячего изостатического прессования (ГИП). Для контроля характерных для технологии СЛС множественных несплошностей был произведен контроль ЛЮМ1-ОВ на лопатках и проточных поверхностях после механической обработки. Для оценки

Рис. 2. Карта измерения НА компрессора ГТД



предела выносливости СЛС лопаток из сплава ЭП641 были проведены усталостные испытания отдельно изготовленных лопаток.

Экспериментальная часть

В процессе изготовления НА компрессора ГТД в условиях АО «ОДК – Авиадвигатель» специалисты столкнулись с несколькими проблемами:

1. Получение заданной геометрии заготовок с минимальными отклонениями.
2. Формирование кромок пера лопаток.

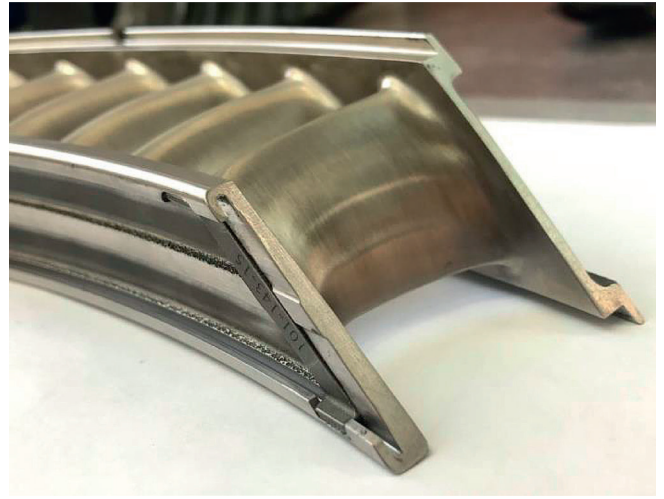
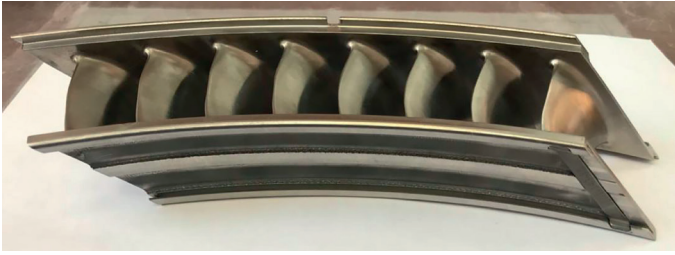
При изготовлении прототипов заготовок основной проблемой являлось расположение и закрепление НА компрессора на плите с получением заданной конструкторской документацией геометрии. На первых образцах были выявлены отклонения полок и смещение пера лопаток (рис. 2)

В процессе проработки результатов отклонений проведена компенсация искажений путем создания предварительно деформированной модели заготовки.

Рис. 3. СЛС-заготовка НА компрессора ГТД



Рис. 4–5. НА компрессора ГТД после механической обработки



При помощи численного моделирования процесса селективного лазерного сплавления были определены искажения геометрии заготовки во время изготовления и получена искаженная модель. Далее провели анализ отклонений полученной модели от номинальной. На основании анализа полученную модель деформировали относительно номинальной. По предеформированной модели проведено повторное численное моделирование процесса изготовления. При изготовлении предеформированной модели было подтверждено улучшение геометрии заготовки.

Второй проблемой являлось формирование кромок пера лопаток. При расположении заготовок под углом относительно плиты построения край лопатки находился в нависающем положении, что привело к частичной деформации края лопаток. Для устранения данной проблемы под каждую лопатку были установлены поддерживающие элементы в виде пластин. Пластины прикреплены с помощью зубчиков к кромке лопатки, что позволило изготовить кромку пера заданной геометрией.

Ключевой особенностью технологии стало изготовление пера лопаток с минимальным припуском под полировку, что существенно снижает трудоемкость механической обработки лопаток. Также применение данной технологии позволило отказаться от механической обработки на некоторых несопрягаемых и не оказывающих влияния на параметры поверхностях. Внешний вид СЛС заготовки НА компрессора ГТД показан на рис. 3.

Аддитивный способ изготовления НА компрессора ГТД включает в себя:

- изготовление СЛС-заготовок с припуском под полировку лопаток;
- фрезерование базовых поверхностей;
- полирование лопаток и проточных поверхностей.

Внешний вид СЛС НА компрессора ГТД после механической обработки показан на рис. 4, 5.

По результатам контроля ЛЮМ1-ОВ на лопатках и проточных поверхностях не обнаружено характерных для технологии СЛС множественных точечных индикаций от несплошностей. Данный результат был достигнут в том числе благодаря применению операции ГИП.

Результаты

Проведены предварительные усталостные испытания лопаток компрессора, изготовленных методом СЛС из материала ЭП648. Полученный предел выносливости не уступает и находится на уровне лопаток компрессора, изготовленных традиционным методом.

Проведенный анализ заложенной трудоемкости изготовления НА компрессора ГТД паяного и аддитивного типа показал, что применение технологии СЛС позволит снизить трудоемкость изготовления до 2,5 раз.

Полученные результаты позволяют применять данную технологию для изготовления НА компрессора ГТД на этапе ОКР с существенным сокращением сроков изготовления относительно паяного способа изготовления. ■

Литература

1. Граф Б., Гоок С. Э., Гуменюк А. В., Ретмайер М. Комбинированные лазерные аддитивные технологии производства лопаток турбин сложной геометрической формы // Глобальная ядерная безопасность. 2016. № 3 (20). С. 34–42.
2. Гарибов Г. С. Металлургия гранул – основа создания новых материалов для перспективных авиадвигателей // Пермские авиационные двигатели. 2012. № 26. С. 58–63.
3. Шишковский И. В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. – СПб.: Питер, 2016. 400 с.: ил.
4. Зленко М.А., Попович А. А., Мутьлина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Издательство политехнического университета. 2013. 210 стр.
5. Суфияров В.Ш., Попович А. А., Борисов Е. В., Полозов И. А. Селективное лазерное плавление жаропрочного никелевого сплава // Цветные металлы. 2015. № 1. С. 79–84.
6. Евгенов А.Г., Роголев А. М., Неруш С. В., Мазалов И. С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // Труды ВИАМ. Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. 2015. № 2. 12 с.
7. Gu D.D., Meiners W, Wissenbach, K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms. International Materials Reviews. 2012. № 57 (3) P. 133–164.

Электрохимическая обработка изделий аддитивного производства из металлов и сплавов

Е.В. Краснова, Б.П. Саушкин, И.А. Слюсарь, С.В. Смян
Московский политехнический университет

Введение

Основными недостатками технологий построения изделий методом селективного послойного плавления порошковых материалов лазерным лучом (СЛП) или пучком электронов (СЭЛП) является высокая шероховатость поверхности построенных изделий и относительно невысокая точность построения [1–4].

Так, в работах [2, 3] отмечается, что процесс аддитивного производства металлических изделий (АП) не отвечает высоким отраслевым требованиям в отношении шероховатости поверхности ($Ra < 1$ мкм и $Rz < 20$ мкм). В [4] отмечается, что из-за высокой шероховатости и других факторов погрешность размера изделия, построенного из сплава Ti-6Al-4V методом СЭЛП, в сечении, перпендикулярном направлению построения, может достигать 1 мм.

Кроме того, многие авторы отмечают наличие дефектов материала в изделиях аддитивного производства (АП), прежде всего пор, и формирование при их построении остаточных напряжений растяжения в поверхностных слоях [5, 6].

Эти факторы, прежде всего высокая шероховатость поверхности, приводят к заметному снижению ресурса изделий при циклическом изменении напряжений и большом числе циклов нагружения [7, 8].

В табл. 1, полученной на основании анализа опубликованных работ, представлены диапазоны изменения значений шероховатости, пористости материала и остаточных напряжений в нем для различных техно-

логий аддитивного производства изделий из металлов и сплавов. Видно, что при использовании электронного пучка в качестве источника энергии, выделяемой в порошковой среде, высотный показатель шероховатости, Ra заметно выше, чем при использовании излучения лазера, соответственно 5–40 и 25–131 мкм. Параметр Rz при некоторых режимах СЭЛП достигает значений 300 мкм и более [10]. Установлено также, что снижение шероховатости поверхности заготовки АП за счет уменьшения среднего размера исходного порошка в условиях СЭЛП практически невозможно, в отличие от СЛП.

Дополнительная обработка заготовок АП

Для снижения пористости и остаточных напряжений используют постобработку, такую как отжиг или горячее изостатическое прессование (ГИП) [11]. Для повышения точности изготовления, уменьшения шероховатости и снижения тем самым влияния концентраторов напряжений на усталостную прочность изделий производят дополнительную обработку (additional processing) изделий АП до требований технической документации [2, 5, 12, 13]. Анализ этой проблемы [1] показывает, что ее невозможно решить только за счет оптимизации параметров процесса АМ из-за его внутренней сложности. Следовательно, отмечают авторы, необходимы эффективные методы последующей обработки как наружных, так и труднодоступных внутренних поверхностей для повышения их качества.

Следует отметить, что, строго говоря, такая обработка не входит в состав постобработки, регламентированной ГОСТом [14], и, следовательно, ее применение автоматически переводит аддитивный процесс формообразования в аддитивно-субтрактивный, частично нивелируя некоторые достоинства АП. Это приводит также к снижению технико-экономических показателей технологий изготовления изделий АП [15, 16].

Аддитивно-субтрактивный процесс доведения свойств заготовки АП до требований чертежа на готовое высокоточное изделие в общем случае включает в себя совокупность операций, основанных на различных методах и способах обработки. Правильный подбор и после-

Таблица 1. Диапазоны значений пористости, шероховатости поверхности и остаточных напряжений при построении изделий методами прямого подвода энергии (DED), селективного лазерного (SLM) и электронно-лучевого (EBM) плавления [9]

Технология	Пористость, об. %	Шероховатость, Ra , мкм	Остаточные напряжения, МПа
DED (laser)	0,01–0,27	0,24–13,3	–
SLM	0,1–0,5	5–40	100–500
EBM	0,1–0,3	25–130	Очень низкие

Рис. 1. Основные методы и технологии дополнительной обработки заготовок АП



довательность выполнения таких операций определяет себестоимость изготовления изделия и в конечном счете целесообразность применения заготовки АП.

Учитывая тот факт, что доработка заготовок АП может осуществляться с применением множества различных альтернативных технологий, задача нахождения наилучшей из них по выбранному критерию является актуальной, что подтверждается значительным числом исследований в этой области [12–13].

На рис. 1 представлены основные методы и технологии обработки, которые принципиально способны решить эту задачу. В табл. 2 приведен сравнительный анализ показателей уровня качества некоторых из этих

технологий, а в табл. 3 представлены результаты анализа их влияния на свойства изделий.

Несмотря на усредненный характер оценки, можно заметить, что каждая из приведенных технологий имеет свои преимущества и недостатки, поэтому для каждого изделия или группы изделий необходимо решать задачу выбора наилучшей технологии из множества вариантов-альтернатив [18]. С этой целью определяют векторные показатели уровня качества сравниваемых технологий, E_i , которые представляются в виде кортежей вида

$$E_i = \langle e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{ik} \rangle, i = 1, 2, \dots, m \quad (1),$$

где e_{ij} – единичные показатели уровня качества, $j = 1, 2, \dots, k$, k – число значимых единичных показателей, m – мощность множества рассматриваемых альтернативных технологий.

Выбор наилучшего варианта осуществляют средствами многокритериальной оптимизации. В технологии машиностроения в большинстве случаев используют метод главного критерия, алгоритм применения которого хорошо апробирован. Однако при практическом нахождении наилучшего варианта технологического решения встречаются некоторые трудности, связанные с необходимостью использования достоверных данных о достигаемых технологических показателях при применении каждой из сравниваемых технологий. База данных возможностей технологий, представленных на рис. 1, только создается, поэтому ее расширение является актуальной задачей.

Таблица 2. Сравнительная характеристика технологий дополнительной обработки изделий АП

Показатели уровня качества технологии	Механическая обработка	Химическое полирование	Электрохимическое полирование	Электролитно-плазменная обработка
Производительность	Средняя	Низкая	Средняя	Высокая
Конфигурация изделий	Простая	Сложная	Сложная	Сложная
Возможные изменения материала	Внедрение абразивных частиц	Пятна травления, неравномерность травления	Образование питтингов	Упрочнение поверхностного слоя
Затраты на инструменты и технологические среды	Средние	Высокие	Средние	Низкие
Производственная площадь	Малая	Средняя	Средняя	Средняя
Риски для окружающей среды	Низкие	Средние	Средние	Низкие
Уровень безопасности жизнедеятельности	Средний	Низкий	Низкий	Средний
Удельная энергоёмкость	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая
Квалификация рабочего	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя

Таблица 3. Влияние дополнительной обработки на свойства изделий АП из металлов и сплавов [17]

Метод дополнительной обработки	Свойства изделий АП				
	Шероховатость поверхности	Пористость	Микроструктура	Остаточные напряжения	Физико-механические свойства материала
Термообработка (отжиг)	Не влияет	Не влияет	Снижение плотности дефектов и возрастание стабильности микроструктуры	Снижение или исключение растягивающих остаточных напряжений	Снижаются предел текучести и предел прочности при растяжении, улучшаются пластичность и сопротивление усталости
Горячее изостатическое прессование	Увеличение шероховатости поверхности	Снижение пористости	Гомогенизация микроструктуры	Снимаются остаточные напряжения	Снижаются пределы текучести и прочности при растяжении, улучшаются пластичность и усталостные характеристики
Лазерная ударная обработка и дробеструйная обработка	Увеличение шероховатости поверхности	Не влияет	Рафинированные зерна и высокая плотность дислокаций	Замена остаточных растягивающих напряжений на сжимающие	Повышается твердость, улучшаются усталостные характеристики
Ультразвуковая нанокристаллическая модификация поверхностного слоя	Улучшение состояния поверхности	Уменьшение при поверхностной пористости	Рафинированные зерна и высокая плотность дислокаций	Замена остаточных растягивающих напряжений на сжимающие	Повышаются твердость поверхности, износо- и коррозионная стойкость, сопротивление усталости
Отделка и механическая обработка	Улучшение состояния поверхности	Не влияет	Не влияет	Не влияет	Повышаются твердость и усталостные характеристики
Лазерное полирование	Улучшение состояния поверхности	Снижение приповерхностной пористости	Рафинированные зерна	Растягивающие остаточные напряжения	Повышаются твердость, коррозионная стойкость, сопротивление усталости
Химическая и электрохимическая полировка	Снижение шероховатости поверхности	Не влияет	Не влияет	Не влияет	Улучшаются усталостные характеристики изделий

Анализ представленных данных показывает, что применение электрохимических технологий позволяет эффективно снижать шероховатость поверхности изделий АП и повышать их сопротивление усталости. Поэтому в ряде работ такие технологии рассматривают как конкурентоспособные [19]. Для формирования конечных свойств изделий АП могут применяться следующие субтрактивные технологии электрохимической обработки: электрохимическое полирование (ЭХП) [19], в том числе сухое полирование (СЭХП) [20] и электрохимическая размерная обработка (ЭХО), которые отличаются друг от друга условиями проведения электролиза и параметрами режима.

Электрохимическая размерная обработка

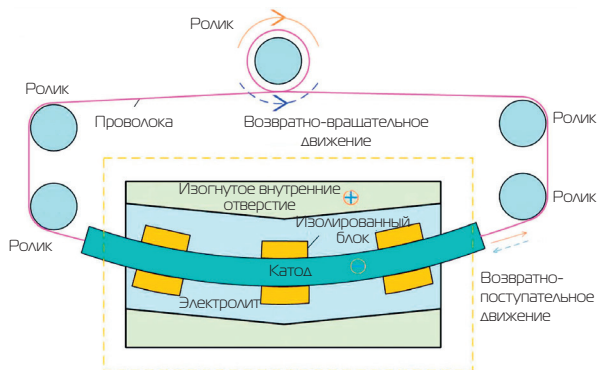
В отличие от электрохимического полирования, возможность применения технологии высокоскоростного анодного растворения в водных растворах минеральных

солей при плотностях тока 10...200 А/см² для окончательной доводки изделий АП мало изучена. Так, в обзоре электрохимических процессов финишной обработки [21] диапазон плотностей тока выше 1 А/см² вообще не рассмотрен. Это связано с необходимостью применения в большинстве операций ЭХРО, выполняемых методом прямого копирования, специальной оснастки и инструмента, что повышает производственные затраты, особенно в условиях единичного и мелкосерийного производства [22]. Вместе с тем проблема отделки поверхности в технологиях ЭХРО успешно решалась [23, 24], а достигнутые результаты позволяют обсудить их применение для дополнительной обработки изделий (заготовок) АП.

В [25] предложен процесс электрохимической обработки (ЭХО), в котором используется солевой раствор для обработки внутренней поверхности, полученной с использованием АП. Его применение позволило снизить шероховатость поверхности (Sa) отверстия

с прямолинейной осью с 14,2 до 6,2 мкм. Отмечается эффективность электрохимической обработки каналов с криволинейной осью в изделиях АП, которые трудно или невозможно обработать другими методами. В этой технологии используется гибкий катод, который совершает возвратно-поступательное движение вдоль оси канала (рис. 2).

Рис. 2. Схема обработки канала с криволинейной осью



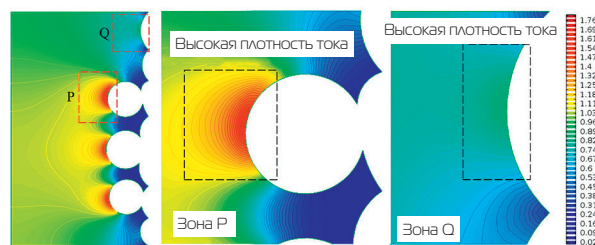
В качестве катода используют движущуюся в обрабатываемом отверстии проволоку диаметром 1,5 мм, отверстие имеет диаметр 3 мм и длину 10 мм. Такая конструкция позволяет использовать плотности тока 2–7 А/см². В качестве электролита использовался раствор 10% NaNO₃ при 25°С. При обработке отверстий с непрямолинейной осью шероховатость Sa снизилась с 15,5 до 8,1 мкм. На рис. 3 представлены результаты моделирования распределения плотности тока в различных зонах на внутренней поверхности отверстия, которые указывают на более высокую плотность тока на частицах порошка с малым радиусом кривизны.

Аналогичная технологическая задача рассмотрена в [26]. Для деталей АП с внутренними каналами предложен новый процесс электрохимико-механического комбинированного полирования (ЭМКП), в котором используется инструмент, состоящий из круга для грубого шлифования, круга для тонкого шлифования и катода. При ЭМКП электрохимическое растворение является доминирующим процессом, ответственным за удаление основного припуска, а механическое шлифование оказывает ограниченное влияние на потерю

Рис. 4. Решетчатая структура после построения и очистки (а), внутренняя поверхность до (б) и после (в) ЭХО



Рис. 3. Распределение плотности тока на внутренней поверхности изделия АП [25]

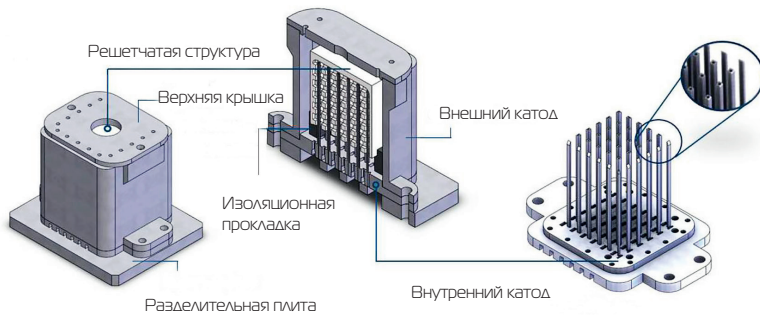


массы заготовки. При комбинированном воздействии остатки порошка удаляются грубым шлифовальным кругом, выступы трека растворяются электрохимически, а пассивная пленка, формирующаяся при электрохимической обработке, разрушается и удаляется кругом тонкого шлифования. Показано, что при обработке прямого внутреннего канала диаметром 30 мм поверхность значительно улучшается, а значения шероховатости Sa и Sq уменьшаются примерно на 71,2% и 68% соответственно. Изогнутый внутренний канал диаметром 18 мм также эффективно обрабатывается с использованием предлагаемого процесса ЭМКП. Кроме того, получаются гладкие поверхности прямых и криволинейных каналов меньшего диаметра — 5 и 9 мм, шероховатость, Sa которых снизилась с 15,9 и 18,2 мкм до 5 и 6 мкм соответственно.

В работе [27] обсуждается технология электрохимической обработки решетчатой структуры из сплава Inconel 718, внутренняя область которой малодоступна (рис. 4, а, б).

Равномерное снижение шероховатости поверхностей такой конструкции представляет собой сложную технологическую задачу с большими удельными ресурсозатратами при использовании иных методов обработки. При разработке технологии ЭХО созданы оснастка и пространственно сложные катоды-инструменты, имеющие специальные штыри для проникновения в сердцевину решетчатого образца, а также отверстия для обеспечения циркуляции электролита внутри и вокруг него (рис. 5). Это позволило снять относительно равномерный припуск электрохимическим растворением по

Рис. 5. Оснастка и инструмент для дополнительной обработки решетчатой конструкции



всей поверхности решетчатой конструкции с улучшением шероховатости поверхности (рис. 4, в). На рис. 6 представлены электронные микрофотографии, на которых виден характер изменения морфологии поверхности в результате ЭХО. Поверхностные агломерации исходного порошка полностью удалены, выравнивание исходной микрогеометрии значительно.

Авторы [28] сформулировали технологическую задачу электрохимической доводки как достижение максимального выравнивания при минимальном снятом припуске и представили результаты экспериментальных исследований ЭХО с использованием биполярного тока, подтверждающих возможность ее решения. Показана возможность и оценена эффективность использования технологии электрофинишной биполярной обработки для доработки изделий АП из различных материалов АП (Ti-6Al-4V, Hast-X, IN 718 и пр.) в электролитах на водной основе, не содержащих HF (табл. 4).

В [29] электрохимическая обработка (ЭХО) применена для чистовой обработки изделий аддитивного производства из сплава Inconel 718, полученных СЛП. Показано, что топография поверхности после ЭХО анизотропна, а шероховатость поверхности (Ra) уменьшается с увеличением плотности тока. С применением ЕСМ были успешно получены такие конструктивные элементы изделий, как глубокие и мелкие отверстия, канавки и плоские поверхности, причем обработанные поверхности были гладкими, границы субзерен или следы треков не наблюдались (рис. 7).

Таблица 4. Достигнутые результаты

Материал	Электролит	Начальная поверхность	Конечная поверхность
Ti-6Al-4V	$H_2SO_4 + 150 \text{ г/л } Na_2SO_4$	Ra/Rz = 20/80 мкм	Ra/Rz = 4/18 мкм
Hastelloy-X	150 г/л Na_2SO_4	Ra/Rz = 13/30 мкм	Ra/Rz = 1,4/6 мкм

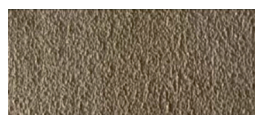
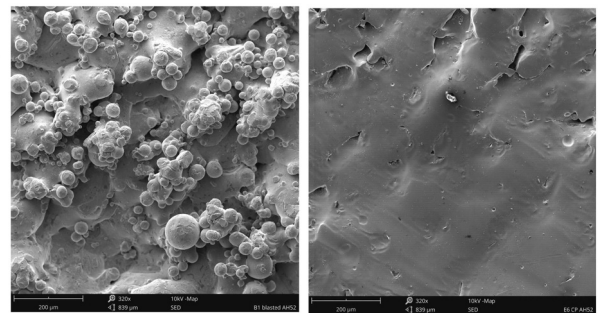


Рис. 6. Электронные микрофотографии внутренней поверхности решетки до (а) и после (б) ЭХО

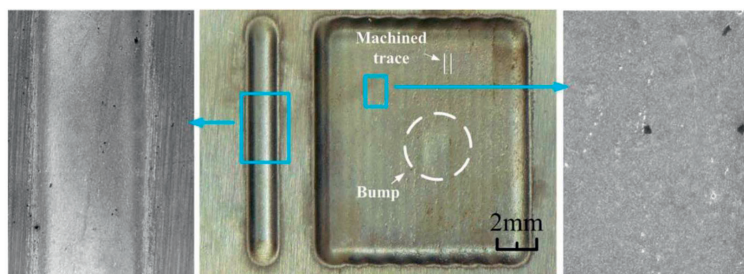


Авторы работы [30] считают, что электрохимическая полировка является одним из эффективных методов постобработки для уменьшения шероховатости поверхности. Ими исследован процесс полировки изделий из коррозионноустойчивой стали 316L, изготовленных селективным лазерным плавлением, в экологически чистом водном растворе $NaNO_3$ при плотностях тока до 40 А/см^2 . Показано, что электрохимическое растворение поперечного сечения образца затруднено по отношению к продольному из-за меньшего размера зерен. Полированная поверхность имеет сетчатую структуру с выемками, а значения шероховатости поверхности значительно снижаются с увеличением общего количества электричества и плотности тока. Электрохимическая полировка при плотности тока 40 А/см^2 привела к максимальному в условиях эксперимента снижению шероховатости поверхности с минимальной потерей веса. Успешно отполированы и внутренние поверхности. Значения шероховатости уменьшились с 17,3 и 18,3 мкм до 2,4 и 2,6 мкм соответственно.

Таким образом, для решения задач отделочной обработки изделий АП в ряде случаев целесообразно использовать технологии высокоскоростного электрохимического растворения, обеспечивающие низкую технологическую себестоимость, в том числе за счет применения универсальных средств технологического оснащения.

К таким технологиям относятся, например, операции электрохимической струйной обработки (electrochemical jet machining, EJM), исследованию и применению которых посвящено много работ [31–36]. В этой операции (СЭХО) при обработке пространственно сложных поверхностей используется метод построчного сканирования специального инструмента в виде струйной головки, через отверстие которой прокачивается электролит при давлении до 10 МПа (рис. 8а). Головка является универсальным инструментом

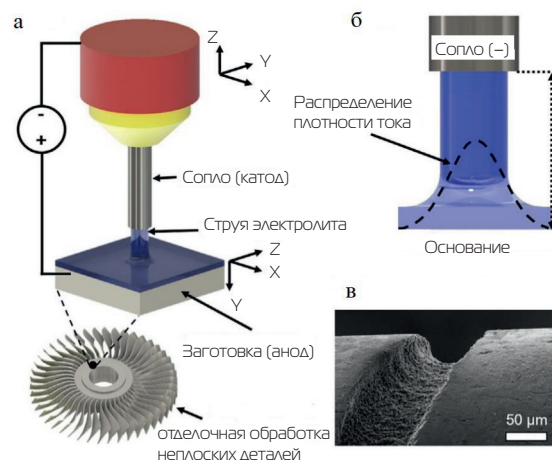
Рис. 7. Канавка и плоское занижение, полученные в сплаве Ti-6Al-4V по технологии ЭХО



со сменными насадками и устанавливается на шпиндель модернизированных или специально созданных станков на платформе многокоординатных фрезерных станков с ЧПУ. Малый диаметр рабочего торца насадки и высокая скорость прокачки электролита позволяют работать при высоких плотностях тока 200–400 А/см² и подачах 20...50 мм/мин.

По мнению авторов работы [31], для последующей обработки внешних и внутренних поверхностей металлических деталей аддитивного производства требуется простой, экономичный и бесконтактный подход к финишной обработке поверхности. Отмечается, что технология струйной электрохимической обработки отвечает этим требованиям. Ими проведены исследования этой технологии для обработки образцов из стали 316L, полученных методом СЛП. Максимальная высота пика и впадины поверхности после СЛП составляла 30,1 мкм и 41,6 мкм соответственно. После СЭХО эти значения были снижены до 13,3 мкм и 9,9 мкм соответственно, а среднее арифметическое значение шероховатости, Ra уменьшилось с 7,8 мкм до 3 мкм. Таким образом, значения параметров Rz max и Ra после электрохимической обработки снизились на 72% и 61% соответственно. Кроме того, после постобработки был удален слой оксидов и карбидов с поверхности построения, сформированный при изготовлении образцов. Авторами сделан вывод о том, что технология СЭХО благодаря своей простоте, универсальности, достаточно высокой производительности, относительно низкой технологической себестоимости, высокому качеству поверхностного слоя конкурентоспособна при доработке изделий АП. В [32] указывается на то, что электрохимическая струйная обработка включает в себя группу бесконтактных технологий, основанных на локализованных струях электролита и отличающихся отсутствием механического или термического воздействия на заготовку в процессе обработки. Эти технологии применяются, как для обработки поверхностей большой площади, так и для выборочного формообразования малоразмерных конструктивных элементов изделия путем электрохимического растворения или осаждения материала. В работе приведен обзор литературы, позволяющей оценить различные аспекты электрохимической струйной

Рис. 8. Схема реализации технологии СЭХО (а), распределение плотности тока в рабочей зоне (б), канавка, полученная на криволинейной поверхности [33]

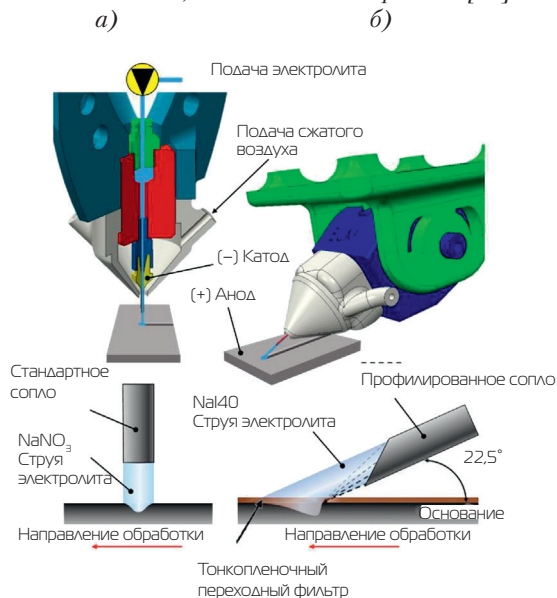


обработки, создать и объединить междисциплинарные направления исследований в этом кластере технологий. Сделана попытка сформировать новое понимание задач и предложить направление будущих исследований, чтобы расширить область применения этих технологий.

В работе [33] использовался электрод-инструмент в виде сопла с диаметром рабочего торца 0,5 мм с продольной подачей 0,3–0,5 мм/с. Величина межэлектродного зазора составляла 0,4 мм, плотность тока 2...4 А/мм², в качестве электролита использовался водный раствор NaCl с концентрацией соли 2 моля/л. Авторы отмечают локализацию плотности тока вблизи рабочего торца инструмента (рис. 8б). Показано, что при подаче инструмента вдоль обрабатываемой поверхности формируется канавка со значительно меньшей шероховатостью доньшка, а наложение таких канавок с соответствующим перекрытием позволяет получить поверхности в том числе сложноконтурные (рис. 8в). Получено, что шероховатость деталей из Ti6Al-4V снижается от (Sq) значения 18,6 мм (в исходном состоянии) до 2,4 мм при быстрой чистовой обработке.

Установлено, что за счет электрофизической модификации межэлектродного зазора можно повысить точность электрохимической струйной обработки [34]. Это позволяет добиться разрешения элементов, сравнимого с другими методами структурирования поверхности, без тепловой нагрузки на поверхность. Показана возможность обработки сложных геометрических элементов с использованием технологии СЭХО. Установлено, что профилирование сопла может изменить распределение плотности тока за счет создания элементов фокусировки поля. Это позволяет манипулировать результирующим профилем получаемого паза. Установлено влияние наклона сопловой головки на результаты обработки (рис. 9).

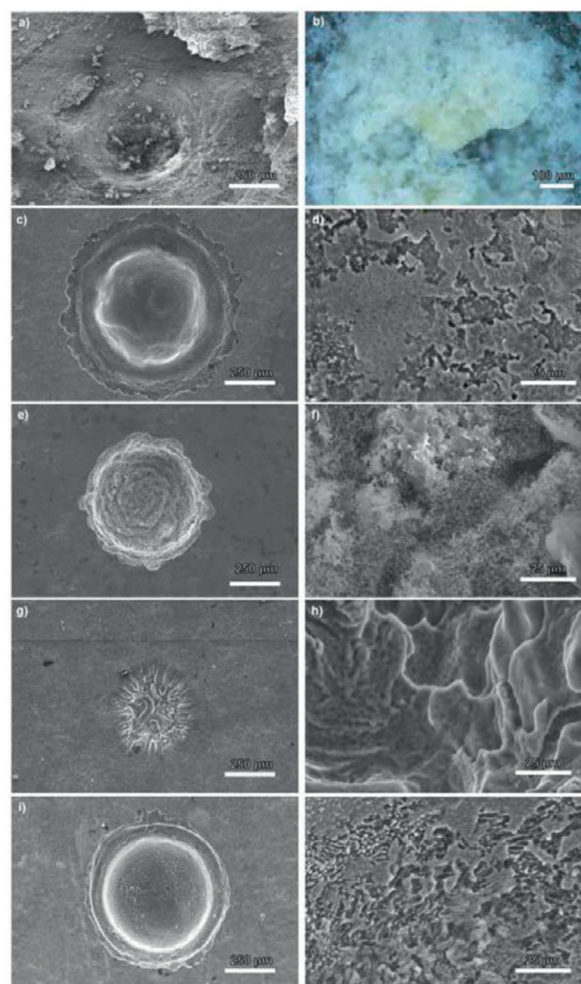
Рис. 9. Схемы СЭХО, использованные в работе [34]



В [35] исследовано влияние состава электролита на геометрические параметры обработанной лунки в титановом сплаве. Эксперименты проводились при постоянном токе 200 мА и постоянном времени обработки 10 с. Электролит прокачивали через сопло электрода диаметром 250 мкм с постоянной скоростью 6 мл/с в течение всего времени обработки. Начальный зазор — 0,5 мм, средняя плотность тока — 408 А/см². В работе использовались электролиты — водные растворы солей: NaNO₃, NaBr, NaCl, NaF с концентрациями 0,5–4 М, а также смешанный электролит состава 0,5:1,5 М NaF/NaCl.

Сделан вывод о том, что электролиты на основе хлорида натрия в условиях данного эксперимента обеспечивают наилучшую текстуру поверхности, наибольшие значения глубины лунок и скорости съема материала, а также низкую шероховатость поверхности, а бромидные электролиты демонстрируют более высокую точность формы лунки. Так, получено, что при обработке в хлоридном растворе скорость удаления массы увеличивается более чем вдвое по отношению к раствору нитрата натрия. Добавление к хлоридному раствору фторида натрия вдвое снижает эффект пере-

Рис. 10. Лунки травления (слева) и микрофотографии их доньшка (справа), полученные в растворах NaNO₃, NaBr, NaCl, NaF и NaF/NaCl (сверху вниз)



реза (отношение диаметра лунки к диаметру сопла) в обработанных лунках (рис. 10).

В [36] изложены результаты совместного проекта Oak Ridge National Lab и Voxel Innovations, выполненного с целью оценки возможности улучшения качества поверхности изделия из склонного к растрескиванию жаропрочного сплава на основе никеля Inconel 738, изготовленного методом селективного электронно-лучевого плавления (EBM) с использованием импульсной электрохимической обработки (РЕСМ). Для изготовления заготовок АП методом СЭЛП использовалась установка Argam Q10+.

Проведены эксперименты на нескольких типах образцов с возрастающим уровнем конструктивной сложности, содержащих конструктивные элементы турбинных лопаток. Эксперименты проводились с использованием водного солевого электролита на малых межэлектродных зазорах. В процессе экспериментальных работ установлено, что параметры импульса оказыва-

Таблица 5. Снижение шероховатости заготовки АП после импульсной ЭХО

Конструктивный элемент	Ra _н , мкм	Ra _к , мкм	Снижение шероховатости	
			Ra _н /Ra _к	(Ra _н - Ra _к)/Ra _н , %
Замковая часть	5,7	1,33	4,3	76,6
Полка верхняя	51	1,52	33,6	97
Входная кромка	56,7	1,92	29,5	96,6
Выходная кромка	41,9	1,87	22,4	95,4
Спинка пера	98,5	1,87	52,6	98
Корыто пера	123,6	1,97	62,7	98,3

Рис. 11. Лопатки турбины и заготовки АП (СЭЛП)

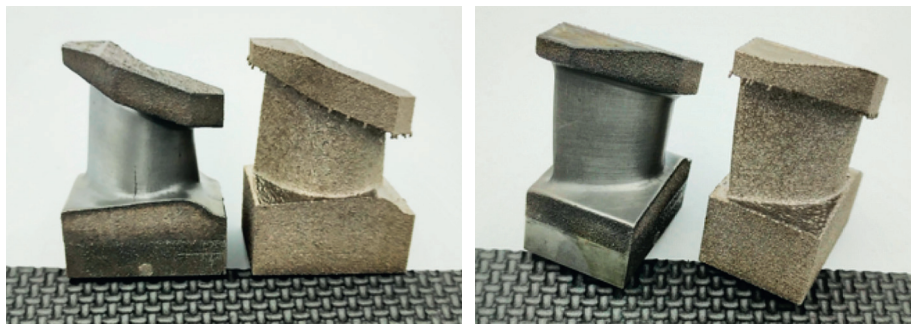
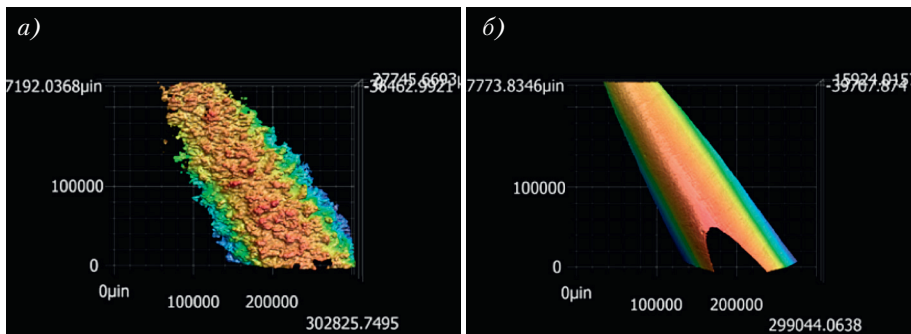


Рис. 12. Шероховатость поверхности входной кромки лопатки после СЭЛП (а) и прецизионной ЭХО (б)



ют значительное влияние на удаление следов сборки, присущих процессу АМ. Параметры можно настраивать для удаления как макро-, так и микронеровностей. Опробовано несколько форм катодов и приспособлений для организации эффективного потока электролита.

Результаты импульсной электрохимической обработки представлены в табл. 5. Видно, что ИЭХО обеспечивает значительное снижение шероховатости на всех характерных участках лопатки. Более того, несмотря на значительный разброс значений начального параметра $Ra_{\text{н}}$ (почти на два порядка величины), конечная шероховатость лежит в пределах $Ra_{\text{к}} = 1,33\text{--}1,97$ мкм, то есть обеспечивается однородность поверхности всех конструктивных элементов, что имеет важное значение при обработке аэродинамических профилей.

Рассмотрена возможность изготовления аэродинамических профилей почти готовой формы и использования процесса ИЭХО для полной обработки критических поверхностей. На рис. 11 показаны лопатка турбины, полученная с использованием технологии ИЭХО, и заготовка АП. Лопатки обработаны на двух режимах: слева и справа. На рис. 12 показаны результаты измерения шероховатости на входной кромке после

Рис. 13. Перо лопатки и переходный радиус, изготовленные по технологии импульсной ЭХО



СЭЛП и дополнительной электрохимической обработки. На рис. 13 представлена лопатка, перо и переходные радиусы которой обработаны на операции импульсной ЭХО.

Авторы отмечают, что производительность данной технологии достаточна для производства лопаток турбин в требуемом масштабе. Анализ области, граничащей с электрохимически обработанными поверхностями, не выявил каких-либо изменений микроструктуры по сравнению с исходным материалом.

Результаты выполненных работ [28, 36] подтверждают тот факт, что импульсная электрохимическая обработка является перспективным процессом финишной обработки для обработки заготовок АП, полученных методом СЭЛП.

Таким образом, используя область параметров режима электролиза, характерную для электрохимической размерной обработки, можно эффективно решать технологическую задачу обработки труднодоступных мест изделий со сложной геометрией и задачу обработки критических мест (элементов) изделия, наиболее уязвимых для образования трещин при циклической нагрузке [17]. ■

Литература

1. H. Fayazfar, J. Sharifi, M. K. Keshavarz (2023). An overview of surface roughness enhancement of additively manufactured metal parts: a path towards removing the post-print bottleneck for complex geometries. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 125(3-4) DOI:10.1007/s00170-023-10814-6.
2. Kumbhar N.N., Mulay A. V. Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review. J. Inst. Eng. 2018, 99, 481–487.

3. Nesli, Ş., Yilmaz, O. (2021). Surface characteristics of laser polished Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting additive manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 1–19.
4. Wang P, Sin W, Nai M. et al. Effects of Processing Parameters on Surface Roughness of Additive Manufactured Ti-6Al-4V via Electron Beam Melting/ *Materials* 2017, 10, 1121; Doi:10.3390/ma10101121.
5. A. W. Hashmi, H. S. Mali, A. Meena et al. Surface characteristics improvement methods for metal additively manufactured parts: a review *Advances in Materials and Processing Technologies* (2022) 8(9):1-40 DOI:10.1080/2374068X.2022.2077535.
6. X. Zhao, S. Li, M. Zhang, Y. Liu, T. B. Sercombe, S. Wang, Y. Hao, R. Yang, L. E. Murr. Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Mater. Des.* 95 (2016). 21–31.
7. B. Vayssette, N. Saintier, C. Brugger, M. Elmay, E. Pessard. Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: effect on the high cycle fatigue life. *Proc.Eng.* 213 (2018) 89–97.
8. Vayssette B., Saintier N., Brugger C. et al. Numerical modelling of surface roughness effect on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V obtained by additive manufacturing. *Int. Journal of Fatigue* 123, 180–195.
9. Liu, S.; Shin, Y. C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Mater. Des.* 2019, 164, 107552.
10. Klassen, A. Bauereiß and C. Korner. Modelling of electron beam absorption in complex geometries. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 47 (2014) 065307 (11pp) DOI:10.1088/0022-3727/47/6/065307.
11. Sh. Cao, Y. Zou, Ch. Voon S. Lim, X. Wu. Review of laser powder bed fusion (LPBF) fabricated Ti-6Al-4V: process, post-process treatment, microstructure, and property. *Advanced Manufacturing*, 2(3). 20 (2021): 313-332.
12. J. Boban, A. Ahmed, M. A. Rahman et al. Polishing of additive manufactured metallic components: retrospect on existing methods and future prospects 2022 *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 121(1-2) DOI:10.1007/s00170-022-09382-y
13. S. Narayanan, T.S.N., Park, H.W. (2022). Surface Finishing Post-treatments for Additive Manufactured Metallic Components. In: Khan, M.A., Jappes, J.T.W. (eds) *Innovations in Additive Manufacturing*. Springer Tracts in Additive Manufacturing. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-89401-6_8.
14. ГОСТ Р 57558-2017/ ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. 2017.
15. Krasnova E. V., Saushkin, B. P., Shandrov B. V. Pre-production engineering in additive manufacturing/ *Lecture Notes in Mechanical Engineering. Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. V. II. Pages 261–268. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6.
16. Löber L, Flache C, Petters R, Kühn U, Eckert J (2013) Comparison of Different Post Processing Technologies for SLM Generated 316L Steel Parts. *Rapid Prototyping Journal* 19:173-179.
17. Ye, C., Zhang, C., Zhao, J. et al. Effects of Post-processing on the Surface Finish, Porosity, Residual Stresses, and Fatigue Performance of Additive Manufactured Metals: A Review. *J. of Mater Eng and Perform* 30, 6407-6425 (2021). DOI:10.1007/s11665-021-06021-7.
18. Наукоемкие технологии машиностроительного производства. Физико-химические методы и технологии / Ю. А. Моргунов, Д. В. Панов, Б. П. Саушкин и др.; под ред. Б. П. Саушкина. — М.: Форум, 2013. — 928 с.
19. Mu, J., Sun, T., Lun Alex Leung, C., Oliveira, J.P., Wu, Y., Wang, H., Wang, H., Application of electrochemical polishing in surface treatment of additively manufactured structures: a review, *Progress in Materials Science* (2023), DOI: https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101109.
20. Криони Н. К., Мингажев А. Д., Горбатова О. Г. и др./ Обработка внутренних поверхностей деталей методом сухого электрополирования / *Вопросы науки и образования*. 2022, 19(103). — С. 15–22.
21. M. M. Basha; S. M. Basha; V. K. Jain; M. R. Sankar. State of the art on chemical and electrochemical based finishing processes for additive manufactured features. 2022 *Materials Science. Additive Manufacturing*. 58 103028 DOI:10.1016/j.addma.2022.103028
22. Электрохимическая обработка изделий авиационно-космической техники/ В. И. Ломаев, Ю. А. Моргунов, Б. П. Саушкин, Г. Б. Саушкин; под ред. Б. П. Саушкина. — М.: ФОРУМ, 2013. — 480 с.
23. Саушкин Б. П., Атанасянц А. Г. Отделочная электрохимическая обработка/ *Практика противокоррозионной защиты*. 2002, 1. — С. 42–49.
24. Саушкин Б. П. Электрохимическая отделочная обработка материалов/ *Металлообработка*, 2001, 1. — С. 27–30.
25. Ch. Zhao, N. Qu, X. Tang Removal of adhesive powders from additive-manufactured internal surface via electrochemical machining with flexible cathode. 2021. *Materials Science. Precision Engineering-journal of The International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology* 67 (2021) 438-452. DOI:10.1016/j.precisioneng.2020.11.003.
26. L. An, D. Wang, D. Zhu Combined electrochemical and mechanical polishing of interior channels in parts made by additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, Volume 51, (2022), 102638 DOI:10.1016/j.addma.2022.102638.
27. M. E. Lynch, K. Williams, M. Cabrera, T. Beccuti Surface finishing of additively manufactured IN718 lattices by electrochemical machining *The Int. J. of Adv. Manufacturing Technology*, V. 113, 967-984 (2021).
28. T. D. Hall, H. Garich, S. T. Snyder, E. J. Taylor *Electrochemical Surface Finishing of Additively Manufactured Parts 2017 231-st ECS Meeting, New Orleans*.
29. X. Wang, N. Qu, P. Guo et al. Electrochemical Machining Properties of the Laser Rapid Formed Inconel 718 Alloy in NaNO₃ Solution. *J. Electrochem. Soc.* V.164, Number 14 (2017)164 E548DOI 10.1149/2.1221714jes.
30. L. An, D. Wang, D. Zhu Improvement on surface quality of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed fusion via electrochemical polishing in NaNO₃ solution 2022 *J. of Manufacturing Processes* 83(8):325-338 DOI:10.1016/j.jmapro.2022.09.005
31. P. Kumar, P. Dixit, B. Chaudhary et al. Surface finishing of an additively manufactured part using electrochemical jet machining (2023) *Materials Today Communications* DOI:10.1016/j.mtcomm.2023.105581.
32. A. Speidel, I. Bisterov, K. Kumar Saxena Electrochemical jet manufacturing technology: From fundamentals to application *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 180 (2022):103931 DOI:10.1016/j.ijmachtools.2022.103931.
33. Speidel A., Sélo R., Bisterov I. et al. Post processing of additively manufactured parts using electrochemical jet machining. *Materials Letters*. 292(6):129671. DOI:10.1016/j.matlet.2021.129671.
34. A. T. Clare, A. Speidel, I. Bisterov et al. Precision enhanced electrochemical jet processing *CIRP Annals* 67 (1), 205-208 DOI:10.1016/j.cirp.2018.04.086.
35. A. Speidel, J. Mitchell-Smith, D. A. Walsh et al. Electrolyte jet machining of titanium alloys using novel electrolyte solutions. *Procedia CIRP* 42: 367-372 DOI:10.1016/j.procir.2016.02.200 36.
36. M. Kirka, D. Herrington *Electrochemical Machining Technology for Surface Improvements of Ni-base Superalloy Additive Manufactured Components*. Oak ridge national laboratory. 2019. — P. 1-6. ORNL/TM-2019/1083.

Аддитивные технологии в медицине: перспективы развития, ближайшие ориентиры, долгосрочные цели

Владимир Сорокин

Традиционно стоматология и хирургия являются теми медицинскими сферами, где 3D-технологии нашли наибольшее применение. В Московском международном выставочном центре 5 декабря 2022 года в рамках международного научно-практического форума «Российская неделя здравоохранения–2022» прошла IV конференция «Аддитивные технологии для медицины: мировой и российский опыт», организованная компанией Z-axis и ЦВК «Экспоцентр», на которой представители различных компаний и исследовательских институтов поделились своим видением относительно перспектив аддитивных технологий в системе здравоохранения.

По словам **Сергея Кулакова, генерального директора компании «Z-axis»**, организаторы представленной программой постарались «объять необъятное» — от расходных материалов для 3D-печати до производства запасных частей для медицинского оборудования.

Рынок 3D-печати для медицины



Роман Горбатов, к.м.н., врач травматолог-ортопед, ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Минздрава России (ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России), сделал развернутый доклад о перспективах развития российского рынка 3D-печати в медицине.

Применение аддитивных технологий в медицине является перспективным для развития всей отрасли. 3D-печать используется в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии, травматологии и ортопедии, нейрохирургии, онкологии, кардиохирургии, общей хирургии и других медицинских специальностях.

Большие возможности АТ открывают в хирургии, применяя 3D-печатные имплантаты. В Северной Америке (www.futuremarketinghts.com, 2019 г.) применение ортопедических имплантатов составляет

53%; зубных — 30%; для челюстно-лицевой хирургии — 17%. Анализ рынка 3D-печатных имплантатов в травматологии и ортопедии (источник: SmartTechAnalysis) показывает, что наибольшее количество реализованных изделий — имплантаты для эндопротезирования тазобедренного сустава, на втором месте по объему продаж — имплантаты для спинальной хирургии. При этом, согласно прогнозам, с 2028 года на второе место выйдут имплантаты для эндопротезирования коленного сустава.

В России с 2016 по 2022 г. реализуется 11 протоколов клинической апробации различных методов лечения пациентов с использованием компьютерного моделирования и 3D-печати. По завершении их реализации будет пролечено 1376 человек, из которых: 1 протокол — лечение пациентов с дефектами костной ткани персонифицированными прецизионными костнозамещающими трансплантатами (150 пациентов), 1 протокол — реконструктивные нейрохирургические вмешательства с использованием фантомного предоперационного трехмерного моделирования дефекта черепа и трехмерной печати индивидуального имплантата для закрытия дефектов черепа (48 пациентов), 4 протокола — эндопротезирование тазобедренного сустава с применением 3D-печати (685 пациентов), 2 протокола — эндопротезирование коленного сустава с применением 3D-печати (288 пациентов), 3 протокола — эндопротезирование плечевого сустава с применением 3D-печати (205 пациентов).

В ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России с 2016 по 2022 гг. было пролечено с использованием аддитивных технологий 3D-печати 808 человек (рис. 1). В клинике с 2015 года функционирует Лаборатория аддитивных технологий. В результате проведенных научных исследований в области аддитивных технологий 3D-печати ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России было получено более 15 патентов, 1 рацпредложение, опубликовано более 60 научных статей, реализовано 7 грантов, разработано более 25 новых технологий создания индивидуальных медицинских изделий с помощью 3D-принтера, разработано 2 протокола клинической апробации, реализовано 8 протоколов клинической апробации различных методов лечения пациентов с

Рис. 1. Направления использования 3D-печати в травматологии и ортопедии. Фото: ФГБОУ ВО «ПИМУ»



помощью аддитивных технологий, изготовлено более 3000 макетов для обучения.

В настоящее время с помощью 3D-принтера можно изготавливать эндопротезы для тазобедренного, плечевого, коленного, голеностопного суставов, прецизионные аугменты под стандартные имплантаты, а также гибридные эндопротезы, состоящие из титанового и костозаменяющего компонентов.

Аддитивные технологии также применяются для создания направителей и хирургических шаблонов: для позиционирования имплантатов, прецизионной остеотомии, удаления опухолей костной системы, высокоточного сверления, введения фиксаторов, биопсии и др. В дальнейшем необходимо проводить работы в следующих направлениях: накожное позиционирование направителей, создание изделий с учетом мягких тканей, снижение инвазии при позиционировании, разработка и регистрация отечественных материалов для создания индивидуальных направителей (безопасность, прочность), повышение точности соответствия результатам предоперационного планирования.

Одним из наиболее распространенных направлений применения АТ в медицине стало создание макетов для обучения и предоперационного планирования. Они применяются: в стоматологии, челюстно-лицевой хирургии, травматологии, ортопедии, нейрохирургии, урологии, общей хирургии, кардиохирургии, онкологии и других медицинских специальностях. Макеты создаются по данным КТ, МРТ, УЗИ, 3D-сканирования.

Направлениями для развития являются:

1. Повышение точности соответствия макетов биологическим объектам.
2. Создание макетов с различными видами тканей (включая мягкие ткани), макетов систем органов и различных сегментов человеческого организма.

3. Совершенствование технологии создания макетов из биогенных материалов.

4. Разработка отечественных технологий полноцветной 3D-печати макетов.

5. 3D-печать макетов из разрешенных к использованию в хирургии материалов, выдерживающих стерилизацию.

Индивидуальные ортопедические стельки также можно печатать на 3D-принтерах. Они применяются при различных патологиях стопы (плоскостопие, синдром диабетической стопы, посттравматические деформации).

С развитием АТ стало возможным создание изделий с очень сложной структурой и высокой точностью, до 2 мкм, например, стентов для лечения глаукомы, имеющих сложную структуру в трех плоскостях.

Активно развивается направление по 4D-печати изделий, которые изменяются с течением времени, как по форме, так и структурно. Что не менее важно, имеется возможность заранее спланировать данные изменения на этапе компьютерного моделирования.



Сергей Кулаков, генеральный директор Z-axis, отметил, что рынок 3D-печати развивается своими темпами. Появляются новые компании. Вместе с тем, процесс внедрения передового оборудования идет медленнее, чем того бы хотелось. Причиной этого является его относительная дороговизна и недостаточность финансирования.

Среди наиболее часто используемых технологий докладчик выделил SLS (селективное лазерное спекание), SLA (лазерная стереолитография) и FDM (моделирование методом послойного наплавления).

Рис. 2. Напечатанная на 3D-принтере подошва кроссовок. Фото: Z-axis



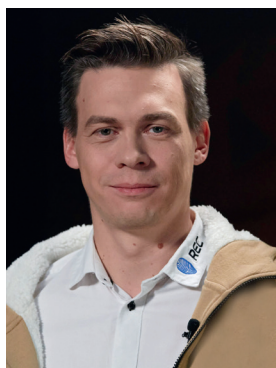
SLS-технологии применяются в инжиниринге, медицине и стоматологии, образовании, моделировании. Наибольшее распространение SLS-технология получила в области мелкосерийного производства. Одним из преимуществ SLS-технологии является возможность получения как пластичных, так и твердых изделий.

Лазерная стереолитография (SLA) — это один из способов печати на 3D-принтере, при котором жидкий полимер меняет свои физические свойства через воздействие на него лазерного излучения. SLA-печать применяется в таких областях, как: точное прототипирование, включая крупногабаритные изделия, автомобильная, тяжелая промышленность, авиация и космонавтика, медицина, обувная промышленность, производство керамических изделий, народные промыслы, мультипликация. Известен опыт успешного внедрения SLA-принтеров, позволяющих печатать формы из высокотемпературных полимеров для замены дорогостоящих алюминиевых изделий, производства ортопедической подошвы в обувной промышленности. Возможна печать прототипа обуви, включая функциональные прототипы (рис. 2).

FDM-технология является самой распространенной. На рынке представлено как относительно дешевое оборудование, работающее с недорогими низкотемпературными пластиками, так и индустриальное оборудование. Например, 3D-FDM-принтеры используются для производства индивидуальных бионических протезов с помощью инженерного пластика PEEK, который по своим механическим свойствам близок к алюминию.

Аддитивные технологии нашли широкое применение за рубежом. В нашей стране необходимо еще предпринять определенные усилия по внедрению и демонстрации преимуществ этих способов, которые все чаще становятся незаменимыми при производстве современных изделий.

Медицинские материалы



В настоящее время в России налажен выпуск достаточно большой номенклатуры материалов, применимых в 3D-печати. **Дмитрий Миллер, исполнительный директор компаний REC и 3D Solutions**, рассказал на конференции о свойствах некоторых полимерных и композиционных материалов для медицины.

Рис. 3. Свойства материала PEEK. Фото: НПО 3D Solution

ПЭЭК (PEEK) – полиэфирэфиркетон

• Главные особенности:

- Широкий температурный диапазон от -60 до +250С (длительно)
- Биосовместимый
- Не отторгается организмом в течение всей жизни
- Твердость 86-88 по шкале Шора D
- Высочайшая прочность



Полипропилен, применяемый в 3D-печати достаточно давно, имеет высокую химическую стойкость к абсолютному большинству реактивов, обладает высокими износостойкостью и эластичностью, но при этом его существенными недостатками является настолько большие коробление и усадка, что не получается изготовить даже самые простые и маленькие изделия. Чтобы избежать последствий деформационных искажений, предлагается применять смеси на основе полипропилена, усадка которых незначительно превышает сжатие ABS-пластика (ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом).

Другим известным материалом для 3D-печати является **полилактид (PLA)** — биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир. Сырьем для его производства служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие как кукуруза и сахарный тростник. Он часто используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), а также в медицине для производства хирургических нитей и штифтов (для таких задач проходит специальную медицинскую сертификацию). Полилактид хорошо подходит для печати ортезов.

В качестве материала для 3D-печати также может быть использован **полиэфирэфиркетон (ПЭЭК, PEEK, рис. 3)**, представляющий собой бесцветный органический термопластичный полимер из семейства полиарилэфиркетонов (PAEK). Применяется для производства имплантатов, но в отличие от медицинского титана, ПЭЭК внедряется пожизненно, никогда не отторгается организмом, не накапливает бактерий, обладает большой прочностью. До недавнего времени такие материалы закупались за рубежом, сейчас на правительственном уровне предпринимаются серьезные шаги по налаживанию производства в России.

В компании также разработана линейка **антибактериальных материалов**, которые могут быть вве-

дены в любую полимерную основу, применимую для производства деталей и узлов систем вентиляции и кондиционирования, холодильного оборудования, одежды, одноразовых медицинских приборов. В полимер особым способом введены частицы на основе оксида цинка с классом токсичности ниже, чем у серебра, имеющие биоцидный эффект. Создается композиция, которая по механическим свойствам практически не отличается от чистого полимера и при этом имеет эффект самообеззараживания. Данные материалы подходят для использования в термопластавтоматах, для 3D-печати, при создании биологических тканей и др.

В Первом Московском государственном медицинском университете имени И. М. Сеченова проведены доклинические испытания на способность данных материалов подавлять кишечную палочку типа золотистый стафилококк. Важность исследования заключается в том, что приблизительно 25–40% населения являются постоянными носителями этой бактерии.



Алексей Орехов, руководитель медицинского направления компании HARZ Labs представил производимые компанией фотополимерные материалы для 3D-печати.

Их применение для 3D-печати в медицине имеет несколько преимуществ: точность и повторяемость результата, биосовместимость

получаемых изделий, автоклавирование и устойчивость к агрессивным средам, низкая стоимость изделий, высокая скорость изготовления.


Применение данных отечественных материалов позволяет наладить в нашей стране выпуск широкой номенклатуры изделий: временные коронки и мосты, хирургические шаблоны, сплинты, капшы, модели для термоформования элайнеров, временные базисы, дес-

Рис. 4. Пример эндопротезирования. Фото: Harz Labs



невые маски. Таким образом, российские стоматологические фотополимеры позволяют заменить материалы, ранее ввозившиеся в страну.

Также в качестве примера успешного применения отечественных материалов был приведен случай, когда потребовалось производство комплекта для эндопротезирования дистального отдела лучевой кости (рис. 4). В подобных случаях при планировании операции невозможно определить объем необходимой резекции. Было представлено три варианта хирургических вкладышей разной высоты. Примерочные модели вкладышей для определения зоны замещения имплантатом позволили установить оптимальный комплект. В другом случае потребовалось изготовить ацетабулярный компонент тазобедренного сустава. Примерочная модель позволила определить оптимальную зону опиления кости без повреждения мягких тканей, в отличие от примерки титанового имплантата с пористой поверхностью. Кость вне зоны резекции осталась максимально нетронутой, процесс заживления протекал лучше, а вероятность осложнений снизилась. К числу успешных случаев применения следует отнести производство шаблона для корригирующей остеотомии большой берцовой кости, шаблона для забора трансплантата и модель глазницы для адаптации.




3D Vision
Центр Аддитивных Технологий

Центр аддитивных технологий с крупнейшим в России парком собственного оборудования

- Продажа 3D-оборудования
- 3D-печать
- 3D-сканирование

- 3D-моделирование
- Литье пластмасс
- Макетирование





Артем Гатич, специалист по развитию бизнеса компании «MyDent 24», сделал в докладе акцент на последних трендах 3D-технологии в стоматологии (рис. 5), где наиболее актуальными являются следующие задачи: автоматизация производства, сокращение

времени на изготовление изделий, отказ от классических материалов — воск, гипс, силикон, хранение данных пациента в цифровом виде; упрощение процесса изготовления изделия, разгрузка фрезерных станков, повышение имиджа клиники/лаборатории.

Применение аддитивных методов с использованием полимерных материалов позволяет получать изделия, обладающие уникальными свойствами и применяемые в различных технических или клинических целях, то есть биосовместимые элементы, предназначенные для работы с открытыми ранами, для продолжительного нахождения в ротовой полости, временные или условно временные коронки, а также детали, которые используются для изготовления металлокерамических или цельных циркониевых коронок.

В стоматологии в основном применяется SLA-технология (стереолитография), позволяющая с помощью источника света слой за слоем, посредством избирательного воздействия в результате фотополимеризации, преобразовывать жидкую светоотверждающую пластмассу в твердые объекты. В качестве источника света выступает лазер. Преимуществами данной технологии является высокая прочность изделий и возможность использовать большую платформу, к ее недостаткам относятся сравнительные характеристики: SLA-технология дороже, чем FDM-технология, и медленнее, чем DLP-технология.

DLP-технология — один из методов аддитивного производства, в основе которого в качестве рабочего материала используются жидкие фотополимерные смолы, затвердевающие в результате воздействия света, излучаемого цифровыми светодиодными проекторами. Его преимуществами является высокая точность и скорость, а недостатком — высокая стоимость оборудования.

Применяется также LCD-технология, при которой источником света выступает система, где свет от светодиодов проходит сквозь жидкокристаллическую матрицу (liquid crystal display). Преимущества технологического процесса — предельно низкая стоимость оборудования и материалов, а его недостаток заключается в том, что качество не отвечает требованиям для

Рис. 5. Применение 3D-печати в стоматологии. Фото: mydent24



большинства работ. Вместе с тем благодаря ценовому сегменту большинство стоматологов, планирующих начать работу с применением 3D-печати, обращает внимание в первую очередь на LCD-технологии. Однако, нарабатывая определенный опыт и выстроив производственную цепочку, а по сути, создав «цифровую лабораторию», которая состоит не только из 3D-принтера, но и оборудования постобработки, руководство стоматологической клиники начинает планировать переход к более продвинутым технологиям, выбирая DLP-технологии.

Преимуществами применения аддитивных технологий в стоматологии является высокая точность и значительное сокращение времени производства изделий, высокая продуктивность при небольшой площади. Даже небольшая платформа позволяет изготавливать большое количество изделий при правильной нагрузке по вертикальной оси.



Александр Мкртчян-Нагорнов, руководитель направления цифровой стоматологии компании AM-Core, продемонстрировал на примерах, как цифровизация в стоматологии вовлекает пациента в процесс планирования его лечения, в результате чего формируется понимание, какой результат будет достигнут в итоге, и, следовательно, человек с большей готовностью производит оплату услуг клиники.

тат будет достигнут в итоге, и, следовательно, человек с большей готовностью производит оплату услуг клиники.

Рис. 6. Применение 3D-печати для получения слепков в стоматологии. Фото: AM-Core



Цифровой сканер за 5–7 минут выполняет 3D-моделирование верхней и нижней челюсти, делает снимок прикуса, записывает движение челюсти. В результате выстраивается интуитивная коммуникация «стоматолог — пациент». Вместо традиционного страха перед стоматологом у пациента образуется яркое впечатление, основанное на ясности и вовлеченности в процесс оздоровления.

Применение сканеров дает возможность не только получить цифровые слепки (рис. 6), интегрированные с мощными инструментами 3D-визуализации, но также подготовить отчет о состоянии полости рта, провести процедуру ортомоделирования. Стоматологическую 3D-модель можно редактировать и печатать прямо в кабинете, что позволяет полностью визуализировать лечение и сократить время на изготовление протезов или коронок. Аддитивные принтеры позволяют производить элайнеры — прозрачные ортодонтические изделия для исправления прикуса, невидимую альтернативу привычным брекетам.

Цифровые технологии обеспечивают рост объема продаж достаточно дорогой продукции — виниров, которые представляют собой фарфоровые или керамические накладки, заменяющие внешний слой зубов. Они позволяют корректировать нарушения формы и цвета зуба, а также защищают зубы (например, при игре на духовых инструментах). Виниры изготавливаются в соответствии с формой, цветом зубов пациента и его

пожеланиями. Для мотивированного убеждения клиента совершить дорогостоящую оплату лечения в одной из клиник уже сейчас предлагается услуга «тест-драйв улыбки», которая предполагает изготовление временных пластиковых виниров. Пациент получает возможность некоторое время проходить с «временной улыбкой», чтобы принять решение о покупке постоянных виниров, доля таких людей достигает 70% от числа обратившихся в клинику.

3D-печать «фантомов»

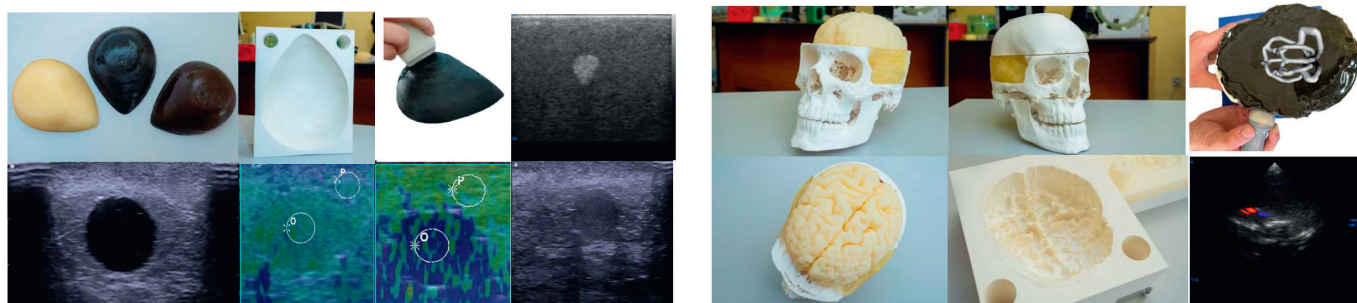


Антон Вячеславович Владимировский, заместитель директора по научной работе ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы», сделал доклад о применении 3D-прототипирования для ультразвуковой диагностики.

В рамках исследований, которые проводит научная дирекция центра, возникла потребность в «фантамах» (рис. 7) — объектах, которые правдоподобно имитировали бы биологические ткани, человеческие органы для того, чтобы тестировать математические формулы, которые являются основой алгоритмов работы ультразвуковых диагностических аппаратов. В результате многолетней работы был создан целый набор «фантомов», которые очень точно и реалистично моделируют живые ткани, в том числе проток биологических жидкостей в человеческих органах. Помимо научных исследований подобные «фантомы» можно применять в сфере образования. Современное медицинское обучение строится на симуляционных технологиях.

Неоспоримым преимуществом симуляционных технологий является и то, что их внедрение позволяет уйти от традиционных форм образовательного процесса на семинарах, где в центре внимания находится препода-

Рис. 7. «Фантомы» для проведения УЗИ. Фото: ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения г. Москвы»



ватель, и сместить акцент на студента, предоставив последнему возможность отрабатывать навык, допускать и исправлять ошибки, анализировать ситуацию и делать выводы. В этом случае уровень внутренних мотиваций к дальнейшему самообразованию становится гораздо выше, чем уровень внешних мотиваций.

Биопечать для замещения дефектов нервных тканей



Сергей Жирнов, инженер биомедицинской инженерии из НОЦ биомедицинской инженерии Университета МИСиС, детально рассказал о применении биопечати для замещения дефектов нервной ткани. Под термином «биопечать» принято понимать 3D-принтинг, с использованием живого клеточного компонента,

что является одним из вариантов биофабрикации — сборки из одноклеточных и тканевых компонентов. В порядке возрастания сложности биопечати различные органы можно расположить следующим образом:

1. Плоские органы (кожа, хрящ).
2. Полые трубчатые органы (сосуды, трахея). Полые нетрубчатые органы (мочевой пузырь).
3. Сolidные органы (почка, печень). У таких органов ткань сильно изотропна, имеет полости, сплошные фрагменты, в которых, в свою очередь, могут присутствовать различные клеточные компоненты.

Важным является решение задачи, предполагающей, что различные компоненты могут соседствовать друг с другом, а их расположение может быть программным образом определено, а не сформировалось бы хаотично.

Для 3D-печати применяются клеточные сфероиды. Сфероид — это агрегат, состоящий из порядка десяти тысяч клеток, который получен клеточным культивированием. Сфероиды загружаются в биопринтер для

печати, например, плоских слоев в виде колец, из которых впоследствии получаются трубки.

Актуальность задачи внедрения технологии биопечати для замещения дефектов нервной ткани определена статистическими данными (рис. 8), которые свидетельствуют, что частота повреждения периферических нервов в мирное время составляет от 1,3 до 15%, а в период боевых действий достигает 20% от числа всех травм. Инвалидность всех травм нерва достигает 60%. Традиционный подход восстановления периферического нерва основан на сшивании разорванных участков. Такая хирургическая практика дает хорошие результаты, но только в случаях, когда нерв был чисто разрезан, а разрыв составляет примерно 1 см. Если нерв был сильно поврежден, регенерация происходит хаотичным образом, а процесс восстановления нейронных связей растягивается на долгие сроки.

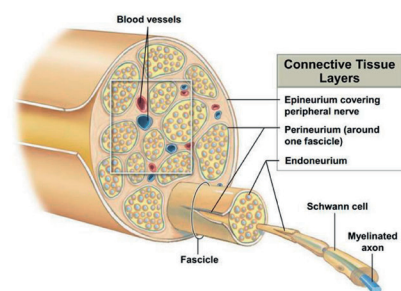
В качестве альтернативы предлагается вставка кондукта — трубочки, которая может быть как полый, так и с наполнителем, имеющей собственную внутреннюю структуру. Вначале было налажено производство полых трубочек с внутренним покрытием для того, чтобы регенерирующие клетки могли закрепиться. Следующим шагом стало производство кондуктов с наполнителями канального типа, где каналы являются своеобразными проводниками для регенерирующих клеток. При этом в кондукт, сформированный литьем, клеточный компонент может быть введен только методом пропитки (сколько клеток закрепится внутри трубки, столько их там и будет), в результате внутри кондукта не удастся достичь требуемой плотности клеточного компонента. Из-за этого клетки не срастаются и не формируют нейронные сети, а зачастую просто отмирают. Постепенно опыт в создании кондуктов с толщиной канала в 150 мкм привел к необходимости перехода от субтрактивных технологий методом литья к 3D-печати.

Для того чтобы создать условия, более благоприятные для срастания нервных клеток, уже достаточно давно было предложено помещать их в гелевую среду. Существуют методы, связанные с применением гидрогеля, который представляет собой сеть сшитых гидрофильных полимерных цепей. Трехмерное твердое тело получается в результате того, что гидрофильные полимерные цепи удерживаются вместе поперечными

связями. Гидрогель обладает ярко выраженными гидрофильными свойствами и сильно набухает, в результате в его составе масса воды достигает 90%. В такой гель заранее загружается клеточный компонент, а затем готовая суспензия помещается в шприц-нож, который устанавливается в 3D-принтер вместо экструдера. Гель с помощью принтера выкладывается по заданной траектории, в результате формируется определенная конструкция с гелем и клет-

Рис. 8. Актуальность печати нервов. Фото: МИСиС, НОЦ биомедицинской инженерии

Задача



Актуальность

Частота повреждений периферических нервов в мирное время составляет от 1,5 до 13%, а в период боевых действий достигает 20% от числа всех травм. Инвалидизация при всех травмах нерва достигает 60% [1]

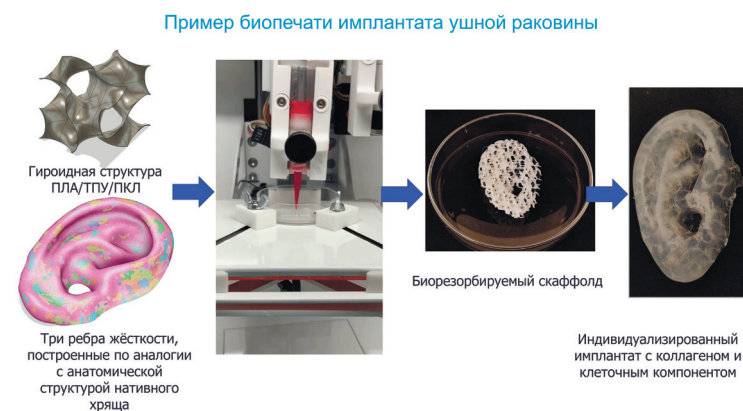
Морфометрические параметры

Диаметр седалищного нерва 5 – 10 мм
Диаметр локтевого нерва 1.5 – 2.0 мм
Диаметр аксона 0.5 – 10 мкм

Биомеханические параметры

Модуль упругости 0.01 – 0.6 МПа
Удлинение при растяжении 5 – 30 %
Предел прочности 0.5 – 6 МПа

Рис. 9. Пример 3D-биопечати имплантата уха.
 Фото: МИСиС, НОЦ биомедицинской инженерии



ками, которую в дальнейшем можно культивировать, получая имплантаты.

Другим вариантом производства искусственных нервных тканей является артикулированная биопечать, предполагающая совместное использование 3D-печати и вспомогательных технологий. Это связано со стремлением повысить процентное содержание клеточного компонента в геле. Известен опыт, когда клеточные сфероиды диаметром до 1 мм нанизывались на иглы, после срастания клеточных тканей полученные нити снимались с иглонок и таким образом получались нервные ткани. Другой известной практикой является формирование некоторой основы, на которую выкладываются нервные ткани, после чего полученный субстрат нарезается на отдельные детали и выкладывается слоями. Допустимо простое сворачивание полотна «в трубочку».

Предлагаемый отечественными разработчиками метод получил условное название «слоеный пирог». В основе метода лежит создание многослойной структуры, состоящей из попеременно чередующихся слоев: напечатанного на 3D-принтере гелевого слоя и гелевой пленки. 20–30 слоев позволяют сформировать имплантат целиком.

Другой успешной практикой применения биопечати является изготовление имплантата для замещения ушной раковины, работа проводится в рамках программы «Приоритет-2030» (рис. 9).

Вначале из полиуретана создается скелет (англ. scaffold — строительные леса) — структура, выполняющая функцию каркаса, точнее, матрицы для заполнения клетками и формирования костной ткани. Три ребра жесткости, построенные по аналогии со сходной структурой нативного хряща, обеспечивают хорошее качество ушного имплантата.

На пористую структуру скелета впечатываются гели, которые впоследствии будут служить субстратом для роста и закрепления клеток. Гель применяется потому, что клетки не могут закрепиться на полиуретане. В результате получается индивидуальный имплантат с коллагеном и клеточным компонентом.

Большие перспективы имеет применение биопечати в режиме *in situ* — непосредственно в операционной, то есть случаи применения 3D-печати непосредственно на живом организме. Предполагается применение роботизированного манипулятора робот-руки с гелевым экструдером, при этом в гидрогель может быть или добавлен клеточный материал, или нет. Появляется привлекательная возможность проводить медицинские операции на кожном покрове даже без участия человека — врача. Первоначально 3D-сканер определяет поверхность, специальные датчики фиксируют дыхание пациента, чтобы точно определить положение поверхности кожи. К настоящему моменту были проведены опыты на мышах и свиньях, которые показали положительные результаты.

Наверное, самым перспективным направлением является биопечать с использованием физических полей. Она представляет собой принципиально другой подход к созданию объектов из живых клеток, главной отличительной особенностью которого является отсутствие поддерживающих конструкций, как, впрочем, и самих печатающих головок. 3D-принтер не наращивает изделие послойно, а формирует его из тканевых сфероидов сразу со всех сторон с помощью технологии магнитной левитации. Система печати представляет собой комплекс магнитов, генерирующих мощное магнитное поле по периметру и минимальное поле в центре, в точку которого помещается емкость с тканевыми сфероидными, равномерно распределенными в гидрогеле. Перед началом работы в кювету впрыскивается парамагнетик, который обычно используется как контраст в магнитно-резонансной томографии, после чего включаются магниты, и парамагнетик за 30 секунд выталкивает все сфероиды в центр кюветы. Подобная система была доставлена на Международную космическую станцию (МКС), где прошла успешные испытания. В космосе были напечатаны хрящевая ткань человека и щитовидная железа грызуна.

Многообразие передовых технологий биопечати требует скорейшего решения двух следующих задач: освоения и внедрения новых технологий биопечати, корректировки регулирования для вывода на рынок клеточно- и тканеинженерных конструкций.

Без выработки решений по данной проблематике дальнейшее развитие 3D-биопечати может оказаться затруднительным.

Планирование хирургических операций

Михаил Новиков, старший научный сотрудник Института проблем лазерных и информационных технологий (ИПЛИТ) РАН, остановился в докладе на



методах планирования сложных хирургических операций с использованием 3D-технологий (рис. 10).

В последнее время стало много говорить о цифровой медицине, при этом под ней подразумевается всё, что угодно от цифровой очереди до цифрового видения органов. Вместе с тем цифровая медицина прежде всего

относится к такой области, как диагностика, точнее, к созданию цифрового образа пациента, позволяющего проводить лечение современными методами.

Томографическое обследование пациента позволяет создать трёхмерные модели, на основании которых можно проводить стандартные процедуры.

Основными целями создания цифровой модели являются:

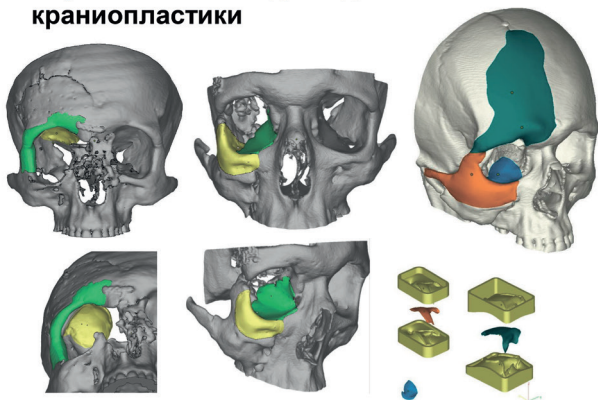
- Планирование сложных восстановительных хирургических операций с помощью CAS-технологий (Computer Assisted Surgery, компьютерная хирургия).
- Увеличение эффективности работы хирурга за счет учета индивидуальных особенностей пациента, оптимизации операционного процесса и минимизации хирургического вмешательства.
- Повышение уровня безопасности пациента, существенное уменьшение продолжительности операций, значительное сокращение и снижение риска послеоперационных осложнений.
- Возможность клинического применения новых биоматериалов, соответствующих параметрам реальных фрагментов организма человека.

Основные цели цифрового моделирования:

- Трёхмерная визуализация томографической информации.
- Построение трёхмерной геометрической модели по данным лучевой диагностики.

Рис. 10. Подготовка к 3D-печати моделей для краниопластики. Фото: ИПЛИТ РАН

Персональные модели для краниопластики



- Компьютерное моделирование по индивидуальной модели пациента.
- Предоперационное моделирование.
- Использование индивидуальной модели зоны дефекта пациента.
- Изготовление инструмента и оснастки для выполнения операции.
- Изготовление прецизионных индивидуальных имплантатов и шаблонов для операций.

Качество цифровых моделей по томографическим данным определяется пятью основными факторами изображений: пространственным разрешением, контрастностью, шумом, пространственной однородностью, линейностью и наличием артефактов.

Основное влияние на точность цифровой модели оказывают артефакты и шумы томографических изображений. Основной задачей сегментации заданной области и выделения требуемой структуры является удаление всех остальных объектов на трёхмерной реконструкции, полученной по томографическим данным. Сегментация изображений определяется тремя основными параметрами: цветовой таблицей, окном плотности, маской видимости.

Базовыми инструментами сегментации являются:

- Вырезание сегментированной структуры с помощью полигона.
- Стирание или прорисовка требуемых структур изображения инструментом заданного размера в виде шара или цилиндра.
- Выделение связанных областей.
- Морфологические операции — наращивание или сокращение объема реконструкции.

Сегментированные структуры позволяют проводить между ними бинарные операции: вычитание, пересечение, объединение. Сегментация проводится с использованием различных систем компьютерной диагностики. Совмещение данных компьютерной томографии (КТ) и магнитно-резонансная томографии (МРТ) позволяет получить более точную компьютерную 3D-модель.

Положительный результат операции зависит от точного задания места и направления резекции как костей черепа, так и малой берцовой кости. Для выполнения этого условия проектируют и изготавливают пластиковые индивидуальные пластины с направляющей плоскостью и отверстиями крепления.

Преимущества применения аддитивного производства в медицине:

- Возможность прямого воспроизведения на основе КТ и МРТ данных прототипов практически любого фрагмента человеческого организма.
- Выполнимость задач создания биокерамических, полимерных, титановых и композитных матриц для тканевой инженерии.
- Достижение целей изготовления имплантатов заданной формы и структуры.

Применение персонифицированной цифровой модели имеет следующие достоинства:

- Индивидуальный подход.
- Удобное 3D-представление томографических данных.
- Возможности компьютерного моделирования.
- Дополнительная информация для врача и пациента.
- Возможность использования АТ.
- Планирование и проведение пробных операций.
- Изготовление индивидуальных шаблонов и имплантатов.
- Возможность использования для обучения.

Современные технологии цифровой медицины совместно с передовыми методами КТ- и МРТ-диагностики в ближайшее время получат самое широкое распространение и, в значительной степени будут определять дальнейшее развитие всей системы здравоохранения.

Ортопедия



Александр Косарев, генеральный директор компании «Здравпринт», рассказал об инновационной замене гипса — аддитивных ортезах, разрабатываемых, как индивидуальные изделия и доведенных до серийной медицинской продукции, получившей регистрационное удостоверение Росздравнадзора (рис. 11).

В России ежегодно происходит примерно 8 миллионов травм конечностей — 4,1 млн верхних, 3,9 млн нижних. Из них 2,5 млн случаев проходят в соответствии с кодами Международной классификации болезней (МКБ-10): код S52 «Переломы костей предплечья» — 815827 случаев; код S62 «Переломы на уровне запястья и кисти» — 607 045 случаев; код S62 «Переломы костей голени и голеностопного сустава» — 643 534 случаев; код S92 «Переломы стопы» — 515 363 случаев.

Большинство людей, получивших травмы конечностей, нуждаются в иммобилизации — создании неподвижности (покоя) поврежденной части тела с помощью подручных средств, готовых транспортных шин (изделий медицинского назначения, входящих в состав аптечек первой помощи) или используя здоровые части тела пострадавшего (аутоиммобилизация).

Традиционный метод, к которому исторически привыкли все врачи, — наложение гипсовой повязки. Однако, с точки зрения пациента гипсовая повязка имеет ряд недостатков: сложности с гигиеной, раздражение кожи, ограничение трудоспособности, большой вес.

Рис. 11. Использование 3D-печати для создания ортезов. Фото: Здравпринт



В качестве альтернативы гипсу используются различного рода полимерные листы, бинты. Они также имеют ряд недостатков, связанных со стоимостью изделий, большим объемом ручного труда врача, не каждая повязка позволяет мыться.

При этом разработаны и производятся аддитивные ортезы, которые обладают рядом преимуществ: легкость и прочность конструкции; простота и скорость наложения; сохранение качества жизни при лечении и реабилитации. Ортезы просты в производстве. Для получения линейных размеров не требуется 3D-сканер, достаточно фотографии, которая позволяет создать 3D-модель. Материалом служит самый распространенный пластик полилактид и самая доступная FDM-технология 3D-печати. Перед использованием врач нагревает заготовку обыкновенным феном для волос и фиксирует на конечности.

Преимущества аддитивных технологий при изготовлении инновационных ортезов:

- Уникальная трехмерная сетчатая структура, которая отводит влагу и тепло и позволяет избежать парникового эффекта, который имеет место у многих полимерных листов.
- Возможность дистанционного создания 3D-модели. Присутствие пациента не требуется.
- Проектирование ортезов любой формы по запросу врача.
- Применение экологичного биоразлагаемого пластика отечественного производства.
- Сухой способ наложения.
- Возможность многократного применения.

Помимо ортезов в компании «Здравпринт» налажено производство фиксаторов для оперативной иммобилизации, которые позволяют выполнять несколько важных медицинских процедур и при этом обладают существенными преимуществами:

- Замена гипса в приемном отделении.
- Послеоперационная иммобилизация в стационаре.

- Возможность многократного применения (от 3 до 10 раз) при обработке антисептиком.
- Приемлемая влагостойкость и низкая масса (вес от 60 до 170 грамм).
- Удобство поставки и транспортировки в плоском виде с последующей формовкой горячим воздухом.
- Возможность поставки в предформованном виде с последующим осуществлением корректировки формы.
- Фиксация бинтом или контактной лентой.
- Возможность оперативной корректировки модели ортеза по техническому заданию врача для адаптации под конкретный метод лечения, требования иммобилизации и эксплуатации.
- Обладают прозрачностью для рентгеновских лучей.

Наработанный опыт подтверждает возможность успешного применения 3D-печати для производства как индивидуальных, так и изготавливаемых крупными сериями медицинских ортезов.



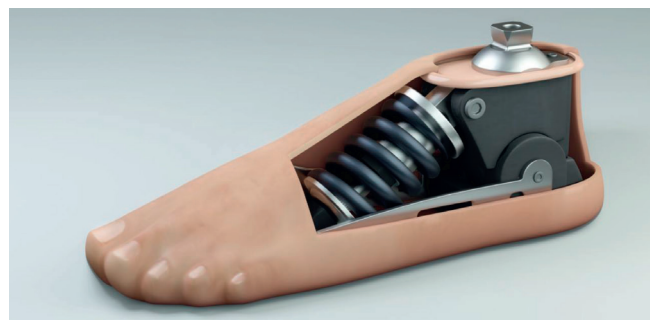
Алексей Собченко, руководитель проекта компании «Медитроника», на примере производства протезов ног по технологии 3D-печати (рис. 12) показал, как использование новых материалов позволяет достигать поставленных целей.

Изначально проект задумывался как создание производства функциональной стопы в ценовом сегменте 25 тысяч рублей. Планировалось также, что изделия будут иметь «футуристический» внешний вид за счет напечатанных на 3D-принтере декоративных накладок. Предполагалось, что гибкость производства позволит вносить изменения во внешний вид изделия и даже менять его цвет в зависимости от пожеланий клиента.

Действительно, за два года реализации проекта прототипы стопы претерпели множество трансформаций. Применение 3D-печати позволяло в каждой итерации существенно приближаться к биологическому аналогу. Основным материалом для 3D-печати был выбран PLA (полилактид) — биоразлагаемый (в теории, но не на практике), биосовместимый, термопластичный полиэфир на основе молочной кислоты. Для производства была использована FDM-технология как самый распространенный способ 3D-печати.

Вместе с тем по ходу развития проекта выявилась одна существенная проблема. Вес изделия оказался неприемлемо большим для протеза — 1300 грамм. В то время как вес такой же продукции, выпускаемой конкурентами и соответствующей мировым стандартам значительно ниже.

Рис. 12. Использование 3D-печати для создания протезов. Фото: Медитроника, www.meditronika.ru



Был найден выход из сложившегося положения. Начались опыты по применению карбона — полимерного композитного материала из переплетенных нитей углеродного волокна, расположенных в матрице из полимерных (например, эпоксидных) смол. Плотность материала составляет от 1450 кг/м³ до 2000 кг/м³.

Было проведено сравнение PLA и карбона, используемого в 3D-печати, и выяснилось:

- PLA и карбон имеют примерно одинаковую прочность на разрыв — около 50 МПа.
- Плотность PLA — 1,25 г/см³.
- Плотность карбона — от 0,9 г/см³.

Более низкое значение плотности является неоспоримым преимуществом данного материала, который позволяет снизить вес на 20% без существенных изменений конструкции.

К числу недостатков такой замены следует отнести следующие факторы:

- Скорость 3D-печати карбоном примерно в 2 раза меньше скорости печати PLA.
- Стоимость карбона примерно в 8 раз выше чем PLA.
- Более высокая температура плавления у карбона (260°C), что влечет за собой применение более дорогих принтеров.
- Карбон как материал не защищен перед растворителями. Ацетон или дихлорметан могут повредить протез в бытовых условиях.

Однако при тройственной альтернативе «быстро — качественно — дешево» стоит выбирать «качественно». Поэтому при выборе медицинского изделия, влияющего на качество жизни человека, целесообразно выбирать протезы из карбона.

Участники конференции, рассказывая о своем опыте применения аддитивных технологий в медицине, подчеркивали основную мысль, что для успешного развития отечественной системы здравоохранения необходимо широко внедрять не только цифровые методы диагностики КТ и МРТ, но и, используя полученные данные, налаживать производство искусственных органов, применяя при этом передовые аддитивные материалы и технологические приемы. ■

Видеозапись конференции: <https://www.youtube.com/watch?v=JV93H2AZme0&t=6659s>

rosmould
& 3D-TECH

rosmould.ru

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

6–8 июня 2023

МВЦ «Крокус Экспо», Москва

3D-TECH

Специализированная
экспозиция аддитивных
технологий и 3D-печати



Промокод для получения
бесплатного билета
RM23-9Z9ZK

GA GEFERA MEDIA

3D-технологии в медицине

*С.И. Гажева, Р.О. Горбатов, М.Н. Егорихина, А.И. Тетерин, К.А. Янышева
ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России*

3D-технологии получили развитие во всех сферах жизни современного человека. Они стали неотъемлемой частью научно-технического прогресса, меняя технологические процессы в алгоритме достижения эффективного результата. В настоящее время 3D-технологии прочно вошли в медицину, заняв особое место в травматологии и ортопедии, нейрохирургии, стоматологии, челюстно-лицевой хирургии, онкологии, биомедицине и т.д. Они способствуют достижению успеха в диагностике и лечении пациентов, а также повышению качества жизни населения, обеспечивая стабильный уровень соматического здоровья. Подтверждением важности и значимости 3D-технологий в медицине явилось масштабное конгрессное мероприятие – VII Всероссийская научно-практическая конференция «3D-технологии в медицине», которая проходила 17 февраля 2023 г. в Нижнем Новгороде по инициативе Ассоциации специалистов по 3D-печати в медицине (президент – Н.Н. Карякин).

Организаторами мероприятия выступили: Министерство здравоохранения Российской Федерации, Ассоциация специалистов по 3D-печати в медицине, Общероссийский национальный союз «Ассоциация онкологов России», Российская ассоциация специалистов в области клеточных технологий и терапии, Ассоциация нейрохирургов Тюменской области, Ассоциация общественных объединений «Стоматологическая ассоциация России», Нижегородская ассоциация стоматологов, Ассоциация цифровой стоматологии, Общественная

Участники всероссийской конференции



организация «Объединение стоматологов Республики Крым», Кластер биомедицинских технологий фонда «Сколково», ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России, ФГБУ «НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена» Минздрава России, ФГБУ «ННИИТО им. Я.Л. Цивьяна» Минздрава России, ГБУЗ «ГКБ им. С. П. Боткина ДЗМ».

Интерес к конференции был серьезным и неподдельным для всех участников – начиная от практических врачей и заканчивая учеными, представителями высшей школы.

Основные направления, которые обсуждались в рамках конференции, – как научные разработки, так

Участники конференции – пленарное заседание



и практические результаты, — включали в себя: технологии 3D-визуализации, техническое и программное обеспечение 3D-печати в медицине, современные материалы для 3D-печати, технологии постобработки напечатанных на 3D-принтере изделий, практические случаи применения аддитивных технологий 3D-печати в медицине, биопечать и биофабрикация — настоящее и будущее, 3D-биотехнологии.

Конференция проходила в гибридном формате. Всего в мероприятии приняло участие около 1000 человек (в том числе более 340 онлайн) из различных городов России (Астрахань, Барнаул, Брянск, Братск, Волгоград, Грозный, Владимир, Казань, Калининград, Кемерово, Калуга, Краснодар, Москва, Нижний Новгород, Новосибирск, Оренбург, Пермь, Ростов-на-Дону, Саранск, Саратов, Ставрополь, Самара, Санкт-Петербург, Тюмень, Ульяновск, Чебоксары, Челябинск, Южно-Сахалинск и др.), а также Республики Казахстан и Республики Беларусь.

Свои доклады участники представили на трех основных секциях: «Травматология, ортопедия и нейрохирургия», «Стоматология и челюстно-лицевая хирургия», «3D-биотехнологии». С вступительным словом к участникам конференции обратились Н.Н. Карякин, И.В. Решетов, А.А. Суфианов, С.Ю. Иванов, С.Д. Арутюнов, А.А. Корыткин.

На пленарном заседании выступил И.В. Решетов, академик РАН, д.м.н., профессор, директор института кластерной онкологии им. проф. Л.Л. Левшина, заведующий кафедрой онкологии, радиотерапии и реконструктивной хирургии ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» Минздрава России (г. Москва) с докладом «Освоение производства и перспективы использования аддитивных технологий в реконструктивной хирургии». В своей презентации он представил два проекта: «Создание высокотехнологичного цифрового производства прецизионных изделий для медицинской отрасли на базе аддитивных технологий» и «Комплекс программный для воссоздания поврежденных костных элементов на базе данных МРТ и КТ».

Выступление академика РАН И.В. Решетова



Президиум конференции



Интервью Р.О. Горбатова средствами массовой информации



Участники конференции — секция «Стоматология и челюстно-лицевая хирургия». Доктора медицинских наук: Р.С. Матвеев, А.Н. Ряховский, С.И. Гажва



Выступление С.Ю. Иванова



Выступление
А.А. Корыткина



Экзопротезирование

Напечатанный на 3D-принтере протез имеет меньшую стоимость и может быть полностью адаптирован к морфологии пациентов.



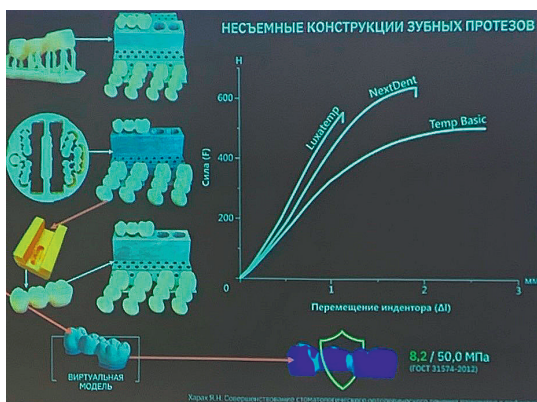
Новосибирский НИИТО
им. Я.Л. Цивьяна Минздрава России

<https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/applications-of-3d-printing/medical-3d-printing/>

Член-корреспондент РАН, член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, д.м.н., профессор, главный врач ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии» Минздрава России (г. Тюмень), заведующий кафедрой нейрохирургии ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» Минздрава России, директор учебно-научного института нейрохирургии РУДН А.А. Суфианов в докладе «3D-технологии в нейрохирургии» поделился уникальным опытом использования 3D-технологий в обучении и практической нейрохирургии, а также результатами применения инновационной технологии 3D-эксоскопии.

Член-корреспондент РАН, д.м.н., профессор, заведующий кафедрой челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии ФГАОУ ВО «РУДН», заведующий кафедрой челюстно-лицевой хирургии ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» Минздрава России С.Ю. Иванов представил методы диагностики, планирования оперативных вмешательств с использованием аддитивных технологий у пациентов с аномалиями развития челюстей и дефектами челюстно-лицевой области.

Выступление
С.Д. Арутюнова
в режиме онлайн



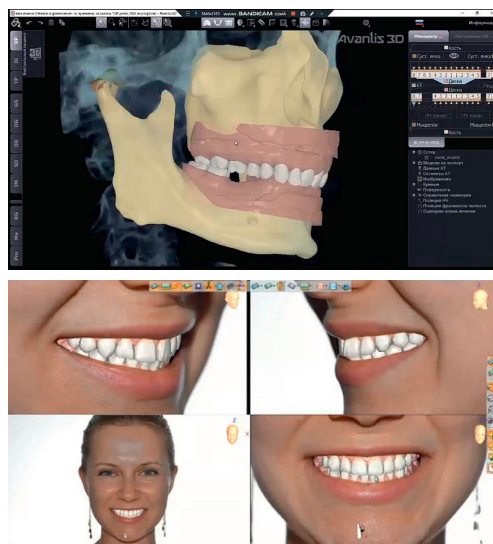
Д.м.н., профессор, заведующий кафедрой цифровой стоматологии ФГБОУ ВО «МГМСУ им. А. И. Евдокимова» Минздрава России, декан факультета среднего профессионального образования ФГБОУ ВО «МГМСУ им. А. И. Евдокимова» Минздрава России С.Д. Арутюнов в режиме онлайн познакомил участников конференции с методами повышения эффективности лечения стоматологических пациентов с использованием цифровых аддитивных технологий, а также продемонстрировал существующие проблемы и перспективные направления дальнейшей цифровизации стоматологической практики.

Информация о сравнении физико-химических и биологических характеристик имплантационных материалов на основе титана, изготовленных методами аддитивных технологий, была представлена в докладе мДолгаева (д.м.н., доцент, профессор кафедры стоматологии общей практики и детской стоматологии ФГБОУ ВО «СтГМУ» Минздрава России, заведующий лаборатории 3D-технологий ФГБОУ ВО «СтГМУ» Минздрава России).

Председатель Ассоциации специалистов по 3D-печати в медицине, к.м.н., директор ФГБУ «ННИИ-ТО им. Я.Л. Цивьяна» Минздрава России А.А. Корыткин рассказал о новых горизонтах применения 3D-печати в травматологии и ортопедии, включая планирование оперативных вмешательств, использование индивидуальных инструментов и имплантатов в лечении пациентов травматолого-ортопедического профиля.

В рамках секции «Стоматология и челюстно-лицевая хирургия» д.м.н., профессор, заведующий отделом ортопедической стоматологии ФГБУ НМИЦ «ЦНИ-ИС и ЧЛХ» Минздрава России, профессор кафедры ортопедической стоматологии ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сечено-

Выступление А.Н. Ряховского



ва» Минздрава России (г. Москва), А.Н. Ряховский в докладе «Автоматизация построения виртуального двойника стоматологического пациента» продемонстрировал готовые решения по автоматизации построения 3D-сцены с применением как традиционных методов, так и технологий искусственного интеллекта.

Поскольку цифровая трансформация образования в медицине является одной из основных задач образовательных учреждений, как высшего, так и среднего уровня, особый интерес у сотрудников высшей школы вызвал доклад д.м.н., профессора кафедры стоматологии,

Выступление А.И. Тетерина



ректора ГАУ ДПО «Институт усовершенствования врачей» Минздрава Чувашии Р.С. Матвеева «Технологии 3D-визуализации в медицинском образовании», в котором была представлена информация об эволюции медицинского образования в России, проблемах цифровизации образования, реальной и виртуальной симуляции в обучении стоматологов, возможностях 3D-печати для вуза, эффективности и перспективах цифрового образования.

Выступление Н.Б. Асташиной



К.м.н., доцент кафедры стоматологии ФДПО ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России А.И. Тетерин в докладе «Методы повышения эффективности стоматологического лечения с использованием 3D-технологий» поделился своим практическим опытом в области современных технологий, которые применяются при планировании ортопедического лечения, рассказал о технологиях интраорального сканирования, 3D-печати, оптической аксиографии, сканирования лица.

Являясь главным врачом клиники «Доктор Дент» и имея клинический опыт, к.м.н., врач стоматолог-ортопед Я.Д. Дёмин познакомил участников конференции с существующими технологиями 3D-печати в стоматологической практике и предложил алгоритм выбора фотополимеров и 3D-принтеров.

Выступление Р.С. Матвеева



- ПРИЧИНЫ СНИЖЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАДИЦИОННЫХ ФОРМ ОБРАЗОВАНИЯ В МЕДИЦИНЕ**
- Зависимость учебного процесса от графика работы медицинской организации и наличия профильных пациентов.
 - Недостаток квалифицированных и заинтересованных преподавателей и наставников.
 - Невозможность обучения на пациентах.
 - Высокий уровень технологизации отрасли.
 - Нежелание пациентов быть «подопытными».
 - Рост самосознания и юридической грамотности обучающихся.
 - Субъективная оценка практической подготовки.
- ВВЕДЕНИЕ ПРОЦЕДУР АККРЕДИТАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКИМ НАВЫКАМ**



К.м.н., доцент кафедры челюстно-лицевой и пластической хирургии ФГБОУ ВО «МГМСУ им. А.И. Евдокимова» Т.М. Дибиров представил информацию о применении аддитивных технологий при планировании челюстно-лицевых операций.

А.Г. Манукян, врач стоматолог-ортопед, главный врач сети стоматологических клиник AestheticA (г. Москва) проинформировал участников конференции о возможностях применения малоинвазивных технологий при изготовлении керамических виниров.

В своем докладе д.м.н., заведующая кафедрой ортопедической стоматологии ФГБОУ ВО «ПГМУ им. академика Е.А. Вангера» Минздрава России Н.Б. Асташина осветила тему «Перспективы применения аддитивных технологий в челюстно-лицевой ортопедии и ортопедической стоматологии».

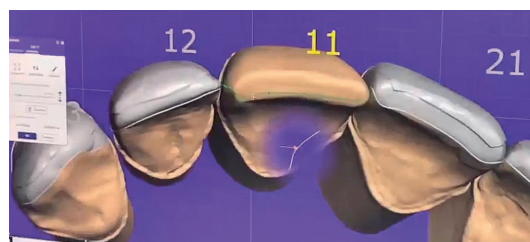
Д.м.н., профессор кафедры челюстно-лицевой хирургии им. академика Н.Н. Бажанова ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» Минздрава России (г. Москва), пластический хирург, челюстно-лицевой хирург отделения реконструктивно-пластической хирургии с медицинской реабилитацией Института травматологии и ортопедии Университетской клиники ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России (г. Нижний Новгород) Н.Л. Короткова выступила с докладом «Адаптация цифрового протокола при коррекции посттравматических деформаций лица» и представила результаты использования цифровых технологий при лечении пациентов с дефектами лицевого скелета — один из современных трендов реконструктивной хирургии.

В рамках VII Всероссийской научно-практической конференции «3D-технологии в медицине» в первый раз и с большим успехом была проведена работа секции «3D-биотехнологии». В ней приняли участие ведущие ученые России, работающие в сфере биомедицины, клеточных и скаффолд-технологий.

Выступление П.С. Тимашева



Выступление А.Г. Манукян



На секции «3D-биотехнологии» д.х.н., доцент, директор научно-технологического парка биомедицины ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» Минздрава России П.С. Тимашев сделал доклад о применении 3D-технологий в формировании биоэквивалентов.

Об оценке *in vitro* влияния аллогенной костной матрицы на характеристики мезенхимальных стромальных клеток из жировой ткани при создании комбинированных тканеинженерных конструкций рассказала д.м.н., заместитель директора по научной работе ФГБУ «ННИИТО им. Я.Л. Цивьяна» Минздрава России И.А. Кирилова. Кооперация стромальных стволовых клеток и иммунных клеток на *in vitro* модели регенерации костной ткани была представлена в докладе Л.С. Литвиновой, д.м.н., директора Центра иммунологии и клеточных биотехнологий ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта».

Доклад Л.Л. Семеньева (д.х.н., доцент, заведующая научно-исследовательской лабораторией НИИХ ФГАОУ «ННГУ им. Н.И. Лобачевского») был посвящен новым композитным материалам для регенеративной медицины на основе сополимеров коллагена.

О.В. Тюмина (д.м.н., профессор РАЕ, директор ГБУЗ «Самарский областной медицинский центр «Династия», профессор кафедры госпитальной терапии ФГБОУ ВО «СамГМУ» Минздрава Рос-



ФГБУН «ИБР им. Н.К. Кольцова» РАН (г. Москва) Е.А. Воротемяк представила доклад о 3D-моделировании эпителио-мезенхимных взаимодействий в ходе морфо- и гистогенезов.

Генеральный директор Покровского банка стволовых клеток (г. Санкт-Петербург) Е.М. Приходько в своем докладе поднял крайне важную и достаточно проблемную для Российского здравоохранения тему перехода от лаборатории к производству в области клеточных технологий. В рамках его доклада научному сообществу была представлена недавно зарегистрированная некоммерческая организация «Российская ассоциация специалистов в области клеточных технологий и терапии», одной из ключевых задач которой

является объединение специалистов, работающих в этой области, и обеспечение взаимодействия профессионального сообщества и регуляторных органов исполнительной и законодательной власти.

является объединение специалистов, работающих в этой области, и обеспечение взаимодействия профессионального сообщества и регуляторных органов исполнительной и законодательной власти.

сии, г. Самара) в своем докладе рассмотрела пуповину как источник клеток для 3D-печати.

На секции «3D-биотехнологии» прозвучало еще очень много интересных докладов. Например, коллеги поделились передовыми разработками, направленными на формирование трехмерных конструктов, способных восстанавливать качественно и функционально поврежденные ткани и органы. Рассматривались фундаментальные вопросы, связанные с физико-химическими аспектами формирования 3D-каркасов — скаффолдов. Важным в рамках секции стал вопрос рассмотрения скаффолдов с точки зрения теории искусственной клеточной ниши. Так, в докладе М.Н. Егорихиной (к.б.н., руководитель лаборатории биотехнологий, ведущий научный сотрудник ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России) была проведена аналогия скаффолда на основе биополимеров и природной клеточной ниши мезенхимальных стволовых клеток. Член корреспондент РАН, д.б.н., руководитель лаборатории клеточной биологии

является объединение специалистов, работающих в этой области, и обеспечение взаимодействия профессионального сообщества и регуляторных органов исполнительной и законодательной власти.

В рамках работы секции «3D-биотехнологии» для участников конференции было организовано посещение лаборатории биотехнологий университетской клиники и вивария для крупных лабораторных животных ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России (Н. Новгород, ул. Семашко, 22). Участники ознакомились с организацией и работой лаборатории, ключевой спецификой которой является совмещение научной и клинической деятельности в области клеточных технологий и материалов для биомедицины. В виварии были продемонстрированы условия и специфика содержания крупных лабораторных животных, таких как свиньи, а также оборудование операционной и организация экспериментальных исследований в условиях вивария SPF (specified pathogen free).

Выступление В.Ю. Мурылева



На секции «Травматология, ортопедия и нейрохирургия» о результатах применения индивидуально изготовленных 3D-компонентов вертлужной впадины в ревизионном эндопротезировании тазобедренного сустава при массивных костных дефектах доложил д.м.н., профессор, заведующий Московским городским центром эндопротезирования костей и суставов ГБУЗ «ГКБ им. С.П. Боткина» ДЗМ В.Ю. Мурылев.

С.А. Чесноков (д.х.н., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией фотополимеризации и полимерных материалов ФГБУН «ИМХ им. Г.А. Разуваева» РАН) посвятил доклад нанолитографическому синтезу 3D-объектов в медицине и перспективам их использования в практическом здравоохранении.



Об опыте применения 3D-печати в военной медицине рассказал С.А. Пелешок, д.м.н., профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова». В докладе Е.А. Кукошко (начальник травматологического (реконструктивно-восстановительного) отделения ФГБУ «ГВКГ им. Н.Н. Бурденко» Минобороны России) был представлен уникальный алгоритм замещения огнестрельных дефектов костей конечностей при помощи 3D-технологий.

Результаты использования 3D-печати в лечении пациентов с опухолями костей таза продемонстрировал Е.А. Сушенцов (к.м.н., заведующий отделением ортопедии ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России»). Также о применении аддитивных технологий в лечении больных с опухолями опорно-двигательного аппарата доложил Д.К. Агаев (врач-онколог отделения ортопедии ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России), сделав акцент на персонализированном инструментарии, который позволяет выполнять радикальную резекцию патологических образований при первичных хирургических вмешательствах, формировать опи́лы под инди-



видуальные имплантаты при вторичных хирургических вмешательствах и прецизионно позиционировать эндопротезы. Результаты индивидуального эндопротезирования длинных костей при опухолевой патологии были представлены в презентации А.А. Жеравина (к.м.н., заведующий научно-исследовательским отделом онкологии и радиотерапии, врач-онколог ФГБУ «НМИЦ им. академика Е.Н. Мешалкина» Минздрава России).

С каждым годом увеличивается количество случаев применения аддитивных технологий в нейрохирургии. О результатах использования 3D-печати в создании индивидуальных имплантатов для краниопластики рассказал К.С. Яшин (к.м.н., врач-нейрохирург, ассистент кафедры травматологии, ортопедии и нейрохирургии им. М.В. Колокольцева ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России). С.В. Мишинов (к.м.н., врач-нейрохирург, старший научный сотрудник ФГБУ «ННИИТО им. Я.Л. Цивьяна» Минздрава России) представил данные исследования, подтвердившего высокую эффективность применения индивидуальных краниоимплантатов в лечении пациентов и необходимость модификации их кривизны для заполнения объема при ожидаемой атрофии височной мышцы.

Выставка конференции





В рамках мероприятия ведущие отечественные компании в области медицинской 3D-печати представили свои достижения и возможности в создании различных индивидуальных изделий для лечения пациентов, в том числе продемонстрировав имплантаты, ортезы, медицинские инструменты и др. на выставке конференции.

В рамках конференции состоялась **Модерируемая постерная секция молодых специалистов**, в которой приняли участие молодые ученые со всей России. В состав экспертной комиссии вошли к.м.н., доц. Р.О. Горбатов, чл.- корр. РАН, д.м.н., профессор С.Ю. Иванов, д.м.н. А.Н. Ряховский, к.б.н. Е.А. Сенокосова. Все участники секции продемонстрировали высокий уровень докладов.

Победителями секции стали:

— Аспирант кафедры стоматологии ФДПО ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России (г. Нижний Новгород) К.А. Янышева с докладом «Стереофотограмметрия

лица — метод персонализированного междисциплинарного планирования стоматологического лечения», которая рассказала о преимуществах использования стереофотограмметрии в цифровом протоколе планирования стоматологического лечения.

— Лаборант Биобанка Института регенеративной медицины Научно-технологического парка биомедицины ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» Минздрава России (г. Москва) А.А. Бакулина с докладом «Эффективность биоэквивалента на основе сфероидов и ПЭГ-фибриновой гидрогелевой системы в восстановлении рубцов голосовых складок».

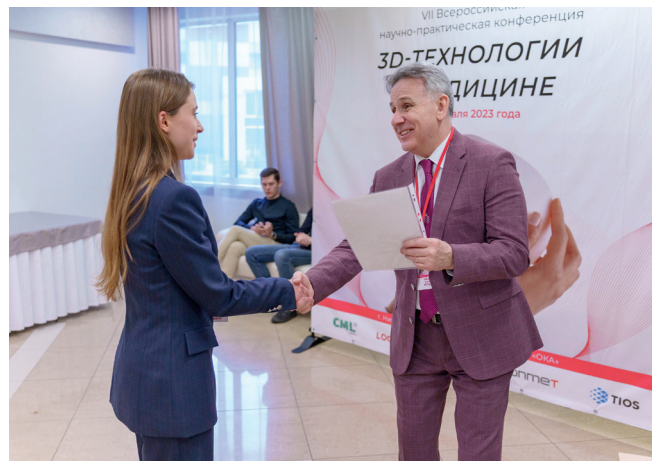
Организаторы конференции выражают глубокую благодарность и признательность всем докладчикам, участникам конференции и приглашают к дальнейшему сотрудничеству, направленному на развитие 3D-технологий в медицине. ■

Видеозапись докладов конференции представлена: <https://as3dm.ru/news/360>

Награждение А.А. Бакулиной



Награждение К.А. Янышевой



ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР



МКВ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ «АРМИЯ-2023»**

**14–20 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО**

www.rusarmyexpo.ru



IX Международный военно-технический форум «Армия-2023»

Дата: 14 августа — 20 августа 2023 г.

Место: Конгрессно-выставочный центр «Патриот», Московская обл., г. Кубинка

Организатор: Министерство обороны Российской Федерации

На основании какого документа: Распоряжение правительства РФ от 07.07.2021 N 1846-р «Об утверждении перечней международных выставок продукции военного назначения, проводимых на территории Российской Федерации».

Краткое описание: Международный военно-технический форум «Армия» — одна из ведущих мировых выставок в области военной и оборонной промышленности.

В форуме прошлого года приняли участие 1497 предприятий и организаций, которые представили 28 536 образцов продукции военного и двойного назначения. В 2022 году Министерство обороны России заключило 36 государственных контрактов с 24 предприятиями ОПК сумму более 525 миллиардов рублей. На площадках форума были представлены более 28,5 тысячи образцов продукции военного и двойного назначения. В рамках международного военно-технического сотрудничества портфель заказов составил 592 миллиона 650 тысяч долларов и 1 миллиард 770 миллионов рублей.

Формат «Армии» предусматривает выставочные экспозиции, демонстрационные и научно-деловые программы. Мероприятие включает в себя три основных кластера: авиационный, сухопутный и водный. На аэродроме «Кубинка» будут представлены новинки авиапромышленности, а также пройдут показательные выступления пилотажных групп. На территории полигона «Алабино» участникам и посетителям традиционно покажут возможности сухопутной и водной техники.

Подробности на сайте <https://www.rusarmyexpo.ru/>





ЛИТМАШ



МЕТАЛЛУРГИЯ

**06-08 ИЮНЯ
МОСКВА
РОССИЯ**

2023

Место проведения:



12+

ЛИТМАШ

Международная выставка литейных технологий,
материалов и продукции

МЕТАЛЛУРГИЯ

Международная выставка металлургических технологий,
процессов и металлопродукции

Специальная экспозиция

ТРУБЫ РОССИЯ 2023

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

Металл-Экспо
Тел.: +7 (495) 734-99-66



При поддержке:



07-10 НОЯБРЯ 2023

МОСКВА, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

Место проведения:



Генеральный
информационный партнер:



Оборудование и технологии
для металлургии
и металлообработки
МеталлургМаш'2023



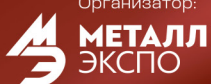
Металлопродукция
и металлоконструкции
для строительной отрасли
МеталлСтройФорум'2023



Транспортные
и логистические услуги
для предприятий ГМК
МеталлТрансЛогистик'2023

29-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА

МЕТАЛЛ ЭКСПО 2023



Организатор:

12+

Оргкомитет выставки: тел./факс +7 (495) 734-99-66

www.metal-expo.ru

INDUSTRY

аддитивные технологии и 3D-решения



МЕТАЛЛООБРАБОТКА 2023

ДАТА

- 23 МАЯ с 11:30 до 15:30
- 24 МАЯ с 11:30 до 15:30

МЕСТО

ЦВК "Экспоцентр", Павильон 8/2-й уровень/зал 3,
Стенд №83В26

ПРОГРАММА:



+7 (495) 481-39-44

info@industry3d.ru

katerina.iv@industry3d.ru

РЕГИСТРАЦИЯ:

