



аддитивные  
технологии

**TRUMPF**



TRUMPF: **идеальное** решение для аддитивного производства



Аддитивное  
производство:  
что нового?

12



Изготовление  
деталей РКТ из  
отечественного  
порошка  
нержавеющей  
стали

50



Применение  
лазерной  
стерео-  
литографии  
в медицине

56

# Профессиональные 3D-принтеры от ведущего мирового производителя



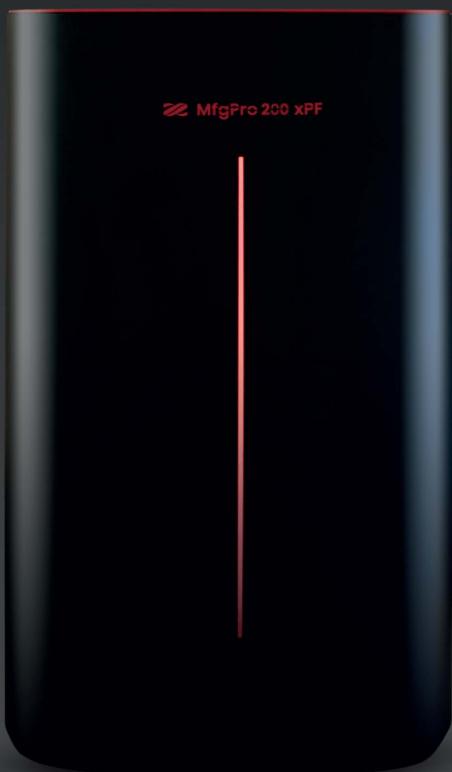
BinderJetting – PartPro 350 xBC (гипс)

Новейшая линейка профессиональных устройств XYZprinting  
на базе технологий SLS, SLA, Binder Jetting, DLP, LSPc, FDM

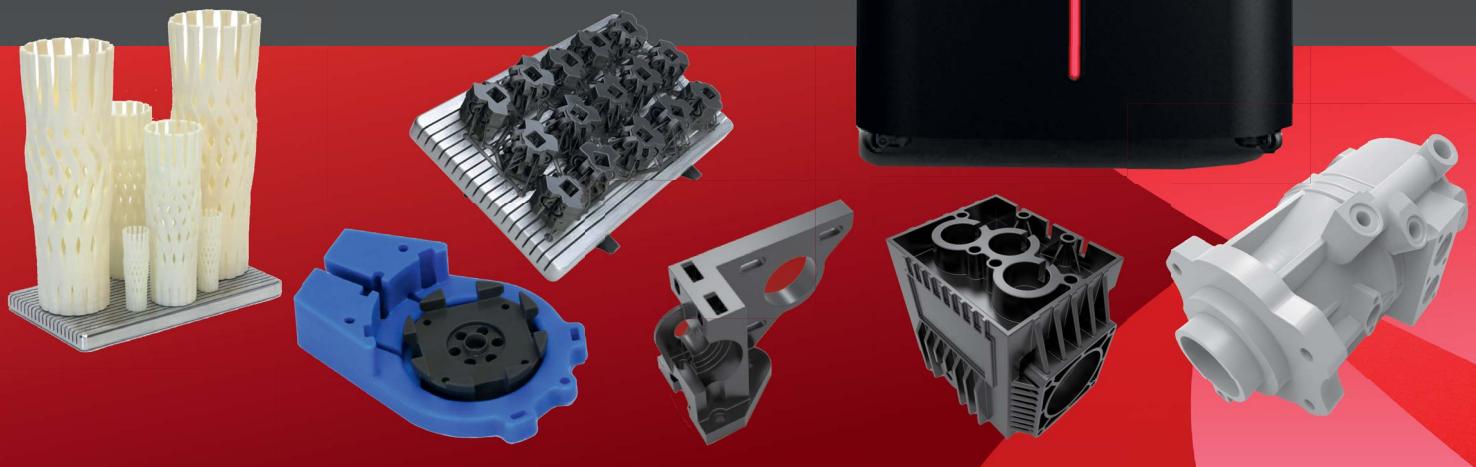
Решения для дизайна, прототипирования и производства  
готовых изделий

# Готовые изделия и прототипы в 40 раз быстрее!

MfgPro700 xPF



MfgPro1600 xPF



**Вертикальная скорость 3D-печати до 1 см в минуту**

Официальный дистрибутор на территории Российской Федерации и стран таможенного союза – компания АМ-КОР.

Адрес: г. Москва, Проспект Маршала Жукова, д.1 стр.1

Тел: 8(499) 678-123-5

E-mail: [info@am-core.ru](mailto:info@am-core.ru)

Сайт: <http://am-core.ru>

**AMCORE**



36



44



49

## СОДЕРЖАНИЕ

- 7** Печать изделий методом лазерного спекания полиамидных порошков
- 8** Trumpf: идеальное решение для аддитивного производства
- 10** Развивающийся проект
- 12** Аддитивное производство: что нового?
- 22** Укрепление российского рынка технологий с помощью станков с ЧПУ
- 27** Комплексная поддержка и готовые решения для аддитивного производства
- 28** Демонстрация возможностей
- 32** Обзор оборудования: металлические 3D-принтеры HBD
- 34** 3D-принтер SHINING 3D EP-P3850 – окно в мир функциональных прототипов
- 36** Разработки компании Farsoon процесса лазерного сплавления чистой меди
- 38** Использование покрытий для увеличения эффективности изделий
- 41** Применение цифровых двойников в аддитивных технологиях
- 46** Подготовка к материалографическому анализу образцов, изготовленных методом 3d-печати
- 50** Изготовление деталей РКТ из отечественного порошка нержавеющей стали
- 56** Применение лазерной стереолитографии в медицине

Издатель ООО «ПРОМЕДИА»

директор О. Фалина

главный редактор

М. Копытина

отдел редакции:

Т. Карпова, З. Сацкая

С. Куликова, Е. Ерошкина

консультант:

Н.М. Максимов

nikamax@gmail.com

отдел рекламы

т/ф (499) 55-9999-8

АДРЕС: 101000, Москва

Милотинский пер., 18А,

оф. 3бс, помещение 1, з

т/ф (499) 55-9999-8

(многоканальный),

(495) 256-80-86

е-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.



МЫ ГАРАНТИРУЕМ  
НАДЕЖНЫЙ ЗАЖИМ



Москва  
27.05–31.05 2019  
Зал 2.2, Стенд Е21



## Мы гарантируем качественный зажим

Аддитивные технологии замещают субтрактивные.

Основная цель – производительность!

Системы с нулевой точкой AMF позволяют достигнуть высокой производительности при использовании аддитивных методов изготовления.

Интегрированные также во все последующие процессы, они создают стандартизованный интерфейс и резко сокращают время модернизации и установки.

AMF: так начинается будущее!

Андреас Майер GmbH & Co. KG  
Fellbach (Germany)



запросить бесплатный  
каталог сегодня!

[www.amf.de](http://www.amf.de)

## Печать полиметаллических изделий

Успешно завершен совместный проект Национального центра развития технологий и базовых элементов робототехники Фонда перспективных исследований, ННГУ им. Н. И. Лобачевского и ЗАО «НИИ ЭСТО» – 3D печать полиметаллических изделий. Разработаны макет и демонстрационный образец полиметаллической аддитивной установки. Проведены их испытания и продемонстрировано полное соответствие требованиям технического задания. Разработано программ-

ное обеспечение, позволяющее управлять параметрами процесса послойного лазерного синтеза с помощью изменения технологических параметров сплавления и геометрических параметров сечений модели (более 1000 параметров для установки версии «моно» и более 4000 параметров для установки версии «Демонстратор»), управлять тактикой построения изделия по 3D-модели на макро- и микроуровне с возможностью дополнительной обработки зон соединения разно-

родных материалов. Определены оптимальные границы режимов «выращивания» изделия для получения требуемых прочностных и прочих механических характеристик.



<https://fpi.gov.ru/>



Освоение технологии производства крупногабаритных деталей для промышленных газотурбинных двигателей началось в самарском ПАО «Кузнецова» (входит в ОДК Госкорпорации Ростех). В эксплуатацию

запущена самая большая в России установка прямого лазерного выращивания из порошковых металлических материалов. Созданное в РФ оборудование позволяет производить детали до 2,5 м в диаметре. «К 2021 году на базе ПАО «Кузнецова» этим методом планируется изготавливать более 50 элементов для современных газотурбинных двигателей», — сказал исполнительный директор Ростеха Олег Евтушенко. Специалисты предприятия также проводят исследования свойств всех выращенных образцов.

Заказчиком работ выступает Министерство высшего образования и науки РФ, исполнителем и создателем оборудования 3D-печати — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, индустриальным партнером — ПАО «Кузнецова», соисполнителем — Самарский университет, который произвел сопло для коаксиальной подачи металлического порошка.

<https://sdelanounas.ru>

## Для удобного полета

На выставке Aircraft Interiors Expo в Гамбурге (Германия) компания BigRep GmbH, один из ведущих мировых производителей широкоформатных промышленных 3D-принтеров совместно с Dassault Systèmes представили два напечатанных на 3D-принтере сиденья самолета. Причем в проектах, специально разработанных для широкоформатной 3D-печати, были устранены ограничения традиционных инженерных решений.

Данные изделия получились в два раза легче тех, которыми оборудованы самолеты сегодня. Подушки кресел способны автоматически адаптироваться к форме тела, что снижает физическое напряжение. Оснащение сидения высокотехнологичными решениями (наличие портов USB, возможность беспроводной зарядки, безопасное размещение электронных устройств, встроенное освещение) обеспечивают комфорт при путешествии.

[www.hb3dp.ru](http://www.hb3dp.ru)



# ДИПОЛЬ

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ СКАНЕРЫ SHINING 3D  
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ОТ ЛИДЕРОВ 3D РЫНКА

[www.dipaul.ru](http://www.dipaul.ru), Санкт-Петербург, ул. Рентгена, д. 5Б  
+7 (812) 421-78-33, [3d@dipaul.ru](mailto:3d@dipaul.ru)

# МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВОЕННО- МОРСКОЙ САЛОН



# INTERNATIONAL MARITIME DEFENCE SHOW

“Через сотрудничество – к миру и прогрессу!”

Организатор:



При участии:



Минобороны  
России



ФСВТС  
России



МИД  
России



Администрация  
Санкт-Петербурга



РОСОБОРОНЭКСПОРТ

Устроитель:



ООО  
«Морской Салон»



IMDS  
2019  
10-14 июля  
РОССИЯ  
Санкт-Петербург

- ЭКСПОЗИЦИЯ ОБРАЗЦОВ ПРОДУКЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ
- ДЕМОНСТРАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ТЕХНИКИ
- КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ, КРУГЛЫЕ СТОЛЫ, ПРЕЗЕНТАЦИИ
- VIP-ПЕРЕГОВОРЫ
- ПОСЕЩЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ

# Печать изделий методом лазерного спекания полиамидных порошков

Компания **XYZprinting**, входящая в холдинг **New Kinpo Group**, мировой лидер в области настольной 3D-печати\*, в 2018 году объявила о выходе на рынок профессиональной 3D-печати. В рамках ведущих мировых выставок Rapid3D + TCT и Formnext была представлена широкая линейка новейших 3D-принтеров, в том числе революционные устройства со скоростью печати до 1 см в минуту, что в 40 раз быстрее, чем существующие технологии.

В рамках развития «Индустрис 4.0» многие производители планируют или уже развиваются аддитивное производство. Крупнейшие мировые компании и корпорации, такие как General Electric, Airbus, BMW, VW и многие другие, вкладывают в создание центров 3D-печати миллионы и миллиарды долларов. Многие производители используют новые технологии уже не только на этапе проектирования и при создании концептов, а идут дальше, создавая на 3D-принтерах производственные оснастки, отдельные запчасти и даже ответственные элементы, такие как лопатки турбин, топливные форсунки авиадвигателей или тормозные суппорты.

При создании центров аддитивного производства заказчики сталкиваются с двумя важными факторами: стоимость оборудования профессионального класса и скорость, с которой это оборудование позволяет создавать конечные изделия.

Для печати изделий методом лазерного спекания полиамидных порошков XYZprinting предлагает модель **MfgPro230 xS**.



*MfgPro230 xS*



*MfgPro1600 xPF*

Этот высокопроизводительный SLS 3D-принтер является самым доступным устройством в своем классе, имеет камеру печати объемом 230×230×230 мм и позволяет создавать точные детали промышленного качества. Устройство использует CO<sub>2</sub>-лазер мощностью 30 W, что позволяет работать с широким спектром расходных материалов, в том числе белым, натуральным и черным PA-12, TPU, PMMA, а благодаря открытой системе пользователь не ограничен в используемых материалах.

Проблему скорости получения конечных изделий XYZprinting предлагает решить с помощью сверхбыстрых 3D-принтеров моделей **MfgPro700 xPF** и **MfgPro1600 xPF**.

Оба устройства построены на технологии LSPc (Lubricant Sublayer Photo-curing), обеспечивающей вертикальную скорость построения до 1 см в минуту, что делает их в 40 раз быстрее аналогов. Это серьезный шаг на пути к реальному серийному производству готовых изделий с помощью аддитивных технологий.

Производителем разработаны и адаптированы фотополимерные смолы с различными свойствами, позволяющими осуществлять печать как прототипов, так и конечных изделий с техническими характеристиками не уступающими изделиям, изготовленным из традиционных пластиков.

Более подробно узнать о новейших решениях XYZprinting для профессиональной 3D-печати вы можете, обратившись к официальному дистрибутору на территории Российской Федерации и стран СНГ компании «AM-KOP».



*MfgPro700 xPF*

**AMCORE**

ООО «AM-KOP»  
Москва, проспект  
Маршала Жукова, д. 1, стр. 1  
Телефон: +7 (499) 678-123-5  
E-mail: [info@am-core.ru](mailto:info@am-core.ru)  
[www.am-core.ru](http://www.am-core.ru)



TRUMPF:  
**идеальное** решение для  
аддитивного производства

Авиакосмонавтика



Станкостроение



Машиностроение



Пресс-формы и  
инструменты



Медицина и  
стоматология



TRUMPF



Товары народного  
потребления



ООО «ТРУМПФ»  
+7495 2345713  
[ru.trumpf.com](http://ru.trumpf.com)

Автопром



# Развивающийся проект

Татьяна Карпова

Международный проект *3D fab+print Russia* в рамках выставки *interplastica*, включающий конференцию и выставочную экспозицию по аддитивным технологиям в промышленности, уже в третий раз был представлен в Москве в ЦВК «Экспоцентр» и традиционно привлек внимание посетителей выставок *interplastica* и *iprasokna*. По статистике, в 2019 году 17% общего числа посетителей, а это 24 950 человек, проявили интерес к аддитивному производству и 3D-печати, 53% интересующихся посетили *3D fab+print Russia*, 95% из них остались довольны проектом. Организаторами мероприятия выступили «Мессе Дюссельдорф ГмбХ», «Мессе Дюссельдорф Москва» и ООО «Современное оборудование».

По данным, приведенным на конференции в докладе Дмитрия Трубашевского (ООО «Современное оборудование») развитие аддитивных технологий идет быстрыми темпами. Так, в 2018 году в этот сегмент рынка в мире было инвестировано \$13,8 млрд, в 2019 году планируется рост приблизительно на 19%, к 2022 году объем инвестиций составит порядка \$22,7 млрд. Что касается российского рынка, то можно отметить, что в стране имеется значительный научный потенциал, разработаны отечественные 3D-принтеры промышленного класса, производители металлопорошков существенно повысили их качество, промышленные потребители постепенно начинают понимать преимущества 3D-печати и переходят к производству конечных функциональных изделий. И, несмотря на то, что российский рынок составляет менее 1% мирового, прослеживается устойчивый рост: в 2018 г. по сравнению с 2017 г. на 15% до 6 млрд рублей, ожидаемый в 2019 году – 20%, что соответствует мировым тенденциям.

В течение трех дней в ходе конференции пятьдесят докладчиков из России, Польши, Германии, Нидерландов, Швеции рассказывали о достижениях своих предприятий, анонсировали новые технологии, оборудование, материалы, программное обеспечение и делились опытом применения аддитивных технологий для решения разного рода задач, подтверждая данную статистику. Вот буквально некоторые примеры, демонстрирующие актуальность поставленных и решенных задач.



ООО «Титан-Авангард» выступил с разработкой 3D-принтера Additive Solutions D250. Особенностью оборудования является полностью открытая платформа, а минимизация последствий расфокусировки лазерного луча была уже высоко оценена зарубежными коллегами. ГК «Лазеры и аппаратура» совместно с Научно-производственным центром газотурбостроения разработала лазерную машину МЛ7 для ремонта деталей газотурбинных двигателей по технологии лазерного осаждения и наплавки металлическими порошками (скорость построения 0,6 м/сек), проводится отработка технологии. ООО «Русские механизмы» анонсировало выпуск принципиально нового SLS-принтера, который позволит увеличить скорость печати в разы. Также компания совместно с Институтом химической физики РАН ведет работу по разработке новых отечественных материалов для принтеров собственного производства. От ООО «Эксклюзивные Решения» не только были представлены SLM-принтер Russian SLM FACTORY и программное обеспечение Triangultica, но и был сделан громкий анонс российской технологии на новых физических принципах. В немецкой компании BigRep разработали технологию дозирующих экструдеров, которая решает проблему контроля объема поступающего пластика при традиционной технологии FDM. Технология позволяет не только управлять резким изменением направления движения экструдера, например при печати углов, но и мгновенно прекращать или возобновлять подачу пластика. Благодаря этому стало возможным повышение производительности в 5–10 раз.

Специальный приглашенный гость – директор по продажам GEFERTEC GmbH Ребекка Юртц рассказала о новом направлении в производстве крупногабаритных изделий – технологии 3DMP, которая представляет собой печать металлической проволокой методом дуговой сварки.

В АО «ОДК-Авиадвигатель» в 2018 г. была внедрена новая технология – микроплазменная наплавка,

назначение которой — ремонт деталей авиадвигателя, в т. ч. сложнопрофильных и тонкостенных. К ее преимуществам относятся минимальное термическое воздействие, малые остаточные деформации, отсутствие разработки управляющих программ ЧПУ и необходимости изготовления технологической оснастки.

Сотрудники ФГУП «ВИАМ» разработали эффективный процесс постобработки, состоящий из трех этапов: это гидроабразивная обработка и прокачка для сложных каналов, которые требуют постоянной циркуляции, виброгалтовка, электрохимическое и электроплазменное полирование. Такая трехступенчатая обработка позволяет обеспечить чистоту поверхности до уровня 1.

В АО «ПОЛЕМА» получены новые порошки CompoNiAl-M5-3, суперинварные сплавы, сплавы высокой энтропии, жаропрочные и жаростойкие сплавы. В Кабардино-Балкарском государственном университете им. Х. М. Бербекова разрабатываются суперконструкционные полимеры, в т. ч. наполненные рублеными углеволокнами.

В ассортименте компании «КЕН-ТАЧ.РУ», которая начинала свою деятельность с прототипирования, доля создания конечного продукта достигла 30%. Компания активно развивает проект по изготовлению индивидуальных протезов «Моторика», который за 3 года прошел полный цикл от идеи и эскизов до открытия шоу-румов в Европе и Азии.

И это далеко не все, о чем узнали участники конференции. О разработках нового оборудования говорили представители EOS и АБ «Универсал», ООО «Электропривод», «Цветной мир», Picaso 3D и др. Имитационному моделированию были посвящены доклады компаний: MSC Software, Siemens, Autodesk, Московский авиационный институт. Не остались в стороне и вопросы контроля (Volume Graphics, RENA SOLUTIONS), сканирования (iQube, «Инженерный консалтинговый центр»), роботизации в аддитивном производстве (ООО «Центр СПРУТ-Т») и др.

Российский рынок нуждается в отраслевых интеграторах, хорошо разбирающихся как в классических,

так и новых технологиях, готовых предложить комплексное решение совокупности программных и технологических средств. На конференции выступили со своими наработками: ООО «Русатом — Аддитивные технологии», ООО «ТИК «ЛВМ АТ», ООО «ФИТНИК», ООО «Современное оборудование» и другие. И конечно, в ряде докладов была подчеркнута необходимость подготовки кадров.

Новыми форматами конференции в дополнение к докладам стали мастер-классы и 3D-батлы «Лучшие против лучших». В рамках мастер-классов были рассмотрены возможности программного обеспечения Sigimat Additive Manufacturing при производстве изделий из пластика (ООО «Эм-Эс-Си Софтвэр РУС»), процесс сканирования (iQB technologies), работа с 3D-принтерами Anisoprint Composer (ООО «Анизопринт»). В ходе батлов участники не только рассказали о своем пути в индустрии 3D-печати, но и подняли проблемы производителей отечественного оборудования, связанные с его внедрением в промышленности, конкуренцией, недостаточной государственной поддержкой и рисками небольших коллективов, выступающих с инициативами и вложивших средства в разработки и вспомогательное оборудование. Яркие выступления подготовили от компаний — производителей промышленного оборудования для печати металлами Денис Власов, ООО «Эксклюзивные Решения», и Владимир Карапетянц, АО «Лазерные системы», а от компаний производителей материалов Дмитрий Миллер, ООО «РЭК», и Денис Берчук, Bestfilament.

Дополнением к конференции стала выставочная экспозиция, где с учетом тематики выставки interplastica прежде всего демонстрировалось оборудование, работающее по технологии FFF/FDM с полимерной нитью, оснащенное одним или двумя экструдерами отечественного или зарубежного производства.

В 2020 году проект 3D fab+print традиционно будет приурочен к выставке interplastica, которая пройдет в ЦВК «Экспоцентр» с 28 по 31 января. ■



# Аддитивное производство: что нового?

Н.М. Максимов, ООО «Ника-Рус»

На фоне общего стремительно-го развития аддитивных технологий интересно рассмотреть события и факты, которые отражают тенденции, новые технологии и серьезные достижения, которыми был означенован прошедший год — с марта 2018 г. до марта 2019 г.

Сразу хочется отметить, что главная тенденция аддитивного производства (AM) — переход от создания прототипов изделий к производству готовых изделий — сохраняется, при этом основными критериями широкого использования в промышленности по-прежнему являются качество изделий (в широком понимании — не хуже, чем при традиционном производстве) и скорость их изготовления. Также важно, что, согласно обзору [1], по состоянию на 2018 год выражается сдержанная уверенность, что в РФ существует большой потенциал развития АМ, и мы не сильно отстаем от мировых лидеров. А в каких-то направлениях мы даже превосходим (строительные 3D-принтеры, уникальные порошки из сплавов для металлических 3D-принтеров).

## Новые технологии

### 1. АМ на основе томографической реконструкции [2]

В университете Калифорнии в Беркли (University of California — Berkeley) совместно с Lawrence Livermore National Laboratory разработан способ печати объектов из светоотверждаемого фотополимера (СТ) с выдающимися показателями: скорость построения

изделия любой сложности — считанные минуты, гладкая поверхность, практически нет ограничения по сложности, можно даже «обрамлять» готовую деталь дополнительными опциями (рис. 1, 2). По словам одного из авторов идеи Н. Taylor, «технология открывает огромные возможности для кастомизации при массовом производстве изделий».

Рис. 1. Рукоятка отвертки, достроенная вокруг металлического стержня



Рис. 2. Скульптура Родена «Мыслитель», созданная по технологии СТ



В отличие от классической 3D-печати с послойным построением и использованием поддержек, новый 3D-принтер — «репликатор», как называли его разработчики, создает модель в объеме вязкого жидкого фотополимера при засветке его опреде-

ленным светом. При этом отвердение материала происходит сразу для всего объема модели, как в кинопроекторе.

Идея создания такого 3D-принтера была взята из компьютерной томографии, где объемное изображение строится за счет программной обработки множества сканов объекта при рентгеновском облучении его с разных углов. Здесь же использовался обратный процесс — создать объект за счет управления построением его формы и интенсивностью света. Другая важная проблема была в создании материала с пороговой фоточувствительностью, чтобы при малой интенсивности света материал оставался бы в жидком состоянии (излучение просто проходило через него), а при высоком — отверждался. Поэтому материал для печати состоит из жидких полимеров в смеси с молекулами фоточувствительного материала и кислорода. Образующиеся при засветке активные радикалы связываются кислородом, и отвердение материала происходит только в тех областях, где уже нет кислорода, т. е. там, куда проецируется объект.

Остатки материала после построения можно снова использовать, предварительно нагрев его в среде кислорода. Поэтому это практически безотходная технология печати.

Материал не обязательно должен быть оптически прозрачным, можно использовать различные красители, прозрачные для определенной длины волн излучения.

## **2. Технология 3D-печати металлическими порошками со связующим (Binder Jetting, BJ)**

Технология BJ с последующим спеканием напечатанных изделий в печи при температуре чуть ниже температуры плавления материала (металла или сплава) получает все большее развитие из-за выдающихся характеристик:

- практическое отсутствие пор, соответственно механические свойства отпечатанного изделия не хуже такого же изделия, полученного традиционными технологиями;
- высокая скорость печати;
- отсутствие термических деформаций, характерных для других AM-технологий, работающих при высоких температурах;
- возможность печати изделия, состоящего из нескольких деталей, в сборе.

Рассмотрим несколько примеров таких BJ-технологий.

**Компания Desktop Metal** (Burlington, Massachusetts, USA) представила промышленный 3D-принтер с технологией BJ [3]. При скорости печати свыше 60 кг в час (12000 см<sup>3</sup>/час) машина предназначена для мелкосерийного производства сложных изделий в среде инертного газа. Производительность машины в 4 раза выше любой другой современной AM-системы BJ и в 100 раз выше любой системы с лазерным спеканием/сплавлением. Рабочая зона с размерами 750×330×250 мм, печать за один проход головки вдоль рабочего стола, 3 млрд капель связующего в секунду из 32768 сопел, возможность работы с порошками разных металлов и сплавов от инструментальной стали до алюминия и титана, нет необходимости в постобработке — все это делает машину востребованной для масштабового производства изделий.

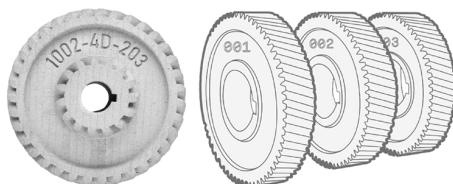
Примеры использования:

- напечатанный шарнир для очков в сборе с предустановленной осью (рис. 3). Машина за

*Рис. 3. Шарнир для очков в сборе*



*Рис. 4. Напечатанные образцы с идентификатором и серийным номером*



*Рис. 5. Печать бит*



4 часа сможет напечатать более 45000 шарниров размерами 12×5×6 мм каждый.

— печать изделия с маркировкой (идентификатором) с указанием серийного номера в партии (рис. 4).

— традиционная технология производства бит (Milwaukee Tool®) включает 12 операций, при печати 1400 штук за 4 часа потребуется всего 4 операции (рис. 5).

**Новый игрок в АМ с технологией BJ — это компания HP** [4] со своим 3D-принтером HP Metal Jet (рис. 6). HP выступает здесь в партнерстве с двумя хорошо известными производителями металлических порошков для MIM-технологии: Parmatech и GKN Powder Metallurgy (Германия), которые готовы обеспечивать нужными расходными материалами потребности АМ. Ограничения MIM-технологии (высокая стоимость пресс-форм, длитель-

*Рис. 6. 3D-принтер HP Metal Jet*



*Рис. 7. Образцы, напечатанные на HP Metal Jet*



ный цикл их изготовления или внесения изменений для оптимизации) могут быть сняты при использовании АМ-технологий, это стало возможным только с появлением BJ из-за более дешевого оборудования и более высокой производительности, а также высокого качества изделий. Например, изделия из нержавеющей стали, напечатанные на HP Metal Jet, отвечают требованиям стандартов ASTM и MPIF по механическим характеристикам (рис. 7). При этом стоимость 3D-принтера, который выйдет на рынок в 2020 г., (\$400000) значительно ниже лазерных АМ-систем.

3D-принтер HP Metal Jet как ключевой элемент в массовом производстве изделий рассматривается в ряде крупных компаний:

- «Фольксваген» в производстве своего электромобиля;
- компания Wilo для производства элементов для гидравлики, работающих в тяжелых условиях эксплуатации в широком диапазоне температур и давлений;

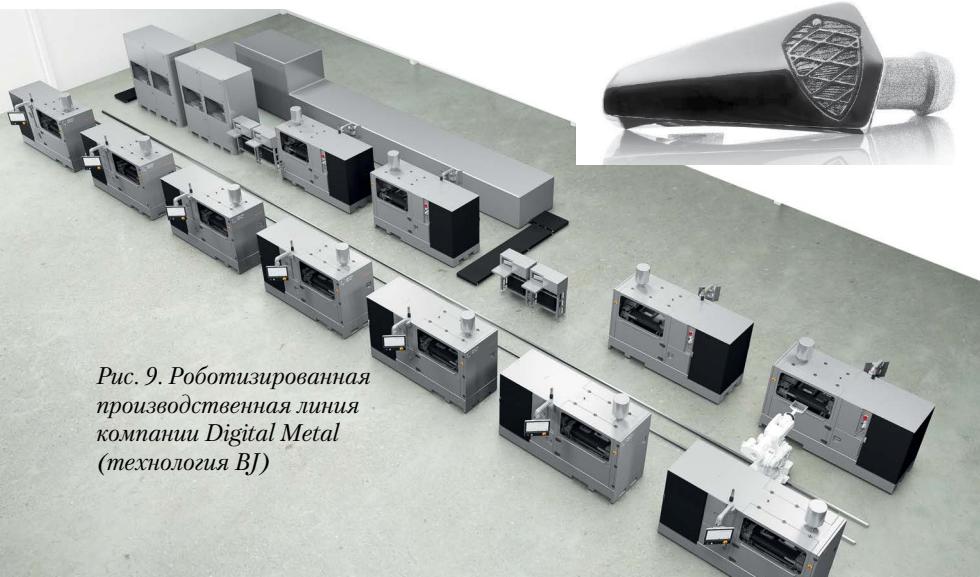
*Рис. 8. Система X125PRO*



— компания Parmatech в мас-сомом производстве медицинских изделий (хирургические ножницы, зажимы для эндоскопов).

**Компания ExOne** (North Huntington, Pennsylvania, USA) представила металлический принтер X125PRO (рис. 8), предназначенный для серийного производства изделий [5]. Перечень материалов, пригодных для печати: 316L, 304L, 17–4PH, Inconel 718, 625, M2 и H11 инструментальные стали, сплав кобальта и хрома, медь, карбид вольфрама с кобальтом.

**Компания Digital Metal** [6], входящая в состав шведской группы Höganäs, использует технологию BJ с 2013 года как экспериментальную и только в 2017 г. выпустила первый коммерческий 3D-принтер, а в конце 2018 г. представила концепт роботизированной производственной линии для серийного выпуска изделий по технологии BJ (рис. 9) с 3D-принтерами DM P2500.



*Рис. 9. Роботизированная производственная линия компании Digital Metal (технология BJ)*



*Рис. 10. Примеры изготовления сложных изделий: а) качество поверхности Ra 1 мкм, б) отверстия разного размера*



особенно при изготовлении сложных изделий с каналами для охлаждения и подачи топлива или жидкости. При инжекционном литье обычно сложная деталь изготавливается из двух частей с последующей сваркой их друг с другом. Если же изготавливать такое изделие как единое целое при использовании BJ, то мы экономим материал, время и снижаем вес изделия (рис. 10–11).

#### **Системы Desktop Metal's Studio+/Studio Fleet**

В сентябре 2018 г. компания Desktop Metal [7] представила офисный вариант металлического 3D-принтера Studio+ для премиумного изготовления небольших деталей (рис. 12), а также набор оборудования для мелкосерийного производства деталей Studio Fleet (рис. 13), включающего 5 AM-систем Studio+, два блока для удаления связующего и одну печь.

*Рис. 11. Сопло омывателя для суперкара Koenigsegg с дополнительными внутренними опциями для улучшения работы*



#### **3. Для крупногабаритных изделий**

#### **Компания MELD Manufacturing Corporation (Christiansburg,**

*Рис. 12. Деталь, изготовленная на 3D-принтере Studio+*

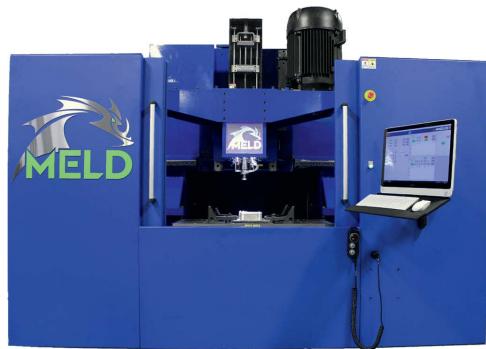


*Рис. 13. Пример комплекса Desktop Metal's Studio Fleet, включающего 5 АМ-систем, два блока для удаления связующего и одну печь*



**Virginia, USA)** разработала АМ-технологию, позволяющую создавать, изменять, ремонтировать и соединять отдельные части, используя фидштоки в виде стержней или порошков из широкого списка металлов и сплавов. При этом производительность установки в 10 раз выше в сравнении с другими металлическими АМ-технологиями. Компания имеет более десятка патентов, получила несколько престижных наград и предлагает свою машину B8 (рис. 14) потребителям, работающим в авиакосмосе, автомобильном производстве, обороне, энергетике [8].

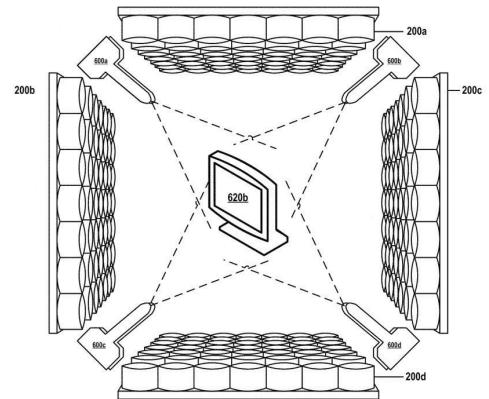
*Рис. 14. B8 — оборудование для производства изделий по технологии AFS*



Технология основана на использовании трения врачающейся инструментальной головки, в которую под давлением подается материал в виде прутка или порошка (рис. 15). Подаваемый материал становится пластичным и смешивается с материалом предыдущих слоев, образуя мелкозернистую структуру, обладающую высокими механическими свойствами. Так как материал не плавится, его состав не изменяется, поэтому не требуется вакуумная камера или инертная среда в рабочей зоне. Также нет ограничений по чистоте поверхности используемых материалов. После финишной обработки вы получаете готовое изделие с более высокими механическими характеристиками, чем при традиционных способах металлообработки. Оборудование предназначено для изготовления в основном крупногабаритных изделий.

#### **4. Компания IBM запатентовала идею 3D-печати с помощью акустической голограммы [9].**

*Рис. 16. Схема голограмического 3D-принтера*



Метод использует генерацию объемной голограммы с помощью направленного источника звуковых волн, которые за счет интерференции образуют стоячие волны. Голограмическое изображение невидимо, но может ощущаться тактильно как некий парящий в пространстве объект. В камере с газообразной средой полученную голограмму можно опрыскивать частицами реактивного материала из сопел объемного 3D-принтера, тогда этот материал будет отверждаться в виде пустотелой оболочки (рис. 16) и голограмма станет видимой.

Этот процесс можно использовать для быстрого недорогого построения полых объектов, таких, как легкие игрушки, автомобильные компоненты, корпуса для электроники, защитные оболочки, упаковку. При определенной конфигурации источников звуковых волн можно создавать объекты с внутренней структурой, что найдет применение, например, в стоматологии в производстве коронок или мостов.

*Рис. 15. Примеры применения технологии*



При использовании различных материалов для нанесения на оболочку голограммы можно получать объекты с различными физическими свойствами, цветом, плотностью, текстурой и т.д.

### Перспективные решения

**Компания Carbon** [10] выпустила новый большой 3D-принтер L1 (рис. 17) и среднеформатный M2d и представила их на стоматологической выставке в Кельне в марте 2019 г. Был разработан новый материал для стоматологов — медицинский полтуретан (MPU 100). Полимер белого цвета имеет уникальные механические характеристики: высокую прочность, абразивную устойчивость, биосовместимость и возможность стерилизации. Все это делает MPU 100 идеальным для использования в практической стоматологии.

Рис. 17 Линейка 3D-принтеров L1



Следует отметить, что для стоматологии потенциал рынка оценивается более \$300 млрд.

**Специалисты университета Южной Каролины** разработали самозалечивающийся материал [11] на основе фотополимерной смолы, отвердение которой зависит от того, в какой форме находится полимер: thiol или disulfide. Равновесие между ними можно смещать и тем самым управлять процессом отвердения. Было показано, что при нагреве материала до 40–60°C различные напечатанные 3D-изделия могут восстанавливать нарушенную начальную структуру со скоростью в десятки кубических мм в минуту и полностью восстанавливать свойства.

Эффект самозалечивания фотополимерных структур может быть использован в различных приложениях: мягкие захваты для роботов, подошвы для обуви, автомобильные шины, электронные датчики и т.д. Как пример (рис. 18), цельную подошву можно закрутить на 540 градусов. После разрезания обе части подошвы соединили вместе и выдержали в течение двух часов при 60°C. После чего восстановленную подошву можно снова закрутить на 540 градусов.

Было показано, что процесс самозалечивания не зависит от влажности — выдержка образца в воде в течение суток не изменила свойства материала в отличие от чувствительных к влаге эластомеров на основе водородных связей. Другой важный вывод — процесс залечивания можно повторять многократно на одном образце практически без изменения механических свойств материала.

Возможные применения в медицине, особенно в биомедицине: создание материалов для 3D-печати искусственных органов, биомедицинских имплантов.

Для стоматологов: были проведены успешные опыты по соединению природных материалов, таких как перламутр и зубная ткань. Образцы для выращивания на 3D-принтере готовились на основе материала — смеси мягкого эластомера, способного к самозалечиванию, и жесткого наполнителя (типа перламутра) без свойств самозалечивания. Обычно разрушение образца происходит по мягкой фазе, при этом после соединения и выдержки в течение двух часов при 60°C происходило самозалечивание разрыва, и прочность образца восстанавливалась до 90% от начального уровня.

(типа перламутра) без свойств самозалечивания. Обычно разрушение образца происходит по мягкой фазе, при этом после соединения и выдержки в течение двух часов при 60°C происходило самозалечивание разрыва, и прочность образца восстанавливалась до 90% от начального уровня.

**Печать метакристаллическими материалами.** Группа исследователей из Imperial College London и University of Sheffield [12] предложила новый дизайн ячеистых структур для 3D-печати — была взята за основу модель поликристаллических атомных структур и отмасштабирована до нужного размера. Эти мезоструктуры получили название метакристаллы. Их основное достоинство в том, что напечатанные

Рис. 19. Деталь со структурой метакристалла

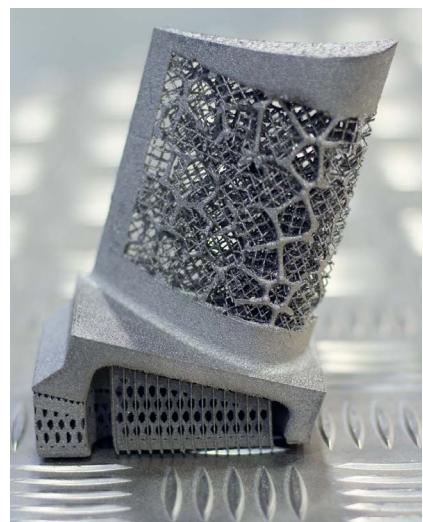
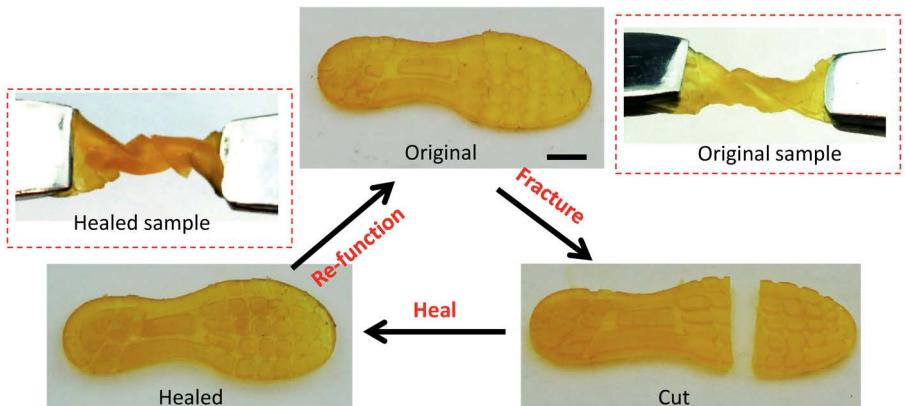


Рис. 18. Пример самозалечивания подошвы обуви



с такой структурой изделия в 7 раз прочнее, как если бы использовалась при печати обычная ячеистая структура (рис. 19).

#### Новый 3D-принтер для стекла от MIT [13].

Попытки сделать 3D-принтер для стекла основывались на использовании спекания стеклянных порошков, но при этом терялась прочность и прозрачность.

Применение фотополимерной смолы со стеклянным наполнителем с последующим удалением связующего в вакуумной печи при 1300°C и сплавлением изделия в одно целое позволило изготавливать с высокой точностью небольшие детали со сложной геометрией. Но невысокая производительность (0,02 кг/час) и склонность к растрескиванию и короблению в процессе термической обработки ограничили использование фотополимерной технологии. Первый 3D-принтер для работ с расплавленным стеклом (G3DP) [14] был создан компанией Mediated Matter Group при MIT в 2014 г. Принтер имел рабочую зону 250×250×300 мм и имел производительность в десятки раз выше в сравнении с существующими на тот момент 3D-принтерами.

Новый промышленный 3D-принтер для печати расплавленным стеклом G3DP2 от MIT представляет собой систему (рис. 20), состоящую из трех зон с контролем температуры: резервуар с жидким стеклом (1090°C), сопло (800°C) и рабочая зона (480°C).

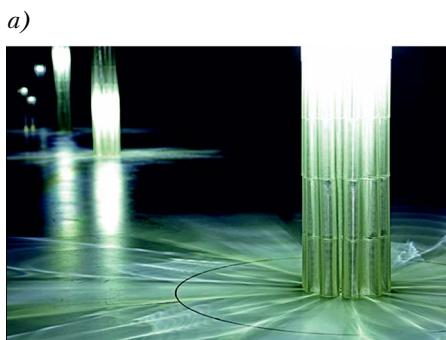


Рис. 20. Устройство 3D-принтера с верхней и нижней зонами

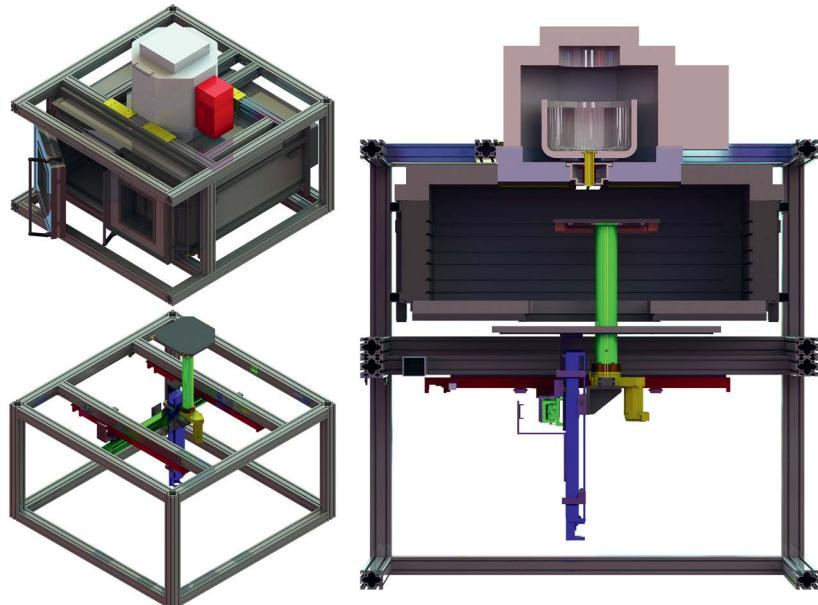


Рис. 21. Напечатанные образцы: слева  $R = 150$  мм, справа  $R = 150$  мм,  $r = 15$  мм,  $n = 24$



Производительность машины 5 кг/час, что более чем в 2 раза выше, рабочий объем увеличен почти вдвое ( $1100 \times 1100 \times 500$  мм), объем резервуара с жидким стеклом более чем в 10 раз в сравнении с G3DP. Потребляемая мощность в среднем составляет 15 кВт. Примеры образцов показаны на рис. 21 ( $R$ ,  $r$  — радиусы окружно-

стей,  $n$  — число повторяющихся элементов). Демонстрация возможностей принтера была показана на выставке в Милане на неделе дизайна в виде напечатанных трех стеклянных колонн высотой в 3 метра (рис. 22).

**Компания Naval Group и инженерная школа Centrale Nantes (Франция)** напечатали полномас-

Рис. 22. Напечатанные колонны из стекла с подсветкой (а) и схема колонн (б).

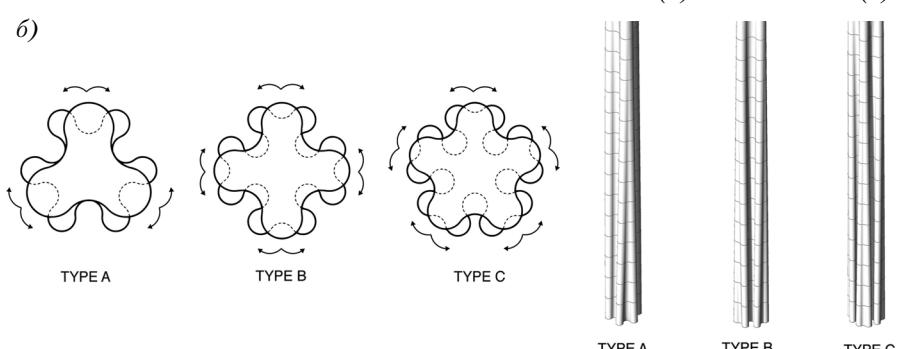
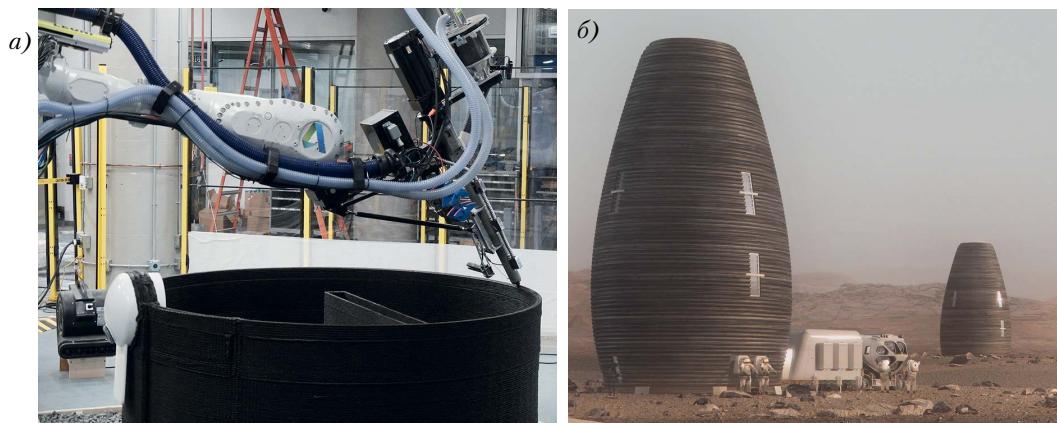


Рис. 23. Печать полой лопасти винта



Рис. 26. Печать емкости (а) из PLA-материала, усиленного базальтовым волокном, будущие постройки (б) на Марсе



штабную лопасть гребного винта, полуую внутри (рис. 23) – [15]. Использовалась технология наплавки проволоки с помощью электрической дуги в среде инертного газа. Стальная лопасть длиной до 2 м и весом в 300 кг была изготовлена примерно за 100 часов. Опыт работы над лопастью показывает, что можно сэкономить до 40% материала, получить любую сложную геометрию, что уменьшит нагрузку на вал двигателя, снизит шум и вибрации и приведет к экономии топлива. Можно изготавливать лопасти практически без ограничения размера.

Следует отметить, что в России также развиваются аддитивные технологии для судостроения. Ком-

панияей ИЛИСТ во время выставок «Металлообработка–2018» и «Иннопром–2018» демонстрировались возможности технологии прямого лазерного выращивания для элементов судовых двигателей и судовой арматуры, в т. ч. лопасть винта (габариты 500×500×400 мм, время выращивания 8 часов), часть гидрозатвора (габариты 300×200×200 мм, время выращивания 8 часов) – рис. 24.

#### Применение в авиакосмосе

1. Компания Orbex (Великобритания) создала полностью напечатанный на 3D-принтере ракетный двигатель с использованием углеволокна и композитов на основе алюминия (рис. 25). Экспериментальный запуск ракеты с малыми спутниками для

вывода их на высоту до 1250 км запланирован на 2021 г. [17].

2. Компания AI SpaceFactory продемонстрировала 3D-принтер для печати конструкций на Марсе из базальтовых материалов [18]. В рамках конкурса на лучшее решение с призовым фондом в \$500000 они построили емкость для воды объемом более 4 тысяч литров за сутки (рис. 26). Используемый материал на основе PLA, усиленного базальтовым волокном, не требует воды, как материалы на основе цемента, устойчив к космическому излучению и к перегреву за счет солнечной радиации. Предполагаемый дизайн марсианских построек показан на рис. 26.

3. Лаборатория Media Lab в MIT запустила специальную программу по отслеживанию и очист-

Рис. 24. На стенде ИЛИСТ вице-президент

по техническому развитию АО «ОСК» Дмитрий Калодяжный,

президент АО «ОСК» Алексей Рахманов,

директор ИЛИСТ Глеб Турчин. Фото: ИЛИСТ.



Рис. 25. Двигатель на биопропане, напечатанный как единое целое, для ракеты Prime



ке ближнего космоса от остатков спутников и прочего космического мусора [19]. Так, только объектов размерами более 1 м там находится более 5000, а объектов меньших размеров — десятки тысяч (рис. 27). Идея заключается в сбое остатков и превращении их в строительный материал для создания новых спутников прямо на орбите на специальных фабриках.

4. Европейское космическое агентство (ESA) сообщило об успешном завершении первой серии тестов напечатанного на 3D-принтере (SLM-технология) ракетного двигателя-демонстратора BERTA [20] — рис. 28. Двигатель отработал 560 сек и показал тягу в 2,5 кН. Предполагается его использование для маневров на орбите и на других планетах.

Использование 3D-печати позволило разработать эффектив-



Рис. 27. Облако объектов в космосе вокруг Земли

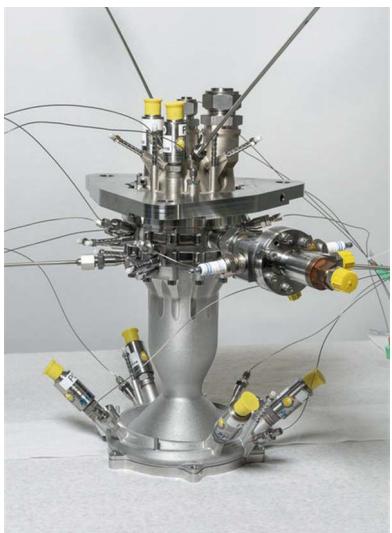


Рис. 28. Двигатель-демонстратор BERTA

ную систему каналов охлаждения камеры сгорания. Полученные данные будут применяться для дальнейших разработок двигателей ракеты Ariane 6 — Vinci и Vulcain. В дальнейшем АМ будет использоваться при разработке мощных криогенных двигателей Prometheus и ETID.

5. Стартап Relativity Space арендовал для запуска своей ракеты Terran стартовую площадку LC-16 на мысе Canaveral во Флориде. Он использует ее совместно с другими частными компаниями SpaceX, United Launch Alliance и Blue Origin.

Компания свой первый запуск планирует на конец 2020 г. Ракета для средней высоты орбиты будет на 95% состоять из деталей, напечатанных с помощью автоматизированного АМ-производства [21]. При этом общее количество деталей будет сокращено почти в 100 раз по сравнению с традиционными технологиями ракетостроения. Так, например, инжектор и камера сгорания двигателя состоят из 3 деталей вместо 3000! (рис. 29). Компания имеет один из самых больших 3D-принтеров в мире — Stargate, который способен печатать изделия высо-

Рис. 29. Инжектор и камера сгорания двигателя



Рис. 30. Книга с профилем А. Эйнштейна к 100-летию создания основной теории относительности



той до 6,6 м и шириной до 3,3 м. «Наша цель — производство ракет на Марсе с помощью АМ», — говорит Tim Ellis, гендиректор Relativity Space.

6. Первая книга (рис. 30), напечатанная на 3D-принтере в космосе, — «100 взглядов на будущее». Автор — Ron Arad, художник и архитектор, издатель — компания Genius 100 [22].

Книга была напечатана при участии астронавта JAXA (Япония) Soichi Noguchi, инженера, участника экспедиций 22 и 23 на борту международной космической станции (ISS).

7. BBC США установили первую отпечатанную на 3D-принтере (SLM) деталь из титанового сплава для сборки в кабине пилота на F-22 Raptor во время пла-

Рис. 31. Титановая деталь (внизу) вместо изношенной из алюминиевого сплава



нового обслуживания самолета [23] – рис. 31. По словам специалистов, по итогам первого опыта такого ремонта они планируют использовать еще 5–6 деталей, отпечатанных на принтере. Впоследствии будут использоваться более сложные отпечатанные детали для замены, что может сократить сроки обслуживания техники на 60–70 дней.

Примеры использования деталей, изготовленных на 3D-принтерах, не единичны:

- BMC тестируют дроны, отпечатанные на 3D-принтере;
- сборка для трубопроводов будет установлена на авианосце Harry S. Truman.

8. GE Aviation совместно с GE Additive [24] изготовила и установила первую отпечатанную на 3D-принтере Concept Laser M2 деталь – кронштейн системы открывания двери самолета (рис. 32). Экономия материала 50%, на 10% легче, можно заменить суперсплав на основе никеля на сплав кобальт-хром – сравнение с традиционной технологией. Однако для этого пришлось получить разрешение от федеральной авиационной администрации (FAA) на новую конструкцию и способ изготовления.

Рис. 32. Кронштейн системы открывания двери, изготовленный на M2-принтере

- фотополимеризация в ванне/Vat Photopolymerization, VP;
- струйное нанесение связующего/Binder Jetting, BJ;
- струйное нанесение материала/Material Jetting, MJ;
- синтез на подложке/Powder Bed Fusion, PBF;
- экструзия материала/Material Extrusion, ME;
- листовая ламинация/Sheet Lamination, SL.

Сертификация изделий АМ проводится для отдельных изделий, и лишь небольшое их количество получило одобрение для использования в реальных условиях. Очевидно, что необходимо переходить от сертификации отдельных напечатанных изделий к сертификации АМ-оборудования, материалов и технологического процесса изготовления с выборочной проверкой качества серийных изделий.

Созданием международных стандартов для аддитивного производства [25] занимается объединение компаний, в которое вошли: ASTM – международный АМ-центр качества, MTC – Manufacturing Technology Centre – производственный технологический центр, BSI – British Standards Institution – Британский институт стандартов, Innovate UK – обеспечивает финансовую поддержку в размере 300000 фунтов (2018 г.).

BSI будет координировать наиболее распространенные АМ-технологии на основе DED – прямого внедрения тепловой энергии (лазер, электронный луч, плазма) для соединения предварительно расплавленного материала.

Три области для DED-стандартизации включают в себя:

- использование проволоки в качестве фидштока с набором требований к составу материала, размерной точности, примесям, упаковке, обработке и хранению;
- стандарт неразрушающего контроля с описанием типичных дефектов и их природы в сочетании с традиционными методами тестирования, применимыми для DED;
- стандарт для DED с использованием проволоки и плазмы (WAAM), который покрывает терминологию, возможности и ограничения для материалов, ограничения по геометрии, требования к финишной обработке, контролью качества и т. д.

Разработанные проекты стандартов будут доступны для публичного обсуждения, после чего должны быть приняты в качестве международных стандартов.

Во время выставки Formnext 2018 был проведен форум, посвященный стандартам АМ/3D-печати, в рамках которого два международных лидера в области стандартизации: ASTM International и Международная организация по стандартизации (International Organization for Standardization, ISO) – договорились о формальном сотрудничестве между техническими комитетами ASTM F42 и ISO TC 261 по работе над стандартами АМ [26]. Будущие АМ-стандарты выйдут под двойным логотипом ISO и ASTM, будут действительны для всего мира и не потребуют процедуры дополнительной гармонизации.

Основные АМ-стандарты отражают главные концепции, общие требования, применимость в целом [27]. Следующий уровень включает две основных категории: материалы (порошки металлов, керамики и т. д.) и процесс (DED, BJ и т. д.) и отдельно описания методов финишной обработки готовых изделий и различные методы контроля качества готовых изделий. Третий уровень устанавливает АМ-стандарты для конкретных материалов (порошки сплавов на основе Ti, Ni; ABS и т. д.), процессов для конкретных материалов (DED для сплавов Ti; PBF для нейлона и т. д.) и для конкретных приложений (сплавы Ti или DED для сплавов Ti, а также готовые



### Стандарты АМ

В настоящее время выделены семь основных технологических процессов АМ:

- прямой подвод энергии и материала/Directed Energy Deposition, DED;

*Таблица 1. Пример готовых AM-стандартов для материалов, процессов получения порошков и процессов AM- получения готовых деталей*

Стандарт	Описание	Тип
AMS7000	Изготовление деталей по технологии лазерного сплавления (Laser-Powder Bed Fusion, L-PBF) из никелевых сплавов, нержавеющих и жаропрочных сплавов (62Ni -21.5Cr -9.0Mo -3.65Nb) с использованием процессов снятия остаточных напряжений при горячем изостатическом прессовании и отжиге.	Требования к материалам
AMS7001	Порошки для АП на основе никелевых нержавеющих и жаропрочных сплавов (62Ni - 21.5Cr - 9.0Mo - 3.65 Nb)	Требования к порошковым материалам
AMS7002	Требования к процессу лазерного сплавления (Laser Powder Bed AM) с использованием порошков для применения в авиакосмосе	
AMS7003	Требования к процессу лазерного сплавления порошков (Laser Powder Bed Fusion)	Требования к процессам

изделия из сплавов Ti в авиакосмосе, медицине, автомобилестроении и т.д.).

Пример готовых к использованию стандартов дан в таблице 1.

Европейский комитет по стандартам (CEN) совместно с техническим комитетом CEN/TC 438 одобрил без изменений предложенные ISO/ASTM стандарты для АМ.

Из предложенного обзора видно, что появляются новые аддитивные технологии и в интересных проектах получают развитие ранее заявленные, предлагаются высокопроизводительное оборудо-

ование и материалы. Основными задачами остаются: повышение производительности, соответствие стандартам и процедурам качества. Что касается текущего 2019 года, то, согласно [28], особо актуально будет дальнейшее совершенствование методов постобработки, таких как удаление вспомогательного материала, очистка материала в зонах отверстий и полостей, чистовая обработка поверхности, окрашивание, нанесение покрытий, текстурирование и контроль. Металлические детали могут также потребовать снятия напряжений, горячего изостатического прессования, об-

работки с ЧПУ, дополнительной термической обработки и полировки. Автоматизация некоторых или большинства из этих шагов будет в значительной степени способствовать обоснованию стоимости для использования АМ в серийном производстве. По мнению основателя и генерального директора Materialise Фрида Ванкраена [28], 2019 год будет годом постепенных шагов и продолжением медленной революции. Приложения, а не технологии, будут стимулировать индустрию АМ в форме инвестиций. ■

#### Литература

1. J'son & Partners Consulting «Рынок 3D-печати и перспективы применения аддитивных технологий в России и в мире». 2018.
2. [www.sciencedaily.com/releases/2019/01/190131143330.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2019/01/190131143330.htm)
3. [www.desktopmetal.com](http://www.desktopmetal.com)
4. <https://press.ext.hp.com/us/en/press-releases/2018/hp-launches-worlds-most-advanced-metals-3d-printing-technology.html>
5. <https://www.exone.com/Systems/Production-Printers/-X1-25PRO>
6. <https://digitalmetal.tech>
7. <https://www.desktopmetal.com/resources/>
8. <http://meldmanufacturing.com>
9. <https://patents.google.com/patent/US20180361680A1/en>
10. [www.carbon.3d](http://www.carbon.3d)
11. <https://www.nature.com/articles/s41427-019-0109-y>  
Additive manufacturing of self-healing elastomers, Kunhao Yu, An Xin, Haixu, Du, Ying Li & Qiming Wang
12. <http://www.3ders.org/articles/20190118-new-family-of-materials-called-meta-crystals-based-on-lattice-structures-in-3d-prints.html>
13. <https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1089/3dp.2018.0157>
14. Klein J, Stern M, Franchin G, et al. Additive manufacturing of optically transparent glass. *3D Print Addit Manuf* 2015; 2:92–105. Link, Google Scholar
15. <https://www.ec-nantes.fr/news-/naval-group-and-centrale-nantes-printing-tomorrow-s-propellers-249739.kjsp>
16. [http://www.ilwt-stu.ru/news/726\\_ilist-prinal-uchastie-v-vystavke-metalloobrabotka.html](http://www.ilwt-stu.ru/news/726_ilist-prinal-uchastie-v-vystavke-metalloobrabotka.html)
17. <https://orbex.space>
18. <https://www.aispacefactory.com>
19. <https://www.media.mit.edu/groups/space-enabled/overview/>
20. <https://www.aerospacetestinginternational.com/news/space/esa-tests-3d-printed-rocket-thrust-chamber.html>
21. <https://www.relativityspace.com>
22. <https://www.genius100visions.com/#visions-of-future>
23. <https://www.upi.com/F-22-Raptor-receives-3D-printed-metallic-part-for-the-first-time/1831547820525/>
24. [www.ge.com/additive](http://www.ge.com/additive), [www.geaviation.com](http://www.geaviation.com)
25. <https://3dprintingindustry.com/news/astm-international-innovate-uk-bsi-mtc-to-co-develop-standards-metal-additive-manufacturing-146699/>
26. <https://clck.ru/FREMg>
27. <https://www.metal-am.com/wp-content/uploads/sites/4/2018/12/MAM-Winter-2018-sp.pdf>
28. <https://wohlersassociates.com/blog/category/additive-manufacturing/>



На «Металлообработке-2019» компания DMG MORI подтверждает стремление внедрять в России самые передовые технологии станкостроения, развивать локальное производство и поставлять инновационные технологии, такие как решения по автоматизации и аддитивное производство.

## Укрепление российского рынка технологий с помощью станков с ЧПУ

- Интегрированная цифровизация: система управления CELOS и эксклюзивные технологические циклы DMG MORI
- Локальное производство: три новых технологических цикла DMG MORI для станков ECOLINE
- Автоматизация: увеличение добавленной стоимости благодаря внедрению систем автоматизации
- Аддитивное производство: четыре полные технологические цепочки для аддитивного производства с использованием порошковой камеры и сопла подачи порошка
- Мировой чемпионат по профессиональному мастерству WorldSkills 2019: компания DMG MORI поставит 46 станков для чемпионата в Казани

С 27 по 31 мая 2019 года в Москве пройдет 20-я юбилейная выставка «Металлообработка» — одно из важнейших и регулярно проводимых мероприятий в области станкостроения и металлообработки, которое является отличной площадкой для компании DMG MORI, чтобы представить российским заказчикам свою продукцию и инновационные разработки. Наличие у DMG MORI современной производственной площадки в Ульяновске и Центра технологий и решений с демонстрационным залом в Москве обеспечивают станкостроительному концерну статус не только отечественного производителя, но и лидера инноваций на российском рынке. Компания DMG MORI продемонстрирует последние разработки в области цифровизации, например, интерфейс CELOS и новые технологические циклы DMG MORI для станков ECOLINE локального производства. Помимо этого большое значение будет уделено решениям в области автоматизации, таким как Robo2Go и системе смены палет РН 150, а также аддитивному производству. Данная технология будет демонстрироваться на станке LASERTEC 30 SLM 2-го поколения. Еще одной важной темой 2019 года станет мировой чемпионат по профессиональному мастерству WorldSkills 2019 г. в Казани. DMG MORI является платиновым партнером этого мероприятия и предоставит 46 станков с ЧПУ для таких компетенций, как фрезерные работы на станках с ЧПУ, токарные работы на станках с ЧПУ, командная работа на производстве, изготовле-

ние изделий из полимерных материалов, реверсивный инжиниринг и 3D-прототипирование.

Интегрированная цифровизация: интерфейс CELOS и эксклюзивные технологические циклы DMG MORI

Компания DMG MORI первой начала внедрять в станкостроение технологии цифровизации, т.е. переводить информационные потоки на производстве в цифровой вид, и продолжает считать цифровизацию стратегическим направлением, имеющим боль-

Под лозунгом «Интегрированная цифровизация» компания DMG MORI представит на «Металлообработке-2019» решения для перехода к Индустрии 4.0



шое будущее. На выставке компания познакомит посетителей с этапами внедрения сетевых решений в производство на пути к Индустрии 4.0 под лозунгом «Интегрированная цифровизация». Основными составляющими являются CELOS – система управления на основе приложений, эксклюзивные технологические циклы и решения Powertools для подготовки работ в цифровом виде. Технологические циклы DMG MORI упрощают программирование обработки и позволяют рационализировать процесс производства. С помощью этих циклов даже сложные этапы обработки могут программироваться непосредственно на пульте станка с помощью диалогового меню путем ввода параметров. Это наглядный, интерактивный и удобный для оператора способ программирования, который приводит к значительной экономии времени при производстве. На основе своего обширного практического опыта DMG MORI концентрируется на постоянном развитии уникальных технологических циклов, которых в настоящее время насчитывается 34.

#### Локальное производство: три новых технологических цикла DMG MORI для станков ECOLINE

Современное промышленное предприятие в Ульяновске и Центр технологий и решений DMG MORI в Москве обеспечивают станкостроительному концерну статус не только отечественного производителя, но и лидера инноваций на российском рынке. С момента открытия Ульяновского станкостроительного завода в 2015 году российская производственная площадка с каждым годом развивается все успешнее, достигнув наивысших показателей в 2018 г. Технология полного цикла сборки, сборка шпинделей для станков локального производства и производство гидравлических систем стали основными этапами развития за последние два года. Теперь компания DMG MORI также предлагает новые технологические циклы для станков ECOLINE: MPC 2.0, переменная скорость вращения и 3D quickSET.

Технологический цикл MPC 2.0 – защита станка быстрым отключением – уже сейчас доступен для станков DMC 635 V *ecoline*, DMC 1035 V *ecoline*, DMU 50 *ecoline*, а с 3 кв. 2019 г. он станет доступным для 5-осевого станка

DMU 50 2-го поколения. Данный цикл контролирует вибрацию и крутящий момент во время работы и обеспечивает быстрое отключение в случае аварии. Это уменьшает ущерб от повреждения, а также риск поломки инструмента и повышает эксплуатационную готовность станка.

Технологический цикл «переменная скорость вращения» работает с главным шпинделем и контрольным шпинделем или, в случае фрезерных станков, с токарно-фрезерными столами с прямым приводом.

Компания DMG MORI также предлагает новые технологические циклы для станков ECOLINE локального производства: MPC 2.0, переменная скорость вращения и 3D quickSET.



Адаптация скорости вращения позволяет избежать вибрации. Таким образом, это повышает безопасность процесса обработки, например, при использовании длинных тонких сверл. Переменной скоростью легко управлять с помощью трех параметров, дополнительных датчиков не требуется. Не требуется также вмешательства оператора в ручном режиме, при этом цикл обеспечивает одинаковую повторяемость для всех компонентов. Данный цикл доступен на станках CTX 310 *ecoline* и CTX 510 *ecoline*.

Третий новый технологический цикл DMG MORI, предназначенный для фрезерных станков DMU 50 *ecoline* и DMU 50 2-го поколения, называется 3D quickSET – комплект приспособлений для проверки и корректировки кинематической точности станка в 4-х и 5-осевом исполнении, для всех вариантов исполнения головки и стола. Цикл предлагает периодическую перекалибровку станка с полным документированием данных и высочайшую кинематическую точность самонастройки.

#### Услуги по модернизации станков DMG MORI на Ульяновском станкостроительном заводе

На базе Ульяновского станкостроительного завода теперь есть возможность получить услуги по модернизации любого эксплуатируемого оборудования производства концерна DMG MORI, вне зависимости от года изготовления и состояния оборудования. Завод имеет все необходимое современное оборудование и квалифицированных специалистов для выполнения цикла работ по реновации оборудования.

На сегодняшний день может быть произведена замена следующих узлов станка: шпинделей, ШВП, приводов, линеек, системы ЧПУ. Основываясь на требованиях и пожеланиях заказчиков, в результате проведенных работ оборудование приобретет новые качественные характеристики, связанные с увеличе-

*Современный завод в Ульяновске и Центр технологий и решений DMG MORI с демонстрационным залом в Москве обеспечивают станкостроительному концерну не только статус отечественного производителя, но и лидера инноваций на российском рынке.*



нием его производительности, скорости и точности обработки, энергоэффективности, и в конечном итоге позволит с минимальными затратами выйти на качественно новый уровень производства в век цифровизации и стремительно развивающихся технологий.

**Автоматизация:**  
больше добавочной стоимости благодаря  
внедрению систем автоматизации

Станки, оснащенные автоматизацией, являются обязательными составляющими цифрового завода, а значит, без них невозможно представить современное интеллектуальное сетевое производство. Компания DMG MORI продолжает считать цифровизацию стратегическим направлением, имеющим большое будущее. Как и все заводы концерна, завод в Ульяновске также играет важную роль в разработке и внедрении решений по автоматизации. Диапазон предлагаемых заводом услуг достаточно широк: от технических консультаций и расчета затрат до возможных модификаций используемых станков, включая установку и ввод в эксплуатацию. Эксперты в Ульяновске предлагают

*Технология полного цикла сборки, сборка шпинделя для станков локального производства и производство гидравлических систем стали основными этапами развития за последние два года*



и другие решения по оптимизации производства, оснащение инструментом и обучение роботов, так что заказчики получают комплексное решение по автоматизации от одного поставщика. Свой опыт в области систем автоматизации компания DMG MORI продемонстрирует на примерах токарно-фрезерного центра CTX beta 800 TC с гибкой в эксплуатации системой Robo2Go и 5-осевого фрезерного станка DMU 50 2-го поколения с системой смены палет PH150.

*5-осевой фрезерный станок DMU 50 2-го поколения с системой смены палет PH150*



*Рабочий процесс в системе Robo2Go 2-го поколения задается быстро и просто: специальной подготовки в области программирования роботов для этого не требуется*



**АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО:**  
четыре полные технологические цепочки  
для аддитивного производства с использованием  
сопла подачи порошка и порошковой камеры

Уже более пяти лет компания DMG MORI успешно представляет на рынке технологию сочетания сварки лазерной наплавкой и резания металла на станках серии LASERTEC *3D hybrid*. В дополнение к разработкам в области цифровых технологий для традиционного производства компания DMG MORI также стала производителем полной линейки оборудования для аддитивного производства. В ближайшие годы ожидается бурное развитие аддитивных технологий. Но это не станет неожиданностью для компании DMG MORI, обладающей линейкой оборудования в этой области. В то время как LASERTEC 653D предназначен исключительно для сварки лазерной наплавкой в качестве дополнения к имеющимся обрабатывающим центрам в цехе, серия LASERTEC *SLM* – DMG MORI на «Металлообработке» будет демонстрировать LASERTEC 30 *SLM* 2-го поколения – расширяет линейку продукции, включив технологию селективной лазерной плавки в порошковой камере. Две последние серии также можно комбинировать с отдельными обрабатывающими центрами и токарными станками из линейки DMG MORI, чтобы создавать новые технологические цепочки.

*Для аддитивного производства в порошковой камере компания DMG MORI предлагает станок LASERTEC 30 SLM 2-го поколения*



Специально для применения в селективной лазерной плавке компания DMG MORI предлагает новое программное обеспечение «OPTOMET». Оно имеет алгоритмы самонастройки и обучения, которые рассчитывают необходимые параметры селективной лазерной плавки заранее в течение нескольких минут. Это означает, что толщину слоя, например, можно рассчитать свободно, что, в свою очередь, обеспечивает более быструю и, следовательно, более производительную постройку. «OPTOMET» также имеет базу

данных материалов, которая позволяет операторам использовать материалы всех производителей без необходимости их предварительного тестирования. Открытая система также позволяет самостоятельно расширять базу данных на основе собственных экспериментов заказчика. «OPTOMET» может регулировать параметры таким образом, что свойства материала, такие как твердость, пористость и эластичность, могут быть изменены или оптимизированы.

**Мировой чемпионат по профессиональному мастерству WorldSkills 2019:**  
**компания DMG MORI поставит 46 станков**  
**для чемпионата в Казани**

Имея богатый опыт в организации образовательных программ, компания DMG MORI с 2013 г. является генеральным партнером движения WorldSkills в России, а с 2017 г. и глобальным партнером международного движения WorldSkills International. Партнерство подразумевает проведение специальных обучающих курсов для подготовки участников движения WorldSkills. Эффективность обучающих программ подтверждена на практике в обучающих центрах, сотрудничающих с компанией DMG MORI. Наилучшие результаты в таких компетенциях, как точение и фрезерование, на российских соревнованиях WorldSkills были продемонстрированы в образовательных учреждениях, оснащенных станками DMG MORI.

В 2019 году мировой чемпионат по профессиональному мастерству WorldSkills пройдет в Казани. На правах платинового партнера компания DMG MORI предоставит 17 станков с ЧПУ DMU 502-го поколения для фрезерования и 17 станков с ЧПУ CTX 310 *ecoline* для токарной обработки.

Для компетенции «Командная работа на производстве» будут поставлены 9 станков DMC 635 V *ecoline*. Для соревнований по реверсивному инжинирингу и 3D-прототипированию DMG MORI предоставит 2 станка LASERTEC 30 *SLM* 2-го поколения.

И наконец, для отработки навыков и умений в рамках новой компетенции «Цифровая фабрика» станок CTX beta 800 TC будет оснащен системой автоматизации Robo2Go. ■

ООО «ДМГ МОРИ Рус»

125130, г. Москва, Старопетровский проезд, д. 1А.

Тел: +7 (495)-139-74-11. Факс: +7 (495)-139-74-12.

[info@dmgmori.com](mailto:info@dmgmori.com),

[www.dmgmori.com](http://www.dmgmori.com)



Посетите наш стенд!  
«Металлообработка-2019», Москва  
с 27 по 31 мая 2019 г.  
Павильон 2.2, стенд А05 / Северный вход

## LASERTEC 30 **SLM** 2-го поколения

# ВЫСОКОТОЧНАЯ СЕЛЕКТИВНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ПЛАВКА



## ОТКРЫТАЯ СИСТЕМА

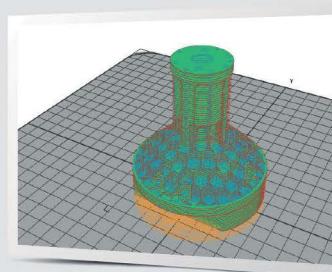
Индивидуальная настройка  
всех параметров и свободный  
выбор поставщика материала

## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС DMG MORI

оптимальные процессы при предварительной  
и последующей обработке деталей

## **rePLUG** СМЕННЫЙ МОДУЛЬ ПОДАЧИ ПОРОШКА

- + Увеличение эффективности благодаря интегрированной системе повторного использования порошка
- + замена порошка менее чем за 2 часа



## **CELOS** – ИНТЕГРИРОВАННОЕ ПРОГРАММНОЕ РЕШЕНИЕ

от САМ-программирования до  
управления станком



Подробнее об аддитивном  
производстве  
[dmgmori.com](http://dmgmori.com)

**DMG MORI**

# Rösler AM Solutions – технологический партнер в цепочке аддитивного производства

## Комплексная поддержка и готовые решения для аддитивного производства

Благодаря собственным разработкам, сотрудничеству с известными промышленными предприятиями и научно-исследовательскими институтами бренд AM Solutions от Rösler предлагает всестороннюю поддержку от создания заготовки или поиска оптимального решения с возможностью улучшить последующую обработку до достижения идеального качества поверхности.

Являясь специалистом в области обработки поверхности деталей, произведенных традиционным способом, Rösler на протяжении многих лет развивает аддитивное производство. Это не зависит от того, изготовлены ли детали из металла, пластмасс, керамики, песка, композитных или других материалов и каким способом они печатаются. Собственные лаборатории, тестовые центры и партнерские отношения позволили разработать автоматизированную обработку и очистку поверхности деталей – будь то удаление поддержки детали и прилипшего порошка, очистка и шлифование поверхностей, скругление кромок, зеркальная полировка или подготовка к последующему нанесению покрытия, включая соответствующие технологические средства. С созданием бренда AM Solutions группа компаний Rösler делает еще один шаг вперед. Данный бренд предлагает полный спектр услуг и решений всей технологической цепочки аддитивного производства, который включает в себя поддержку в создании и обработке деталей, консультации, а также подбор оборудования, технологических средств для последующей финишной обработки поверхности.

*Премьера бренда AM Solutions была представлена на Formnext 2018 во Франкфурте-на-Майне.  
Foto: Rösler Oberflächentechnik GmbH*



### Сотрудничество с известными промышленными партнерами

AM Solutions также сотрудничает с компанией Post Process Technologies (г. Буффало, США). Процесс, разработанный этой компанией, используется для удаления поддержки детали и полировки поверхностей. Обработка индивидуально адаптирована к производственному процессу: параметры процесса, такие как область обработки заготовки, продолжительность и интенсивность, определяются данными процесса 3D-печати. С помощью этой технологии детали, изготовленные преимуществен-

но из пластика, подвергаются дальнейшей обработке, но также возможна обработка металлических деталей. Для пластиковых заготовок аддитивного производства наш партнер Cipres из Ахорна обеспечивает электронное колорирование для покраски, инфильтрацию поверхностей KS и обработку BLAST™ процессом (технология автоматизированного сглаживания верхнего слоя). Cipres поставляет ноу-хау технологии и соответствующее технологическое оборудование.

### Партнер в разработке и исследовательских проектах

Для того чтобы постоянно совершенствовать процессы и возможности для последующей обработки поверхности, а также адаптироваться к новым разработкам и требованиям, AM Solutions также является партнером в различных исследовательских проектах. К ним относится проект «Исследование и оценка влияния процессов последующей обработки на механические свойства спеченных лазером компонентов», инициированный Центром пластмасс SKZ в Вюрцбурге. Планируется также партнерство в научно-исследовательском проекте «ИндустрIALIZация переработки пластмасс, производство порошковых добавок с использованием процесса HSS», который был анонсирован проектной группой «Регенеративное производство» Института технологии и автоматизации Фраунгофера IPA в Байройте. AM Solutions также подтвердила свое участие в проекте «Разработка методов нанесения покрытия методом PVD-нанесения на 3D-печатные компоненты» Института станков и технологий формовки им. Фраунгофера, IWU, Циттау. В дополнение к этим партнерским отношениям AM Solutions поддерживает постоянное сотрудничество с Миланским университетом, а также с различными промышленными компаниями и производителями, в том числе из аэрокосмического, медицинского и автомобильного секторов. Это включает разработку отраслевых решений для различных задач по последующей обработке поверхности для деталей, напечатанных в 3D-принтерах из различных материалов. Кроме того, фирма Rösler поддерживает учеников и студентов в проектах и диссертациях в этой области.

Rösler Oberflächentechnik GmbH является мировым лидером в производстве оборудования техники гальваники и дробемётной/дробеструйной техники, линий консервации, а также технологических средств и технологий для эффективной обработки поверхности (удаление заусенцев, удаление окалины, удаление песка, полирование, шлифование) металлов и других материалов. Помимо немецких заводов в Унтермерцбахе/Меммельсдорфе и Бад Штаффельштайне/Хаузене группа Rösler также имеет филиалы в Великобритании, Франции, Италии, Нидерландах, Бельгии, Австрии, Сербии, Швейцарии, Испании, Румынии, России, Бразилии, Индии, Китае и США.

ООО «Рёслер Руссланд»  
11020, Москва, ул. Боровая, д. 7, стр. 4.  
Тел.: +7 495 247 55 80, факс: +7 495 247 55 80, доб. 12  
Веб-сайт: [www.rosler.ru](http://www.rosler.ru), e-mail: [info@rosler.ru](mailto:info@rosler.ru)

# Демонстрация возможностей

Татьяна Карпова

В рамках выставки 3D Print Expo, проходившей в октябре в Москве в КВЦ «Сокольники», редакция поинтересовалась, что нового и интересного в области 3D-печати и 3D-сканирования предлагается потребителю на российском рынке. Что же увидели посетители?

## 3D-принтеры

На вопросы о самом интересном большинство экспонентов с готовностью демонстрировали представленное на стенах оборудование и материалы, в т.ч. новинки от отечественного производителя.

Фирма Vortex из Сургута показывала 3D-принтеры собственной разработки и производства: модели DUAL и GIANT (рис. 1). Наличие двух печатающих головок позволяет изготавливать на них двухцветные детали или детали со сложными поддержками, когда поддержки печатаются водорастворимым материалом, а изделие основным. Маленький DUAL имеет диаметр 320 мм и высоту печати до 55 см, большой

Рис. 1.



GIANT — диаметр 55 см и высоту печати до 95 см. Как инновационные составляющие для дельта-принтеров были обозначены: достаточно легкая головка, система переключения головок по высоте и полностью автоматизированная система калибровки.

3D-принтеры также с двумя экструдерами: Pro2 и Pro+2 известного китайского разработчика RAISE3D — демонстрировались на стенде ООО «Цветной мир» (область построения соответственно 305×305×300 мм и 305×305×605 мм, разрешение печати — 0,01 мм). Принтеры отличаются высокой производительностью, а также широким диапазоном применяемых материалов, что достигается за счет специальной конструкции экструдера и его нагревом до 300°C.

Возможности принтера Hercules STRONG DUO с новой двухэкструдерной печатающей головкой производства компании IMPRINTA демонстрировал уникальный мотоцикл от Vizuit lab (компания занимается кастомизацией мотоциклов). Vizuit Lab использует печать для двух целей: прототипирование и тестирование деталей перед финальным производством из металла и для печати деталей, которые не находятся под нагрузкой: корпуса под электронику, декоративные крышки, накладки и др. Что касается данной модели принтера, то она имеет новые системы автоматической калибровки от положения высоты сопел до калибровки плоскости стола, увеличенную точность позиционирования, систему контроля пластика в катушке.

В новинке от компании Cyber — 3D-принтере Dragon ориентир был взят на быстроту и качество. Печать реализована двумя независимыми экструдерами на одной оси X. Помимо быстрого переключения материалов это дало дополнительную функцию параллельной печати — двух деталей за время печати одной. Закрытый корпус с пространственной рамой обеспечивает хорошую жесткость и позволяет печатать конструкционными материалами с усадкой.

На стенде Maestro были представлены две новые модели. Задачей маленького принтера Honey было сделать доступной покупку для дома, но при этом он, как и базовая модель Maestro Classic, имеет датчик движения филамента и юстировку стола. Также был представлен будущий флагман с двумя печатными головками. Помимо упомянутых технологий, в модели предусмотрена система резервирования питания, новый контроллер управления, цветной экран, поддержка USB, встроенный Wi-Fi модуль. В процессе разработки удаленная система мониторинга и управления через Интернет, предусматривается установка камеры для получения слайдов с печатного стола.

Новинка от Picasso — машина VC Picasso имеет большую область печати 360×360×610 мм, автоуровень стола, автоматизированную систему профилей, как у всех принтеров серии X. Пока печать осуществляется одним материалом, но готовится двухспальный вариант.

В новом принтере Magnum Creative 2 (рис. 2) улучшен и

упрощен процесс печати двумя соплами, время переключения между которыми не более 0,5 с. Для удобства эксплуатации добавлена полуавтоматическая калибровка высоты и расстояния между соплами. Обновленное программное обеспечение дает большую скорость и лучшее качество печати по сравнению с моделью PRO. Размер области построения 245×170×170 мм.

Рис. 2.



Ключевой особенностью нового 3D-принтера PrintBox3D White является полностью закрытая камера с принудительным обдувом. Таким образом, в камере 3D-принтера создается наилучший температурный баланс для печати высокотемпературными пластиками. Для данной модели был разработан новый экструдер, который стал значительно легче предшественника. Облегчена процедура его прочистки. Появился датчик наличия нити. Размер рабочей камеры: 220×210×230 мм.

Компания «Электропривод» представила 3D-принтер SkyOne на основе механики Коскара (рис. 3). На сегодняшний день таких принтеров в мире никто не производит. В чем основное преимущество? Принтер получился достаточно компактным при стандартных параметрах печати. Снимая стол, можно добиться минимального габарита для хранения. Принтер не имеет узлов, подверженных временной деформации.

Рис. 3.



Рис. 4.



Новый продукт на рынке – 3D-принтер, печатающий глиной, представляла компания «Робокинетика». Также компания предлагает 3D-принтеры Delta с Mixing-экструдером, который позволяет смешивать в необходимых пропорциях в процессе печати сразу два или три филамента одного материала разных базовых цветов. Таким образом, в изделии можно получить оттенки этих цветов и новые цвета.

На стенде ООО «АМ-КОР» – официального представителя XYZprinting (Тайвань) – показывали первый в мире доступный 3D-принтер с возможностью полноцветной печати daVinci Color (рис. 4), сочетающий процессы струйной и 3D-печати на базе технологии FFF (Fused Filament Fabrication). Принцип действия следующий: струйная печатная головка наносит чернила CMYK на специальную абсорбирующую нить CPLA, позволяя создавать изделия с миллионами оттенков. Область печати данной модели имеет размеры 200×200×150 мм, точность позиционирования по оси Z – 0,4 мкм, по осям X и Y – 12,5 мкм, толщина слоя 100–400 мкм, что позволяет создавать достаточно объемные и точные полноцветные 3D-модели.

Промышленные 3D-принтеры, работающие по технологии FDM, были представлены двумя ком-

паниями Nissa DigiSpace – дилером компании Stratasys (на стенде демонстрировалась модель Srtatasys F370 с рабочей зоной 356×254×355 мм) и российским производителем компанией Total Z (на стенде демонстрировалась модель ANYFORM 450 PRO с размерами рабочей зоны 450×450 мм – рис. 5). Кроме того, на стенде Nissa DigiSpace были показаны FDM-принтеры Maker Bot – модели Replicatior+ и Replicator Mini+ с рабочими зонами 295×195×165 мм и 101×126×126 мм соответственно.

Единственный на выставке SLM-принтер печати по металлу демонстрировался отечественной компанией ООО «Эксклюзивные решения» (3DSLA.RU). По за-

Рис. 5.



явлению производителя, платформа собственной разработки позволяет быстро изготавливать принтеры с любыми разумными зонами построения (вплоть до  $900 \times 900 \times 1000$  мм), устанавливать лазерные источники разной мощности и создавать решения с несколькими синхронно работающими сканаторами. Данные машины работают не только с порошками сферической формы, но и несферическими, которые дешевле в 2–4 раза. Программное обеспечение Triangulatica собственной разработки позволяет производить подготовку печатных столов, расставлять поддерживающие структуры в автоматическом режиме, формировать стратегии печати различными материалами и др.

Группа компаний ISL вместе с Московским государственным университетом пищевых производств занимается разработкой инновационных пищевых 3D-принтеров. Исследуются разные материалы, режимы их подачи, температурные параметры. На выставке демонстрировалась концепт-модель, первый 3D-принтер предполагается выпустить в течение года. Среди используемых материалов: шоколад, глазурь, тесто, пюре.

А на стенде интернет-магазина 3D ARTEL уже можно было увидеть результаты печати на кофейной пенке, коктейлях и десертах.

И конечно, были другие экспонаты и экспоненты, в т.ч. интернет-магазины, предлагающие китайское оборудование.

## Сканеры

Сканеры Range 3D Vision производятся в России. Пользователю предлагаются две модели: Spectrum и Pro. Гибкое оборудование отличается точностью и детализацией и позволяет сканировать как миниатюрные (ме-

нее 3 см), так и крупные (от 1 м) объекты.

На стенде компании Тегем3Д демонстрировали возможности 3D-сканеров фирмы THOR (рис. 6). По заявлению компании, это первый ручной 3D-сканер, который может оцифровать практически все: от монеты до трактора. Все, что нужно сделать — выбрать нужную линзу — одну из трех. Запатентованное аппаратное и программное обеспечение позволяет получать наилучшие результаты даже при сканировании сложных объектов с острыми краями или блестящими, тонкими стенками. Точность модели Mini — до 40 мкм, Midi — до 70 мкм, Maxi — до 150 мкм.

В зоне арт-галереи компания Texel представляла новую версию 3D-сканера, благодаря которому можно сделать трехмерную модель человека за 30 секунд. Были показаны две модели: компактный Texel Portal MX и полноразмерный Texel Portal BX.

## Материалы

На стенде производственной компании REC обратили внима-

ние на перспективные гибкие материалы для 3D-печати: упругий Flex, похожий по свойствам на гибкую резину Rubber, а также самый эластичный и износостойкий в линейке компании Sealant, который также отличается высокой химической стойкостью к маслам, бензинам, щелочам и некоторым кислотам.

Представитель компании Print Product прежде всего выделил Flex hard (устойчив к воздействию ультрафиолета, растворителей и при этом подвергается механической обработке), ADS V-0 — трудногорючий ABS, поликарбонат PC для печати прочных изделий.

Компания Filamentago демонстрировала новый материал для печати восковых моделей (восковок). Выполненные из него изделия без изменения технологии можно использовать для любого литейного процесса, обеспечивая максимальное удешевление в изготовлении мелкосерийных и единичных изделий.

Также здесь были показаны и другие интересные материалы. Угленаполненный полиуретан TOTAL CF-5 — материал с очень низкой усадкой, высокой термостойкостью и высокой износостойкостью — предназначен для печати конечных изделий: шестерен, деталей корпусов механизмов. Материал PROFLEX специально изготовлен для печати художественных изделий (как, например, ростовые куклы, представленные на выставке). Выпускается он в двух цветах и, в отличие от большинства FLEX-материалов, подвергается химической постобработке. Для печати легковесных конструкций подходит угленаполненный композит AEROTEX-2, который вспенивается в процессе печати. Плотность материала после печати порядка  $0,8$  гр./ $\text{см}^3$ . В процессе возможно регулировать плотность и твердость структуры.



## Интересные приложения

Для работы на стенде российского производителя материалов Print Product были приглашены клиенты компании, которые проиллюстрировали различные направления применения 3D-печати. Так, компания My3DSHoes продемонстрировала работу фабрики по производству индивидуальной обуви. Помимо печати индивидуальной стельки и других частей обуви в компании разработаны оригинальные технологии приклеивания различных материалов на напечатанные части для обеспечения комфорта.

Представители строительной индустрии — компании 3DSHOP и «ПЫЛИ НЕТ» для начала использовали аддитивные технологии для собственных нужд, производя продукцию, которую было затруднительно приобрести на рынке: кожуха на болгарки для подсоединения к пылесосу, сепараторы на болгарки и др.— сборные и разборные изделия различной формы и функциональности. Позже из этого выросло отдельное направление, включая интернет-магазин и производство собственных принтеров больших размеров. Интересной разработкой компании стал новый композит (напечатанная сетка, покрытая термоизолирующим слоем типа вспененного полиэтилена). Лист из этого композита при нагревании посредством кипятка или сухого воздействия до 90 градусов можно формовать. За счет термоизолированного слоя нагретый материал не обжигает (температура внешнего слоя 30–35 градусов), тепло сохраняется внутри. Причем материал остается пластичным не 10–15 секунд, а минуту — полторы. Это достаточное время, чтобы, например, отформовать его для применения в травматологии взамен привычного гипса или дорогостоящих зарубежных материалов.



Рис. 7.

Украшением выставки, конечно, стали необычные экспонаты арт-галереи: куклы «Оникс», кукла «Рептилоид», динозавр с подвижной челюстью, четырехметровая статуя «Девушка с веслом».

## Победители

В рамках выставки традиционно был оглашен список призеров премии 3D Print Expo Awards — самых влиятельных компаний года в сфере аддитивных технологий. Организаторами данного мероприятия выступают компании Smile Expo и SIU System.

В этом году номинациями были отмечены компании:

- 3DSYSTEMS. PRO — бренд года;
- МЗТО — лучший отечественный производитель 3D-принтеров;
- VORTEX — лучшая инновационная компания года;
- CYBERON — лучшая разработка года;
- TEREM 3D — самый востребованный производитель расходных материалов;
- RANGEVISION — Лучшая компания по 3D-сканированию объектов;
- TOP3DSHOP — лучший интегратор 3D-оборудования по аддитивным технологиям и цифровому производству;
- MAESTRO — новичок года.

## В рамках деловой программы

Экспозиция выставки была по традиции дополнена насыщенной деловой программой, где можно было не только получить информацию, но и приобрести новые

навыки. В зоне лектория, который состоялся при поддержке RENA SOLUTIONS, обсудили новинки, изменения, нововведения в сфере аддитивных технологий (рис. 7). Среди тем выступлений можно отметить: интеллектуальные права в 3D, интеграция аддитивных технологий в производство, применение 3D-печати песчаных форм и моделей для литья по выплавляемым моделям, моделирование процессов 3D-печати, 3D-печать композитами и др. Были проведены круглые столы на темы: «Подготовка кадров для индустрии аддитивных технологий»; «Лучшие практики по внедрению аддитивных технологий в 2018 году». В ходе питч-сессии компании-экспоненты выступили с короткими презентациями своих продуктов, представили свои бренды и рассказали о последних разработках в индустрии. Желающие смогли принять участие в мастер-классе от 3Dmaker и нарисовать фигурку из ABS-пластика с помощью 3D-ручки. Прошли мастер-классы и от компании PICASO 3D, в ходе которого посетители осваивали навыки 3D-моделирования, 3D-печати и 3D-сканирования.

Интерес к аддитивным технологиям и их новым приложениям в различных отраслях неизменно растет. А выставка 3D Print Expo — одна из ведущих площадок, отражающих новые тенденции и течения в этом направлении. И статистика тому подтверждение — в этом году ее посетили 3000 гостей. ■

# Обзор оборудования: металлические 3D-принтеры HBD

В 2007 году китайская компания Shanghai Hanbang United 3D Tech Co., Ltd, известная под товарным знаком **HBD**, начала работать в сфере 3D-печати металлом. Имея опыт разработки оборудования и технических решений, компания вывела на рынок новое поколение оборудования для SLM-печати, а также свое собственное ПО. Компания HBD получила более 60 технических патентов и авторские права на 9 программ и на сегодняшний день имеет мощные ресурсы экспертной разработки. Богатый опыт работы на рынке услуг и инновационная концепция менеджмента позволили компании завоевать рынок и получить общественное признание.

«Терем3Д» является официальным дистрибутором оборудования HBD в России.

Сегодня 3D-принтеры HBD работают в таких сферах, как машиностроение, медицина и образование. Успешно применяются в ювелирной и даже в аэрокосмической отрасли.

Компания HBD работает со многими известными медицинскими учреждениями, которые используют 3D-принтеры для печати хирургических шаблонов, металлических имплантатов, пластин, соединяющих костные ткани, инструментов и других изделий, потребность в которых очевидна и растет с каждым днем. HBD планирует обеспечить медицинскую отрасль новейшими решениями цифровых технологий.

Аддитивные технологии позволяют сократить определенные циклы производства в машиностроительной отрасли, улучшить физико-механические показатели изделия, уйти от логистики склада и сборочных конвейеров. Уже сейчас на современных производствах существуют полностью автоматизированные линии производства с применением аддитивных технологий. Эти технологии уже прочно вошли в жизненный цикл современного производства.

Современное образование конструктора, технолога, ювелира и многих других профессий невозможно без понимания современных методов производства. Металлические аддитивные машины входят в современный процесс производства, и специалисты, работающие с этим оборудованием, начинают свой путь в учебных заведениях с освоения данной технологии. Металлические аддитивные машины компании HBD применяются как на производстве, так и в учебном процессе, что позволяет сотруднику, получив образование, сразу внедряться в работу.

Области применения 3D-принтеров HBD:

1. Производство изделий с уникальными каналами охлаждения и фильтрации
2. Медицинские изделия
3. Функциональные изделия
4. Построение изделий со сложной структурой топологической оптимизации
5. Научные исследования
6. Прототипы и запасные части

Преимущества 3D-принтеров HBD:

1. Сокращение времени производства:
  - титановых изделий;
  - изделий со сложной конфигурацией;
  - изделий, которые невозможно изготовить иными технологиями.
2. Уменьшение массы изделия:
  - сокращение массы за счет топологической оптимизации;
  - дизайн.
3. Металлические принтеры HBD работают с 90% металлов и сплавов.
4. Аддитивные машины HBD работают по открытой технологии 3D-печати. Иными словами, если в процессе производства требуется использование металла, с которым 3D-принтер еще не работал и в нем отсутствуют соответствующие настройки для работы именно с этим материалом, технолог сможет самостоятельно подобрать режим для него и подготовить оборудование к дальнейшей работе. Эту возможность предоставляют далеко не все производители металлических 3D-принтеров. Даже гиганты металлической 3D-печати предпочитают делать настройки оборудования самостоятельно по запросу клиентов. Напротив, компания HBD не только продает аддитивные машины, но и готовит производственных специалистов к автономной работе с ними.
5. Доступная цена аддитивных машин HBD по сравнению с их американскими и европейскими аналогами. При этом комплектующие для них компания HBD приобретает в Европе, США и Японии.
6. Поддержка в России. «Терем3Д» является официальным представителем HBD в России и всегда оказывает качественную и оперативную помощь своим клиентам. ■

# HBD — эксперт в 3D-печати металлом

**HBD**[hb3dp.ru](http://hb3dp.ru)

Приглашаем на стенд  
«Металлообработка»  
27-31 мая:  
павильон 5, зал 1,  
стенд 51А60

**HBD-100**

Принтер применяется в стоматологии, в сфере образования и научных исследований, при изготовлении изделий по индивидуальным заказам и т.д.

**HBD-280**

Этот принтер подходит для изготовления пресс-форм, медицинских изделий, использования в образовательных и научных целях, для производства автомобильных деталей и для применения в других областях.

**HBD-400**

Принтер может применяться при производстве штампов и пресс-форм, аэрокосмической и медицинской аппаратуры, автомобильных деталей и т.д.



МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВИАСТРОЕНИЕ



МЕДИЦИНСКАЯ ОТРАСЛЬ – СТОМАТОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ



МЕДИЦИНСКАЯ ОТРАСЛЬ – ОРТОПЕДИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ



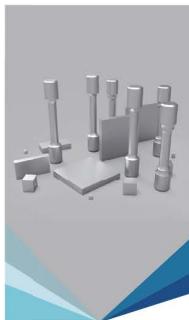
ПРОИЗВОДСТВО ПРЕСС-ФОРМ



АВТОМОБИЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ



ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ПО ИНДИВИДУАЛЬНЫМ ЗАКАЗАМ



ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

# 3D-принтер SHINING 3D EP-P3850 – окно в мир функциональных прототипов

Нашим клиентам требуется высококачественное воплощение изделий со сложной геометрией из самых практических материалов с минимальным количеством всяких «но». Порой готовые изделия должны сразу после печати служить в той или иной сфере, минуя продолжительные этапы постобработки и удаления поддержек, а также соответствовать высочайшим требованиям функциональной нагрузки.



SLS (Selective Laser Sintering – технология селективного лазерного спекания) как нельзя лучше подходит для решения поставленных задач. Селективное лазерное спекание обеспечивает высокую точность, а прочность материала позволит сразу использовать напечатанные изделия в качестве рабочих изделий, а не только прототипов. Точность получаемых объектов колеблется от  $\pm 0.1\text{--}0.15$  мм для объектов размером  $\leq 100$  мм и  $\pm 0.1\text{--}0.15\%$  для объектов с размером  $\geq 100$  мм, с толщиной слоя печати от 0,08 мм. Также стоит учитывать, что принцип печати позволяет создавать изделие без поддержек. Среди материалов на выбор есть: PA12; PA12GF;

PP; TPU, PE, TPE. Таким образом, можно предоставить большой спектр физико-механических свойств материалов для разных производств и специфик использования изделий.



Среди SLS-принтеров мы сразу же выделили оборудование от 3DSystems, EOS, Shining3D, TPM3D и Forsun. Нами были сделаны тестовые образцы на всех означенных принтерах. После печати все образцы были отсканированы высокоточным **3D-сканером Breuckmann smartSCANHE** (писали о нем в прошлых выпусках журнала), а затем был произведен анализ скана от исходной CAD-модели. По итогу нашего исследования, на наш взгляд, лучшими оказались марки EOS и SHINING. Получившиеся с их помощью изделия отвечали лучшим показателям точности, прочности и внешнего вида.

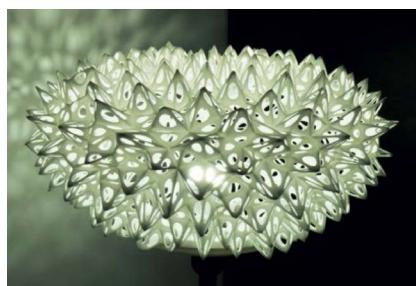
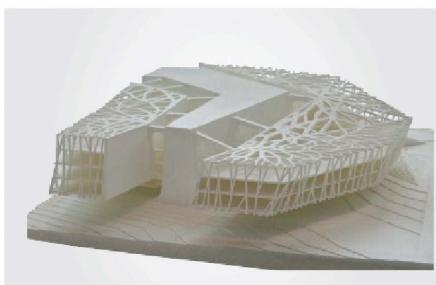
В конечном итоге с точки зрения экономической целесообразности выбор пал на SHINING3D, а именно на SLS-принтер EP-P3850.

**EP-P3850** – это промышленный 3D-принтер, разработанный компанией SHINING 3D (Китай). С помощью EP-P3850 можно изготавливать модели и опытные образцы деталей, подходящие для дальнейшей проверки их функциональности, тем самым сократить сроки разработки, уменьшить риск ошибки и воспрепятствовать выводу неоптимизированного продукта на рынок.

Неоспоримыми преимуществами данной машины являются:



Основные технические характеристики SLS-принтера EP-P3850	
Материал	PA12, PA12GF, PP, TPU, PE, TPE
Рабочая камера	380×380×500 мм
Толщина слоя	0.08 мм
Точность построения	$\pm 0.1\text{--}0.15$ мм (для объекта размером $\leq 100$ мм) $\pm 0.1\text{--}0.15\%$ (для объекта размером $\geq 100$ мм )
Режим подачи материала	Двунаправленная автоматическая подача порошка
Мощность лазера	CO <sub>2</sub> -лазер, 55 Вт
Система сканирования	Динамический фокус
Скорость сканирования	7.8 м/с (макс.)
Формат данных	STL или другой конвертируемый файл



— большая камера печати 380×380×500 мм, позволяющая сразу распечатать цельный крупный объект без необходимости предварительно делить его на части;

— печать моделей со сложной геометрией и без поддержек из функционального материала (PA 2200);

— большим преимуществом данной технологии является то,

что температура плавления полученных прототипов из полиамида колеблется в диапазоне 172–180°C;

— высокая производительность, способная реализовать тиражи из 1000 штук (небольших изделий, ~20 мм) за считанные дни;

— широкий диапазон применения.

Как следует из всего вышеперечисленного, данный 3D-принтер способен помочь любому производству с созданием функциональных качественных прототипов. С его помощью можно достаточно быстро изготовить партию корпусов, запчастей бытовых приборов. Кроме того, 3D-принтер с легкостью найдет применение в области искусства, моды, моделирования образцов посуды, кухонных и домашних принадлежностей, демонстрации творчества и прочего.

Если вас заинтересовала печать на данном оборудовании или у вас есть другие вопросы по 3D-

услугам, пожалуйста, связывайтесь с нами. Также к вашим услугам магазин 3D-техники, мы ответим на все интересующие вас вопросы, предложим необходимое решение под конкретно ваши задачи, а также обеспечим необходимыми расходными материалами.

Одними из главных преимуществ нашей компании являются низкие цены, большой выбор материалов и технологий изготовления, индивидуальное отношение к каждому клиенту и наше желание помочь в любой, даже самой сложной задаче. ■

**3DVISION**  
Центр Объемной Печати

Услуги: mail@3dvision.su

Поставки оборудования и расходных материалов: info@3dvision.su

Тел.: +7 (812) 385-72-92

+7 (495) 662-98-58, 8 (800) 333-07-58

<https://3dvision.su>

<https://www.instagram.com/3dvision.su>

<https://vk.com/3dvisionsu>



# Разработки компании Farsoon процесса лазерного сплавления чистой меди

Медь — мягкий, ковкий и пластичный металл с очень высокой тепловой и электрической проводимостью, которая широко используется в таких отраслях, как аэрокосмическая, автомобильная, судостроение, электроника. Свойства меди позволяют использовать ее для производства теплообменных аппаратов, охлаждаемых водой пресс-форм и различных электронных компонентов. Однако подавляющее большинство порошков для аддитивного производства в настоящее время основано на сплавах меди, а не на чистом металле, но применение чистой бескислородной меди открывает новые возможности для применения. Чистая медь имеет высокий коэффициент отражения лазера, который используется в 90% систем лазерного сплавления порошков (MLS). Процесс расплавления чистого медного порошка нестабилен, что приводит к таким проблемам, как искажение геометрии детали и термическое повреждение.

В течение 2017 года команда Farsoon объединила усилия с партнерами для того, чтобы начать предварительный процесс производства порошка из чистой меди для аддитивного процесса с целью использования на MLS-установках Farsoon.



Одной из деталей, полученных в результате этого сотрудничества, был чистый медный теплообменник (рис. 1) со сложной спиральной геометрией и толщиной стенки всего 0,5 мм, эта деталь была напечатана как единое целое с использованием технологии MLS Farsoon, что позволило получить гораздо более высокие показатели работы теплообменника по сравнению с образцами, изготовленными методом пайки. Облегченная конструкция имеет вес меньше на 30% и стоимость меньше на 35% по сравнению с образцами, изготовленными методом пайки.

В настоящее время все системы лазерного плавления металла Farsoon могут работать с материалом из чистой меди эффективно и рентабельно. Команда R&D Farsoon провела большое количество испытаний и получила соответствующие стратегии сканирования и параметры процесса построения деталей из чистой

меди. Эти параметры уменьшают отрицательное влияние высокого коэффициента отражения лазера для чистой меди и позволяют достигать идеальной плотности изделий, оптимизации процесса построения и отличных показателей поверхности и внешнего вида деталей. Открытая архитектура аддитивных машин FARSOON позволяет осуществлять тонкую настройку параметров процесса сплавления чистой меди для каждого клиента, что, в свою очередь, позволит применять материал любого производителя и расширять области применения.

Плотность (%)	Удлинение при разрыве (%)	Термообработка
≥ 97	≥ 16	Отжиг (600°C + 2H)

Следуя своей общей философии «Open for Industry», Farsoon стремится обеспечить своих клиентов новыми достижениями в области лазерного сплавления металлов, специально разрабатывая новые материалы и режимы работы с ними. В данный момент Farsoon успешно запустил 13 технологических процессов для сплавления металлического порошка и интенсивно развивает процессы для работы со специализированными материалами, такими как вольфрам, tantal, чистая медь и сплавы на основе никеля, обеспечивая несколько простых, функциональных и специализированных 3D-решений для аэрокосмической, автомобильной, медицинской и других отраслей промышленности.

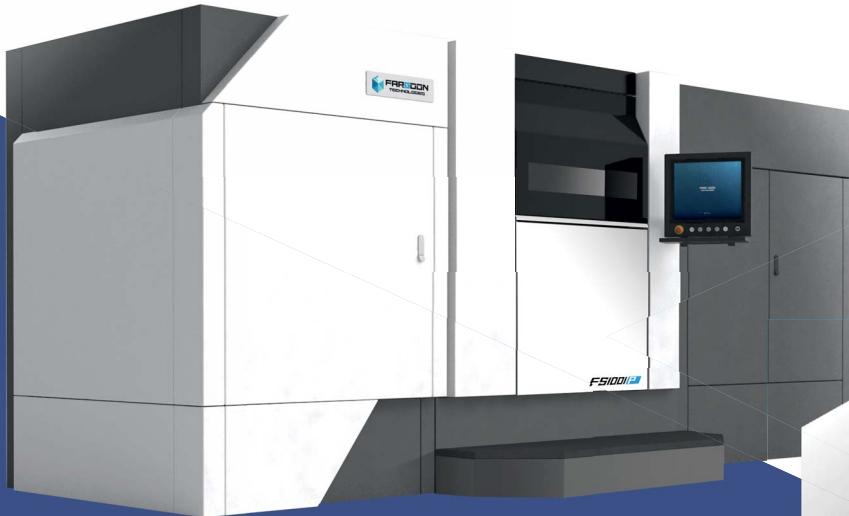
В России вы можете ознакомиться с технологиями сплавления металлических порошков FARSOON, процессами постобработки, оценить технические решения и качество аддитивных машин в демонстрационном зале компании «ЭНИКОН» в г. Екатеринбурге. Специалисты компании также расскажут о процессах спекания пластиковых порошков, особенностях технологии SLS, а также могут выполнить построение изделий, используя разные технологии и материалы. ■





ООО «СИНКАМ»  
г. Москва, Хлебозаводский проезд,  
дом 7, строение 9, офис XV  
Телефон: +7 (495) 768-77-43  
sales@farsoon.ru, www.farsoon.ru

## 3D-ПЕЧАТЬ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ



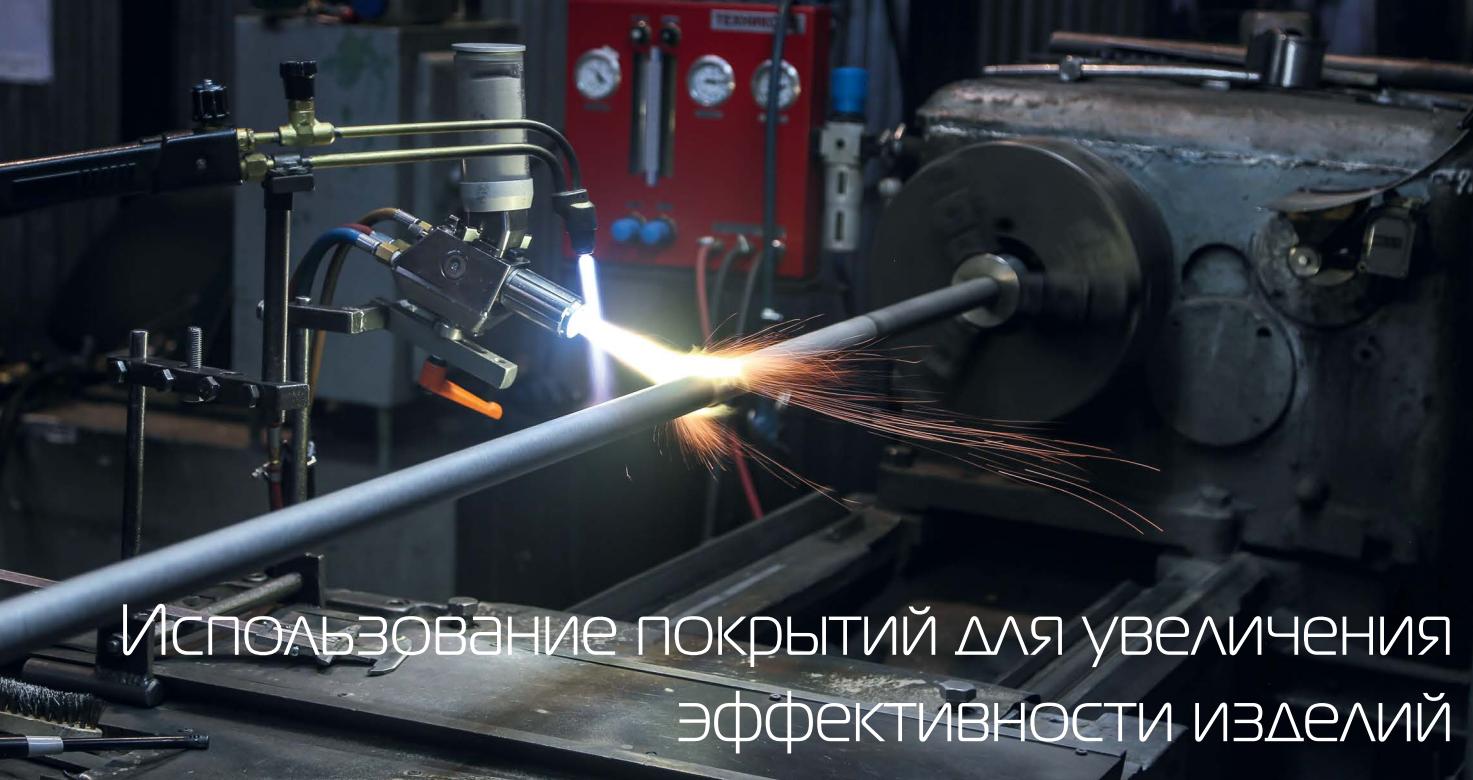
HT1001P

CAMS – установка,  
работающая по технологии  
SLS для серийного  
производства

Высокопроизводительная  
SLM-установка

FS421M





## Использование покрытий для увеличения эффективности изделий

### Порошки для наплавки и напыления производства АО «ПОЛЕМА»

Тульское предприятие «ПОЛЕМА» производит материалы, которые успешно применяются для создания покрытий со специальными свойствами. Благодаря им поверхность изделия может приобрести дополнительную термостойкость, прочность и пластичность. Создавать инновационные порошки для наплавки и напыления позволяют современное оборудование, приобретенное при поддержке ФРП, и почти шестидесятилетний опыт работы в порошковой металлургии.

Номенклатура предприятия насчитывает более 250 видов металлических порошков на Fe, Ni, Co, Cu, Zn, W, Ti – основах, используемых в более чем 20 отраслях промышленности. Условно можно выделить три крупные группы порошков по их применению: порошки для наплавки и напыления, конструкционные (под производство изделий методом порошковой металлургии: прессование, спекание), а также порошки для 3D и МИМ-технологий.

Для каждой сферы применения материалов характерны свои диапазоны фракций, а в некоторых случаях и химический состав металлического порошка.

**Группа конструкционных порошков.** Прессуемые порошки чистых металлов (хром, молибден, вольфрам, никель, титан), сплавы на основе меди (бронзы, латуни), нержавеющие стали, специальные сплавы с высокой магнитной проницаемостью (пермаллои), материалы для дробеструйной обработки поверхностей деталей (инструментальные стали). Для порошков этой сферы применения наиболее популярный диапазон фракций – от 100 до 800 мкм. Более

крупная фракция используется в производстве фильтров, что обеспечивает достижение оптимальных физико-механических свойств готовых изделий.

**Порошки для аддитивных технологий.** Производство порошков для 3D-печати и МИМ-технологий освоено на «ПОЛЕМА» в 2014 году. В 2018 г. введено в эксплуатацию уникальное оборудование для распыления, классификации и сфероидизации порошков, что обеспечивает высокое качество, сферичную форму частиц и классификацию в узком диапазоне. Оборудование предприятия позволяет осуществлять рассев от 5 мкм, устанавливать шаг рассева 2–3 мкм и выделять фракционный состав в соответствии с требованиями заказчика. Для российского производства такой шаг рассева является уникальным.

**Порошки для наплавки и напыления для различных технологий нанесения покрытий.** В этой группе представлена самая широкая номенклатура порошковой продукции предприятия: более 200 марок никелевых, железных и медных сплавов, инструментальных сталей, высокоуглеродистых и низкоуглеродистых, коррозионностойких и жаростойких сталей и сплавов, композиционных порошков на основе олова и цинка. Для порошков этой сферы применения наиболее популярной фракцией является 40–100 мкм. Но для некоторых технологий применимы и порошки с размерами частиц до 125 мкм.

Выпускаемые порошки не уступают по качеству зарубежным аналогам и способны обеспечить импортозамещение на российском рынке функциональных покрытий. Порошки для наплавки и напыления



## Металлические порошки

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

## Хром

Порошки, чешуйки, пластины, распыляемые мишени, испаряемые катоды.  
Чистота хрома 99,95-99,99 %

## Композиционные материалы

Распыляемые мишени, испаряемые катоды, контакты

## Тугоплавкие металлы

Листы, пластины, лодочки, прутки, электроды

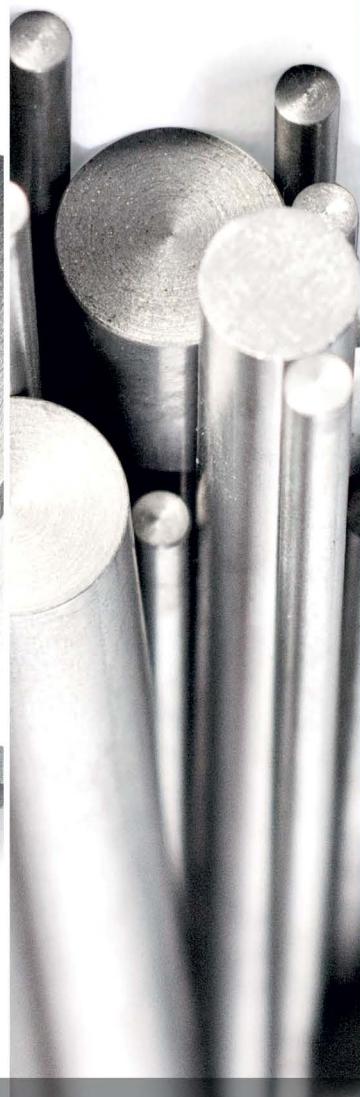
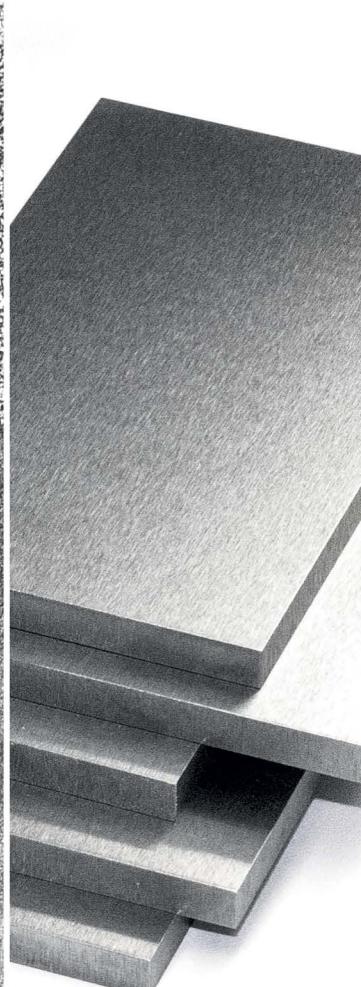
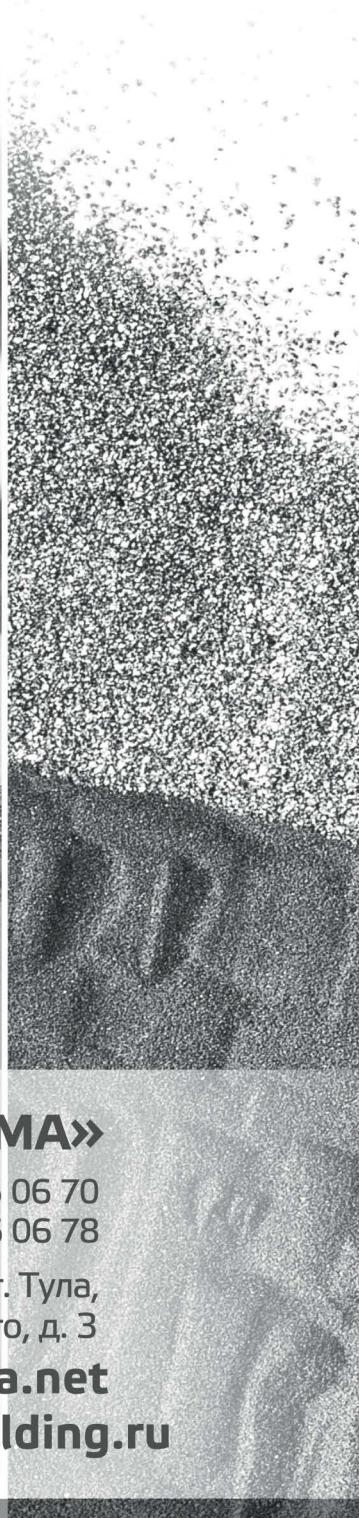
### АО «ПОЛЕМА»

Тел.: +7 (4872) 25 06 70  
Факс: +7 (4872) 25 06 78

300016, Россия, г. Тула,  
ул. Пржевальского, д. 3

[www.polema.net](http://www.polema.net)

[www.methoding.ru](http://www.methoding.ru)



аттестованы как отдельными потребителями, так и национальными агентствами. Например, национальным агентством контроля сварки «НАКС» аттестованы марки ПР-НХ15СР2 и ПР-КХ30ВС (В3К), ПР-08Х17Н8С6Г (ЦН-6Л), ПР-10Х18Н9М5С5Г4Б (ЦН-12М) и ПР-НХ16СР-У для специальной износостойкой наплавки.

**Марка ПР-КХ30ВС (В3К)** применима для ремонта деталей запорно-регулирующих устройств, седел клапанов, роторов, валов и т.д. Покрытие стойко к абразивному изнашиванию при температурах 540–840°C и фреттинг-коррозии.

**Марка ПР-НХ15СР2** наносится в качестве износостойкого, антизадирного покрытия на сталь, чугун, нержавеющие стали. Обеспечивает восстановление и упрочнение деталей запорной арматуры котлов высокого давления. Также применяется в ремонте и защите металлургического, химического и нефтегазового оборудования, деталей транспортных машин. Чаще всего наносится на подслой.

**Марка ПР-НХ8Д6СРП (ПГ-АН9)** широко применима в судостроении и наносится на коленчатые валы судовых дизелей.

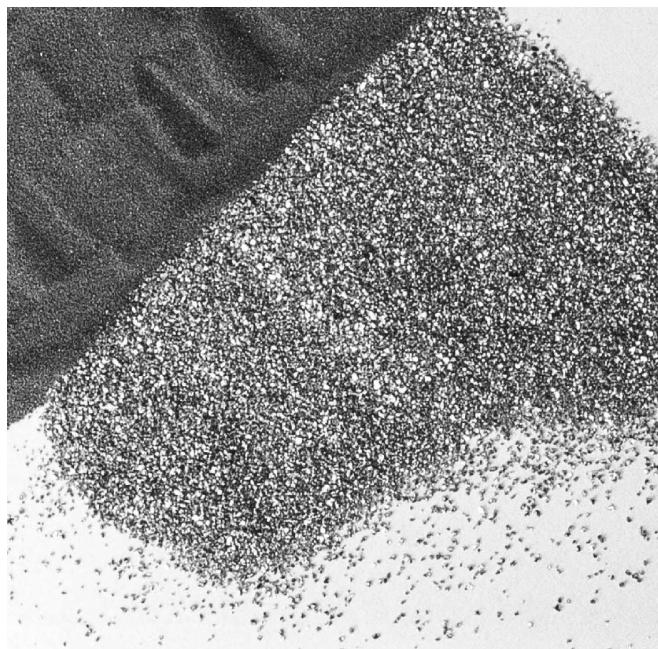
**Марки ПГ-Ю5-Н и ПГ-Ю10-Н** используются в качестве подслоя и для восстановления размеров изделий. Широко применяются для восстановления и упрочнения посадочных мест валов, деталей автотранспорта, судовых механизмов.

**Марка ПР-НХ17СР4** наносится в качестве упрочняющего покрытия на детали машин и оборудования горячих цехов металлургических заводов, нефтяных погружных и грунтовых насосов, газоперекачивающих установок, горнодобывающей, дорожной и с/х техники. Также используется для упрочнения шнеков экструдеров, используемых при производстве полимерных материалов.

Исследовательская лаборатория предприятия «ПОЛЕМА» активно разрабатывает материалы с уникальными рецептами в сотрудничестве с научно-исследовательскими организациями РАН. Среди последних разработок были представлены:

- Порошковый суперинварный сплав, отличающийся низким ТКЛР (температурный коэффициент линейного расширения). Ранее изделия из этого материала получали традиционным методом — литьем. Изделия из порошкового суперинварного сплава не меняют своих геометрических размеров в широком диапазоне температур. Материал адаптирован для производства новых деталей и узлов и широко применят в различных отраслях промышленности.

- Для изделий, используемых при экстремально низких температурах, был разработан порошковый аналог сплава ЭП 817. Полученный материал выдерживает температуры до -70°C с сохранением основных физико-механических свойств. Применим для



создания коррозионностойких покрытий, для технологического оборудования, например, для топливных баков, хранилищ нефтепродуктов, нагруженных деталей, работающих при низких температурах. Ведутся работы по определению оптимальных режимов для 3D-печати этим сплавом.

- Инновационный материал на основе кобальта марки КХ26Н9МЖВ — еще одна из новых разработок «ПОЛЕМА». Изделия и детали из сплава подходят для использования при высоких температурах (до 1100°C) и обладают хорошей устойчивостью к агрессивным средам и к абразивному износу. Размер частиц может быть любой, возможно использование как для изготовления деталей и изделий традиционным методом порошковой металлургии, так и для наплавки и напыления на поверхности.

- Сплавы высокой энтропии марки ПР-КХ23 Н26 — новейшая разработка «ПОЛЕМА». Эти материалы обладают уникальной коррозионной стойкостью и, что характерно, способны сохранять прочность и гибкость даже при сверхнизких температурах. Сплавы применимы для решения целого комплекса задач: наплавка и напыление, аддитивные технологии, спекание и т. д. Способны сохранять свой фазовый состав при термомеханической обработке. ■



АО «ПОЛЕМА»  
300016, г. Тула,  
ул. Пржевальского, д. 3  
+7 (4872) 25-06-70  
[sales@polema.net](mailto:sales@polema.net)  
[www.polema.net](http://www.polema.net)

# Применение цифровых двойников в аддитивных технологиях

Д.т.н., профессор Ю.Г. Кабалдин, к.т.н. Д.А. Шатагин, П.В. Колчин, М.С. Аносов, А.В. Киселев  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
e-mail: posledny@mail.ru; iugi.40@mail.ru, тел: +7-910-140-06-04

Сегодня благодаря поступательному развитию производственных технологий предприятия имеют у себя в распоряжении сложное высокотехнологичное оборудование, в частности 3D-принтеры. Данное оборудование может решить определенные специальные задачи, которые не под силу выполнить обычными инструментами, но при этом оно требует к себе более внимательного отношения на этапах организации производства и эксплуатации.

В связи с этим возникает задача оптимального выбора параметров печати на стадии подготовки управляющей программы, а также поддержание данных режимов в процессе формирования объекта. В НГТУ им. Р.Е. Алексеева на кафедре «Технология и оборудование машиностроения» на базе лаборатории «Нанотехнологии в машиностроении» данная задача решается с помощью применения метода цифрового двойника, в основе которого лежит система из искусственных нейронных сетей [1, 2]. Выбранный подход является одним из наиболее динамично развивающихся и больше всех соответствует концепции цифрового производства на предприятиях.

Разрабатываемый цифровой двойник представляет из себя связанную аппаратно-программную систему, которая представлена на рис. 1. Согласно схеме разработчик программы для 3D-принтера

использует данные о 3D-модели конечного изделия, и в CAM-системе нарезает ее на слои и отдельные единичные валики, которые преобразуются в траектории перемещения источника энергии или узлов 3D-принтера. Затем разработчик в CAM-системе обращается к модулю цифрового двойника, а именно к входящей в него искусственной нейронной сети (рис. 2), и обеспечивает ее информацией об изделии в виде следующих параметров: поле допуска на размеры, материал, механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, твердость и аналогичные параметры); информацией о сырье; предварительно полученной ин-

формацией в CAM-системе: координаты траекторий, высота слоя, ширина единичного валика и др. При этом система искусственных нейронных сетей способна назначать параметры, управляющие процессом 3D-печати в зависимости от применяемой технологии и оборудования аддитивного производства, а также моделировать сигнал, аналогичный тому, который фиксируется с датчиков, прошедший через аналогово-цифровые преобразователи. Это происходит на базе ранее полученного опыта, сформированного посредством обучения с использованием больших данных о процессе 3D-печати на данном и аналогичном оборудовании.

Рис. 1. Общая структура взаимодействия с цифровым двойником

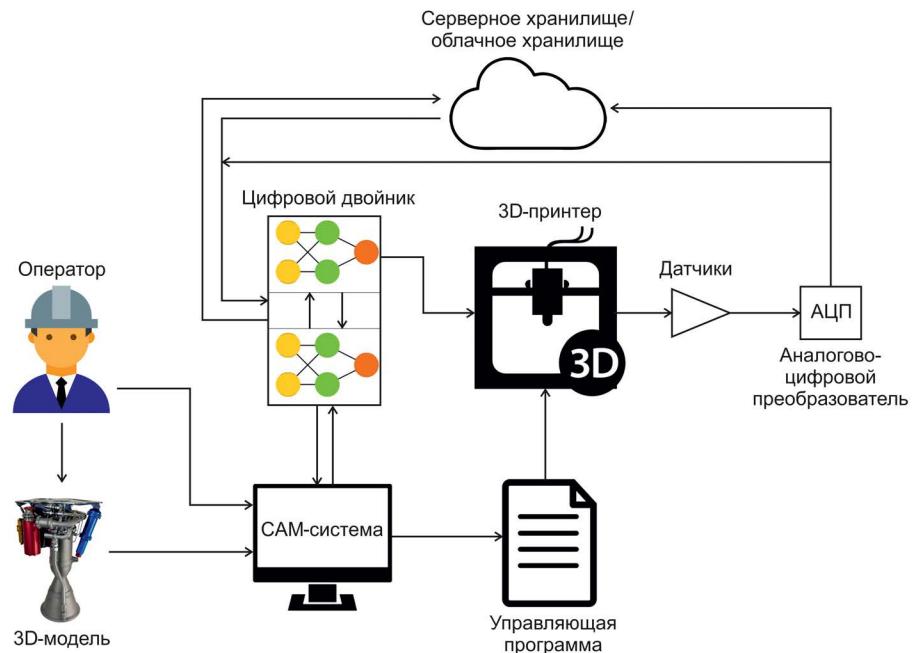
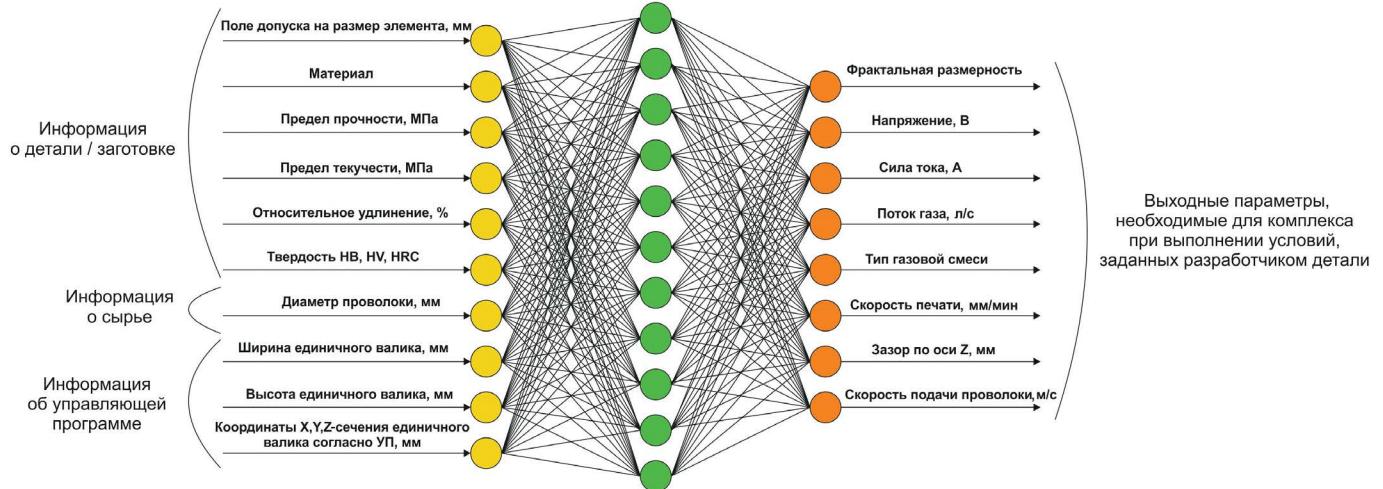


Рис. 2. Искусственная нейронная сеть цифрового двойника для подготовки управляющей программы на стадии разработки



В случае, если совокупность входных параметров искусственной нейронной сети не позволяет вычислить выходные параметры, система искусственных нейронных сетей дает обратную связь разработчику, содержащую информацию об ошибках, предложения по изменению входных параметров. При наступлении этапа, когда ошибки отсутствуют, с помощью программных средств САМ-системы параметры, назначенные цифровым двойником, включаются в текст управляющей программы для 3D-принтера.

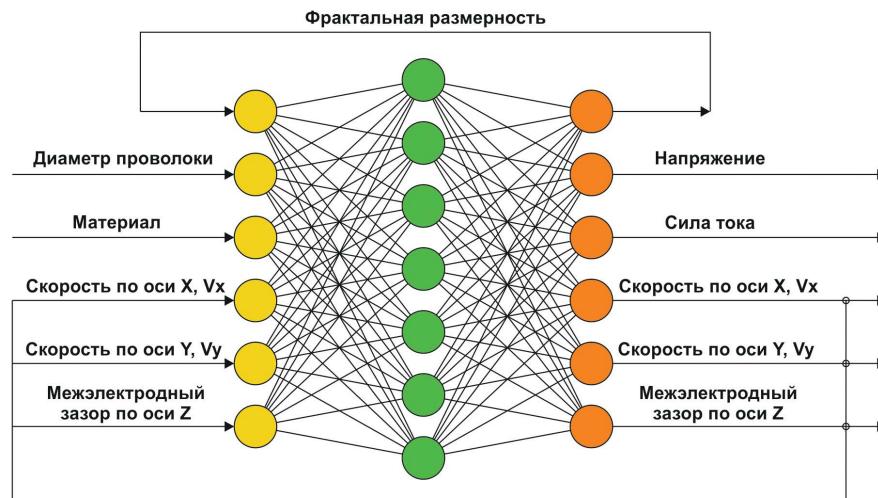
Далее сформированная управляющая программа передается в систему управления 3D-принтера, откуда поступают команды на исполнительные органы оборудования-

ния. С их помощью формируется изделие с заданными свойствами, при этом сам 3D-принтер оснащен системой датчиков, которые фиксируют состав и концентрацию газовой атмосферы, положение рабочих органов, а также вибрацию, температуру, акустическую эмиссию, время, фото, видео- и аудиосигналы от исполнительных органов процесса 3D-печати и формируемого объекта. Вся полученная с датчиков информация о текущем состоянии параметров проходит через аналогово-цифровые преобразователи и передается на вход искусственной нейронной сети (рис. 3), которая подключена к 3D-принтеру. Представленная на рисунке искусственная нейронная сеть также является частью

цифрового двойника. Она призвана анализировать данные с датчиков, информацию об изделии, данные о сырье, текущих параметрах 3D-печати, имеющиеся в управляющей программе, и способна формировать в виде команд решение о корректировке того или иного параметра в процессе производства объекта. Это необходимо для поддержания параметров, необходимых для обеспечения готового изделия теми характеристиками и свойствами, которые были заданы разработчиком на стадии проектирования. Все данные о параметрах 3D-печати, состояниях оборудования передаются посредством промышленного интернета вещей IoT в облачное хранилище или на собственные хранилища предприятия с целью дообучения цифрового двойника, а также обмена данными с аналогичными системами.

Таким образом, с помощью разрабатываемого цифрового двойника могут быть расширены возможности САМ-систем при подготовке управляющих программ и оборудования для 3D-печати изделий, реализованы процессы назначения рекомендуемых параметров 3D-печати и поддержания режимов 3D-печати на уровне, необходимом и достаточном для получения характеристик конечного изделия, заданных разработчиком.

Рис. 3. Искусственная нейронная сеть цифрового двойника для управления режимами 3D-принтера на стадии формирования объекта



Кроме предлагаемого цифрового двойника в данном направлении имеются разработки и других коллективов и предприятий. В частности, компания General Electric разработала своего цифрового двойника на основе искусственных нейронных сетей [3], который используется при управлении режимами 3D-печати в процессе селективного лазерного сплавления. Основные данные, которыми оперирует система, это фото и видео изображения температурного пятна, которые благодаря системам компьютерного зрения обрабатываются и используются для обучения. Также имеются разработки для технологии электродугового выращивания объектов по технологии WAAM. Здесь внедрением искусственных нейронных сетей занимается коллектив СПбПУ им. Петра Великого [4]. В основе предложенной системы лежит мониторинг режимов 3D-печати при помощи датчиков и использование данной информации при обучении нейронной сети.

При этом следует отметить, что представленные аналоги не могут быть применены при подготовке управляющей программы. Данный этап несет в себе высокий риск ошибки, которая может перейти на производственную площадку, и здесь также необходимо решение по оптимальному выбору режимов.

Предложенный НГТУ им. Р.Е. Алексеева цифровой двойник, состоящий из системы искусственных нейронных сетей, способен работать на обозначенном проблемном этапе. При этом система работает с характеристиками будущего объекта, что дает возможность через режимы в определенном диапазоне управлять механическими свойствами и геометрической точностью конечного изделия. А благодаря широкому набору фиксируемых параметров цифровой двойник обладает гибкостью и может быть применен на широком спектре технологий 3D-печати. ■

#### Литература

1. Кабалдин Ю. Г. Интеллектуальное управление гибридной технологией, включающей 3D-печать и механическую обработку на станках с ЧПУ в условиях цифровых производств [Текст] / Ю. Г. Кабалдин, П. В. Колчин, Д. А. Шатагин, А. В. Киселев // Автоматизация. Современные технологии. 2018. № 8. С. 79–85. (ВАК)
2. Кабалдин Ю. Г. Искусственный интеллект и кибер-физические механообрабатывающие системы в цифровом производстве: монография / Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Шатагин, М. С. Аносов, П. В. Колчин, А. М. Кузьмишина; под ред. Ю. Г. Кабалдина; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. – 271 с.
3. Laser Focus: Computer Vision and Machine Learning Are Speeding Up 3D Printing [Электронный ресурс] URL: <https://www.ge.com/reports/laser-focus-computer-vision-machine-learning-speeding-3d-printing/> (дата обращения: 17.02.2018)
4. Аддитивное электродуговое выращивание с использованием сварочной проволоки (Wire and arc additive manufacturing – WAAM) URL: [http://www.lwms.spbstu.ru/razrabotki/wire-and-arc-additive-manufacturing-\(waam\)/](http://www.lwms.spbstu.ru/razrabotki/wire-and-arc-additive-manufacturing-(waam)/) (дата обращения: 17.02.2018)



## 3D-РЕШЕНИЯ ДЛЯ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

**27-31 мая** Стенд iQB Technologies в ЦВК «Экспоцентр», павильон № 5.1

**29 мая в 11:00** конференция  
«Как 3D-технологии помогают оптимизировать производство»

Регистрируйтесь на сайте: [iqb-tech.ru](http://iqb-tech.ru)

В рамках выставки  
«Металлообработка-2019»  
в Москве

Скидка на 3D-оборудование  
промокод: AT\_IQB2019

# Оборудование для аддитивного производства

Ищете оборудование для аддитивного производства и литья порошков под давлением?

Микроструктурный анализ, измерение твердости, термообработка, измельчение и гомогенизация, а также анализ размеров и формы частиц – бренды Verder Scientific предлагают высококачественное оборудование, профессиональные консультации и поддержку пользователей по всему миру.

Пожалуйста, посетите наш веб-сайт [www.verder-scientific.ru](http://www.verder-scientific.ru) для получения более детальной информации.

**ООО “Вердер Сайнтифик” • Санкт-Петербург, ул. Бумажная, д. 17  
(812) 777-11-07 • [info@verder-scientific.ru](mailto:info@verder-scientific.ru)**



[www.atm-m.ru](http://www.atm-m.ru)

## Пробоподготовка для материалографии

**Оборудование для резки, запрессовки, полировки и травления образцов в рамках подготовки поверхности к микроскопическому анализу.**

Металлические детали требуют дальнейшего исследования, например, после процесса спекания. Большой выбор машин ATMA для резки, полирования и травления позволяет обеспечить идеальную подготовку поверхности, необходимую для надежного микроструктурного анализа.

Высокотехнологичный отрезной станок Brillant 240 делает процесс подготовки образца для исследования надёжным и воспроизводимым. А новый модульный пресс горячей запрессовки Opal X-Press идеален для получения образцов с низкой усадкой, высокой плотностью и превосходным удержанием края.



## Термообработка, спекание

**Печи и термошкафы для термообработки, удаления связующих и спекания в среде воздуха, инертных и реакционных газов, а также вакуума.**

Компания CARBOLITE GERO предлагает печи, специально разработанные для различных этапов термообработки металлических и керамических изделий, изготавливаемых с применением литья порошков под давлением и аддитивных технологий.

Области применения наших печей помимо прочего – высокотемпературное и каталитическое удаление связующих, сушка изделий после удаления связующих на основе растворителей, снятие внутренних напряжений, а также спекание в среде продувочного газа, водорода или вакуума.



[www.carbolite-gero.ru](http://www.carbolite-gero.ru)





[www.qness.ru](http://www.qness.ru)

## Измерение твёрдости

QNESS специализируется на разработке и производстве инновационных твердомеров и предлагает качественные клиентоориентированные решения.

Измерение твердости в порошковой металлургии требует совершенно других параметров и процедур по сравнению с классическими испытаниями на твердость.

Порошок должен быть запрессован в смолу при помощи горячего пресса, а затем материалографический образец должен быть отполирован, чтобы получить чистую поверхность для испытания на твердость. Для проверки качества порошковых материалов идеальным решением является мощный микротвердомер по Виккерсу QNESS Q10/30/60.



[www.retsch.ru](http://www.retsch.ru)

## Измельчение и рассев

**Мельницы для переработки сырья и промежуточных заготовок, просеивающие машины для отделения металлических порошков, остающихся после 3D-печати, для повторного использования.**

В металлургии важную роль играет возможность повторного использования сырьевых материалов. Компания RETSCH предлагает широкий спектр оборудования, предназначенного для рассева порошков и измельчения металлических компонентов, что позволяет в дальнейшем повторно использовать переработанный материал в производственном процессе.



[www.retsch-technology.ru](http://www.retsch-technology.ru)

## Анализ размеров и формы частиц

**RETSCH TECHNOLOGY производит инновационные оптические измерительные системы для характеристики частиц порошков, гранул и супензий.**

Такие свойства, как сыпучесть, сжимаемость, пористость или поведение во время спекания, которые влияют на пригодность металлического порошка для порошковых металлургических процессов, зависят от размера и формы частиц порошка.

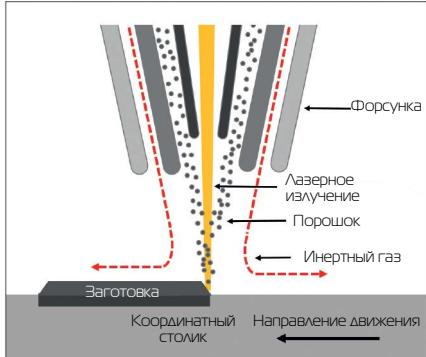
Система CAMSIZER X2 является мощным инструментом для динамического анализа изображений, охватывающим диапазон размеров от 0.8 мкм до 8 мм.



# Подготовка к материалографическому анализу образцов, изготовленных методом 3d-печати

Одним из множества используемых сегодня методов 3D-печати (или аддитивного производства) является лазерное плавление порошковой смеси, когда изделия изготавливаются из материала в порошковой форме, расплавляемого и спекаемого послойно при помощи лазера. Программируемые траектории движения лазерного луча позволяют создавать любые геометрические формы изделий. Энергия лазерного луча расплавляет металлический порошок, образуя подобие валика сварного шва. Пересекающиеся сварные швы, создаваемые при движении лазерного луча по заданным траекториям, образуют трехмерные контуры изделия. Метод лазерного плавления порошковой смеси объединяет в себе такие преимущества, как экономичность, качество и точность. Другое преимущество метода — масштабируемость процесса, позволяющая, с одной стороны, выпускать изделия в серийном масштабе, а с другой — создавать микроструктуры размером менее 100 мкм [1].

Рис. 1. Схема процесса аддитивного лазерного плавления



## Основные материалы, используемые в аддитивном производстве:

- Легкие сплавы
- Никелевые жаропрочные сплавы
- Сталь
- Интерметаллические соединения
- Материалы высокой твердости (карбиды).

## Подготовка образцов для материалографического анализа

Ниже описан процесс подготовки к материалографическому анализу образцов, изготовленных по технологиям аддитивного производства. В материалографии образец, репрезентативно отбираемый от изделия или материала, называется пробой.

## Стандартная процедура материалографического анализа включает следующие шаги:

- Разрезание изделия на образцы нужного размера, например, при помощи абразивного отрезного станка.
- Запрессовка образцов, облегчающая дальнейшую работу с образцом.

- Шлифование/полирование для лучшей визуализации микроструктуры поверхности.
- Собственно анализ.
- Изучение изображений.
- Определение твердости.

В данной статье в качестве примера приведен образец из стали (X6Cr17, класс 1.4016), изготовленный лазерным плавлением. Первый этап подготовки — отбор образца, репрезентативно отражающего свойства всего материала. Для этого материал разрезался с помощью высокоточного абразивного отрезного станка **Brillant 220** производства компании **АТМ** с отрезным диском из материала эльбор (толщина отрезного диска: 0,65 мм, диаметр отрезного диска: 153 мм). См. рис. 3.

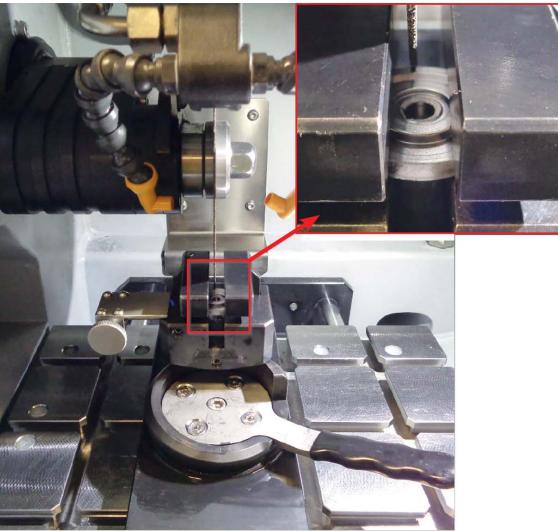
## Передовые технологии в материалографии

При разрезании образца использовался режим прямой импульсной резки (попеременные повороты отрезного диска на 0,2 мм вперед и на 0,2 мм назад) при скорости подачи 1 мм/с

Рис. 2. Отрезной станок Brillant 220



*Рис. 3. Отрезной станок Brillant 220. В увеличенном масштабе: закрепленная заготовка (зажимной инструмент — одинарные вертикальные тиски).*



и скорости вращения диска 4500 об/мин.

После разрезания выполнялась горячая запрессовка образца в специальную смолу (Epo black) при помощи пресса для горячей запрессовки **Opal X-Press** производства компании **АТМ**. Обращаться с запрессованным образцом при дальнейшей работе гораздо легче и удобнее. Запрессовка выполнялась при давлении 200 бар и температуре 180°C в течение 6 мин, цикл охлаждения также составлял 6 мин. Еще одно

*Рис. 4. Opal X-Press — пресс для горячей запрессовки*



*Рис. 5. Saphir 550 — автоматическая шлифовально-полировальная машина*



важное преимущество запрессовки образцов — возможность их плоскопараллельной установки (точность  $51 \pm 1$  мкм). Для измерения допусков измерялась высота образцов при помощи штангенциркуля. Затем выполнялось шлифование и полирование запрессованных образцов (с раздельным прижимом) при помощи полуавтоматической шлифовально-полировальной машины **Saphir 550** производства **АТМ**. Процесс шлифования состоял из двух этапов. Первый этап — плоское шлифование с использованием карбидкремниевой шлифовальной бумаги с размером зерна P240 для удаления всех неровностей, образовавшихся в

процессе резки. Второй этап — шлифование с использованием карбидкремниевой шлифовальной бумаги с размером зерна Р600 для подготовки поверхности к полированию, которое также выполнялось в несколько этапов: первый этап — предварительное полирование с использованием полировального сукна **Galaxy BETA** и поликристаллической алмазной суспензии с размером зерна 9 мкм, второй этап — полирование с использованием шелкового сукна средней жесткости (в каталоге АТМ: GAMMA) и поликристаллической алмазной суспензии с размером зерна 3 мкм. Наконец, последний этап — финальное полирование — выпол-

*Таблица 1. Параметры шлифования и полирования образца*

Этап	Шлифовальный носитель	Смазка/суспензия	Скорость вращения [об/мин]	Направление вращения держателя образцов	Усилие прижима [Н]	Время [мин]
Шлифование	Карбид кремния, Р240	Вода	150	По часовой стрелке	30	1:00
Шлифование	Карбид кремния, Р600	Вода	150	По часовой стрелке	30	1:00
Полирование	Beta	Спирт, поликристаллическая алмазная суспензия с размером зерна 9 мкм	150	Против часовой стрелки	35	4:30
Полирование	Gamma	Спирт, поликристаллическая алмазная суспензия с размером зерна 3 мкм	150	Против часовой стрелки	35	4:00
Полирование	Omega	Вода, Eposil M	100	По часовой стрелке	30	1:30

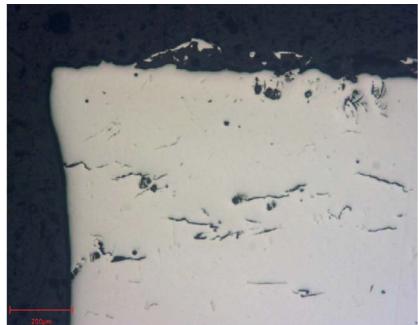
нялся с использованием мягкого синтетического сукна (в каталоге ATM: OMEGA) и суспензии Eposil M. Подробное описание см. в таблице 1.

Результатом данной процедуры становится идеально гладкая поверхность образца. На рис. 6 показано изображение поверхности образца, полученное с помощью оптического микроскопа (в падающем свете) с увеличением 100.

Поскольку свет равномерно отражается по всей поверхности образца, микроструктура материала очень плохо различима. Для того чтобы человеческий глаз смог различить подробную текстуру поверхности, контрастность фаз должна составлять минимум 10%. Для увеличения контрастности применялся метод травления. На примере ниже использовался травильный раствор V2A, позволяющий достигнуть высокой контрастности за счет избирательного воздействия на отдельные фазы стали X6Cr17. После травления, которое выполнялось в течение 45 с, была получена четко различимая микроструктура поверхности, показанная на рис. 7.

Микроструктура поверхности в центральной части образца также отличалась высокой контрастностью, и, таким образом, вся поверхность образца может считаться пригодной для

Рис. 6. Поверхность образца, подготовленного к анализу полированием. Тщательно отполированная поверхность отражает свет равномерно, поэтому микроструктура материала почти неразличима.



изучения его микроструктуры (см. рис. 8).

Для дальнейшего анализа, например определения твердости, ровная и гладкая поверхность образца также имеет большое значение, так как от этого зависит достоверность и информативность результатов. Как можно видеть по примерам выше, образец, прошедший пробоподготовку, идеально подходит для определения твердости. Твердомер Carat 930 производства компании ATM — это совершенный прибор, предназначенный не только для определения твердости, но и для микроскопического анализа.

На рис. 6 видно, что на отполированной поверхности образца имеется несколько трещин. Прямой край слева — результат шлифования. Контуры сварных шовов на данном изображении неразличимы, поэтому для увеличения контрастности использовалось травление.

Поверхность образца после травления показана на рис. 7. Видно, что на поверхности гораздо больше трещин, а цветные участки, прилегающие к трещинам, означают перетравленные области, образовавшиеся под действием остатков травильного раствора. На данном рисунке хорошо видна объемная структура сварных шовов. При создании каждого следующего слоя высокая темпе-

Рис. 7. Поверхность образца, подготовленного к анализу травильным раствором V2A Beize (в течение 45 с). Зона возле края образца. Микроструктура четко различима.

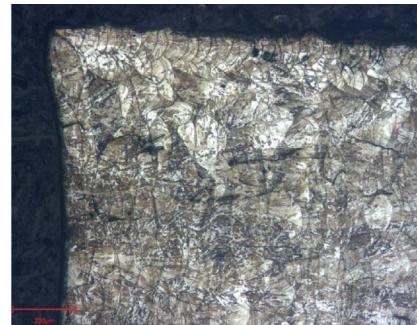


Рис. 8. Изображение образца высокой контрастности. Микроструктура сварного шва четко различима.



ратура неизбежно воздействует на нижерасположенный слой. Такие области, называемые зонами термического воздействия, могут изменить микроструктуру и свойства образца. Так, твердость материала и, соответственно, стойкость к механическим напряжениям могут снизиться. Поскольку слои, каждый из которых обладает собственной твердостью, последовательно создаются один на другом, механические напряжения постепенно растут и могут вызвать так называемое вторичное растрескивание. Причина первичного растрескивания — высокая скорость охлаждения материала. На рис. 8 показана микроструктура сварного шва с зоной термического воздействия. Вот почему для обеспечения качества необходим анализ твердости отдельных слоев материала. ■

#### Литература

- Институт материалов общества Фраунгофера. Аддитивное производство. 2016. [www.isam.network](http://www.isam.network)

**VERDER**  
scientific

ООО "Вердер Сайентифик"  
190020, Санкт-Петербург,  
ул. Бумажная, д. 17

Тел.: +7 (812) 777-11-07  
Факс: +7 (812) 325-60-73  
E-mail: [info@verder-scientific.ru](mailto:info@verder-scientific.ru)  
[www.verder-scientific.ru](http://www.verder-scientific.ru)

Компания **SIU System** (АО “НПО СИСТЕМ”) основана в 2008 году и сегодня является ведущим интегратором 3D-решений в России и странах СНГ.

**SIU System** — это комплексное внедрение 3D-технологий в государственные и частные корпорации в ключевых отраслях промышленности (поставка и обслуживание 3D-оборудования, обучение, консалтинг, создание центров аддитивных технологий).

- Элитный партнёр 3D SYSTEMS (Франция / Бельгия / Израиль / США) — единственный поставщик всех видов 3D-решений и сертифицированного сервиса в России и СНГ.
- Эксклюзивный дистрибутор 3DCeram (Франция) и VoxelJet (Германия).
- Дистрибутор и партнёр по локализации InssTek (Ю. Корея) в России.
- Ведущий дистрибутор Zortrax (Польша).

Центр инноваций SIU System — одна из крупнейших в России площадок 3D-печати и центр компетенций в аддитивных технологиях:

- Полный цикл услуг: 3D-моделирование, сканирование, реверс-инжиниринг, топологическая оптимизация, 3D-печать, а также выход на малую и среднюю серию.
- Более 10 профессиональных и промышленных принтеров для реализации обычной и крупногабаритной 3D-печати из фотополимеров, пластиков, воска, гипса и металлов.
- Собственная лаборатория мелкосерийного литья.
- Профессиональная команда сертифицированных инженеров, технологов, дизайнеров и специалистов постобработки.
- Развитая партнёрская сеть по всей России и за рубежом.
- Проведение исследований, НИОКР, разработка материалов.



3D-принтер  
ProX DMP Flex 350



3D-принтер  
ProX 800



3D-принтер  
ProJet MJP 2500 W/IC



3D-принтер  
FIGURE 4 STANDALONE



## УСПЕШНО РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРОЕКТЫ:

# Изготовление деталей РКТ из отечественного порошка нержавеющей стали

А.В. Дранков, Г.В. Калугин, И.Д. Махин, С.Ю. Шачнев

## Введение

Несмотря на неоспоримые достоинства и динамичное развитие аддитивных технологий в области машиностроения, отечественный опыт их применения в сфере реального промышленного производства остается крайне небольшим. Выполняются опытные и исследовательские работы, научные изыскания и эксперименты, однако практика выпуска штатных деталей остается единичной. С точки зрения потребителя эффективность применения технологии вызывает сомнение в первую очередь в связи с высокой стоимостью оборудования, сырья и низкой производительностью. Стоимость напечатанных изделий зачастую превышает изготовленных традиционным способом.

Вместе с тем в таких отраслях, как ракето- и авиастроение, расширение области внедрения трехмерной печати сдерживает отсутствие сертифицированных материалов. Рынок в основном предлагает порошки зарубежных сплавов, таких как кобальт-хром, инконели, силумины, нержавеющие стали. Использовать их при разработке новой ракетной техники без внесения в отраслевые регламенты, а тем более применять в ранее разработанных серийных изделиях, имеющих утвержденную документацию, невозможно. Опыт ЗАО «ЗЭМ» РКК «Энергии» показывает, что для выпуска изделий РКТ востребованы металлопорошковые композиции

на основе сплавов алюминий-магний, жаропрочных и нержавеющих сталей, титановых и никелевых сплавов отечественных марок.

Кроме соответствия химическому составу необходимо соблюдение требований к прочностным свойствам, сварным соединениям, качеству механически обработанной и необработанной поверхности, внутренней структуре. Ввиду этого наряду с изучением непосредственно процесса сплавления существенное значение имеет освоение операций постобработки синтезированных деталей, таких как термообработка, сварка, механическая обработка, изостатическое прессование и методы контроля.

## Изготовление образцов

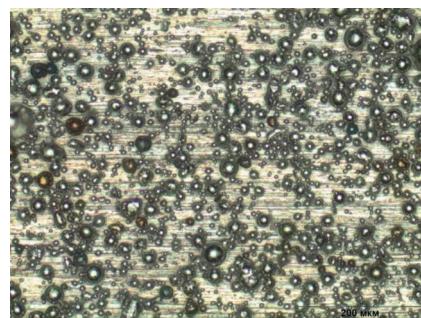
«Заводом экспериментального машиностроения» ракетно-космической корпорации «Энергия» проведена опытная работа по определению перспектив применения технологии селективного лазерного спекания (СЛС) при производстве деталей ракетно-космической техники на

примере выращивания детали «Корпус пиропатрона». В исследовании сделана оценка соответствия спеченных образцов действующим отраслевым нормативным документам в области материалов.

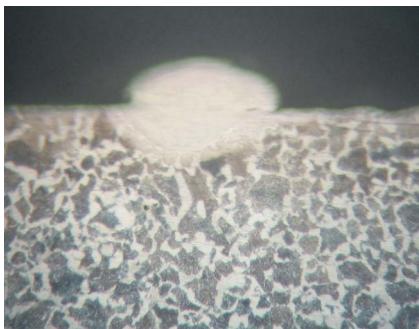
Для производства образцов использовался отечественный порошок стали мартенситного класса ПР 09Х16Н4Б (рис. 1), произведенный компанией АО «Полема» (г. Тула). Входной контроль показал, что химический и гранулометрический состав порошка удовлетворяет рекомендуемым требованиям к исходным материалам технологии СЛС, а также соответствует сертификату компании-производителя.

Изготовление образцов по технологии СЛС производилось на ЗАО «ЗЭМ» на оборудовании EOS M 270 (EOS GmbH, Германия) в защитной среде азота. В связи с тем, что производитель оборудования не имеет рекомендованных программ (режимов) спекания для отечественной стали 09Х16Н4Б, на первом этапе необходимо было решить задачу выбора технологических пара-

Рис. 1. Частицы порошка сплава 09Х16Н4Б



*Рис. 2. Структура трека, изготовленного по выбранному режиму ( $x 200$ ): скорость луча — 468 мм/с; высота слоя — 0,02 мм; мощность лазера — 200 Вт*

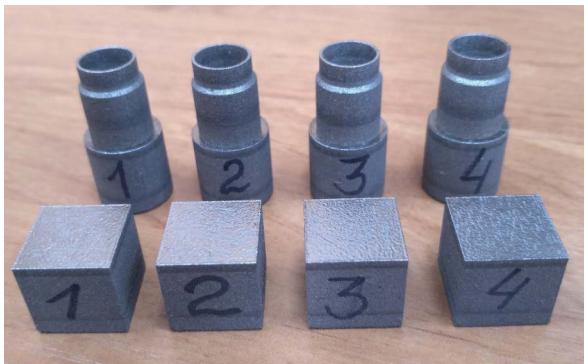


метров построения. С этой целью изготовлены единичные треки с варьируемыми значениями скорости сканирования и шириной луча. После металлографического исследования сечения каждого трека, основываясь на соотношении объема наплавленного металла к проплавленному в подложку, отобран оптимальный режим, его параметры указаны на рис. 2. На базе выбранных параметров и стандартного режима для порошка Stainless Steel PH1 были изготовлены два вида образцов: кубической формы и в форме детали «корпус пиропатрона» (рис. 3).

#### Термообработка, металлографическое и томографическое исследование

Было выполнено томографическое исследование каждого спеченного образца на оборудовании XT H 225/320 LC ф. NIKON

*Рис. 3. Образцы, изготовленные СЛС*



METROLOGY с разрешающей способностью 0,05 мм. Во всех образцах, за исключением одного, построенного по выбранным ранее параметрам, обнаружены единичные поры размером до 0,40 мм и цепочки пор протяженностью 0,05...0,10 мм (рис. 4).

На нескольких образцах была проведена термическая обработка в соответствии с рекомендованными режимами на категорию прочности 120 А ОСТ 92-1311-77 «Детали из стали и сплавов. Технические условия и термическая обработка», включающая закалку в вакуумной печи с охлаждением в среде азота, обработку холодом и низкий отпуск.

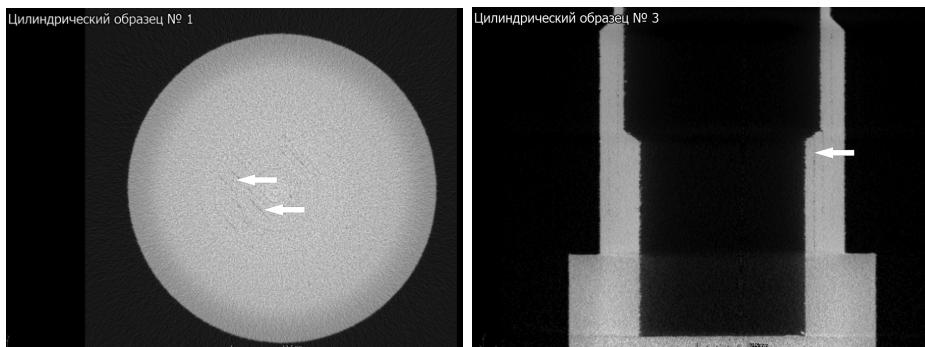
Металлографический анализ образцов в термообработанном и исходном состоянии показал наличие неметаллических включений типа оксидов точечного и строчечного вида, соответствующих 2 баллу шкалы ГОСТ 1778-70 «Металлографические методы определения неметаллических

включений». Аналогичные включения для деформированного полуфабриката стали 09Х16Н4Б являются допустимым показателем по ТУ 14-1-463-72 «Прутки из коррозионной стали марки 09Х16Н4Б. Технические условия» (не более 2 баллов для точечных и 2,5 баллов для строчечных включений).

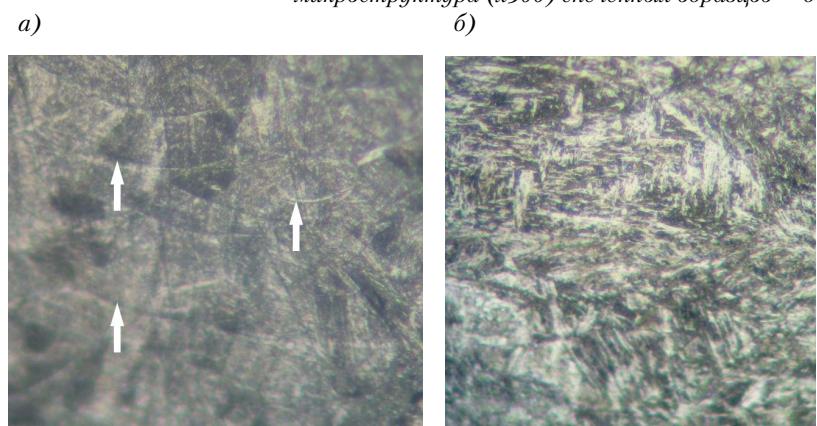
Образцы имеют характерную для синтезированного металла ячеистую структуру с участками, где зерна ориентированы в одном направлении. Микроструктура всех исследованных образцов состоит из мартенсита с остаточным аустенитом (рис. 5). Ориентированность зерен и характерная закаленная структура наблюдается как до, так и после термической обработки. Не выявлено значительных различий по форме и размерам ячеек в образцах, изготовленных по двум выбранным ранее режимам спекания.

В срезе всех исследованных образцов обнаружены множест-

*Рис. 4. Цепочки пор, выявленные при томографическом исследовании*



*Рис. 5. Ячеистая структура ( $x 100$ ) — а, микроструктура ( $x 500$ ) спеченных образцов — б*



венные дефекты, которые можно классифицировать как микротрещины и микропоры размером 10...20 мкм, на отдельных образцах выявлены единичные дефекты площадью до 100×200 мкм. Наличие нарушений структуры отрицательно сказывается на механических характеристиках изделий. Исходя из того, что дефекты, как правило, расположены по границам ячеек, можно заключить, что образование пор связано с неравномерным формированием отдельных треков и сплавлением слоев между собой. В последующем выбор оптимальных параметров спекания является основным направлением работ для снижения количества подобных дефектов. Кроме этого, для устранения пор необходимо исследовать возможность применения горячего изостатического прессования спеченных изделий.

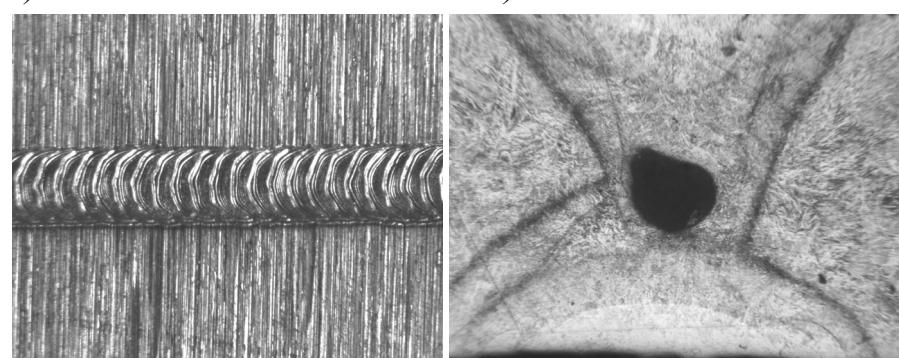
Твердость образцов определялась прибором Роквелла и составила 45,1...47,3 HRC для образцов без термической обработки и 39,0...46,0 HRC для образцов, прошедших термическую обработку, что в обоих случаях не соответствует действующим требованиям ОСТ 92-1311-77 «Детали из стали и сплавов. Технические условия и термическая обработка» (37,5...44,5 HRC). Значения твердости, а также характерное наличие мартенситной структуры синтезированных образцов объясняется структурно-фазовыми превращениями, происходящими в процессе охлаждения спеченного материала.

### Сварка

Было выполнено сварное соединение пластин, изготовленных из ранее спеченных образцов, с использованием автоматической аргонодуговой (АДС), электронно-лучевой (ЭЛС) и импульсной лазерной сварки (ИЛС).

Подготовка поверхностей деталей под сварку производилась

Рис. 6. Внешний вид полученного лазерной сваркой шва (x28) – а, макроструктура шва с порой (x100) – б



в соответствии с требованиями ОСТ 92-1152-2014 «Подготовка деталей под сварку», а именно было проведено обезжикивание свариваемых кромок бензином. Сборка пластин между собой осуществлялась встык с максимально допустимым зазором 0,1 мм.

Для выполнения лазерной сварки толщину пластин уменьшили до 0,9 мм в силу того, что мощностные характеристики оборудования позволяют выполнить гарантированный проплав деталей толщиной не более 0,5 мм. При этом сварку выполняли с двух сторон – лицевой и обратной – для обеспечения полного проплава, в соответствии с требованиями ОСТ 92-1741-90 «Сварка и сваркопайка лазерная импульсная. Типовой технологический процесс».

Автоматическая аргонодуговая и электронно-лучевая сварка образцов была выполнена с использованием технологических заходных и выходных пластин из сплава 12Х18 Н10 Т для плавного

начала и окончания сварки. Сварка выполнялась в соответствии с требованиями ОСТ 92-1186-81 «Сварка дуговая деталей из металлов и сплавов в защитной среде инертных газов. Технические требования» и ОСТ 92-1151-81 «Сварка электронно-лучевая деталей из металлов и сплавов. Технические требования».

Сварные соединения спеченных образцов, выполненные аргонодуговой, электронно-лучевой и лазерной сваркой, прошли рентгеноконтроль на соответствие требованиям ОСТ 92-1114-80 «Соединения сварные. Общие технические требования», томографическое и металлографическое исследования.

В сварном шве, выполненному лазерной сваркой (рис. 6), выявлены внутренние дефекты в виде скопления пор диаметром до 0,21 мм по всей длине шва, трещина протяженностью 0,11 мм, множественные несплошности и структурные неоднородности.

Рис. 7. Детали «корпус пиропатрона», полученные методом СЛС (слева) и из прутка (справа)



В сварном шве электронно-лучевой сварки имеется вогнутость корня шва. Шов, полученный аргонно-дуговой сваркой, соответствует требованиям нормативов. В обоих случаях в микроструктуре имеются поры и рыхлоты размером до 0,04 мм, микротрешины протяженностью до 0,07 мм, а также структурная неоднородность.

#### Механическая обработка

Была проведена токарная и фрезерная обработка синтезированных образцов с использованием оборудования, инструмента и режимов резания согласно действующему технологическому процессу на деталь (рис. 7). Шероховатость токарных поверхностей составила  $Rz5 \div Rz2.5$ , фрезерованных —  $Rz20$ , что соответствует требованиям чертежа на деталь. Спеченный материал показал хорошую обрабатываемость как токарным, так и фрезерным способом.

#### Заключение

По результатам проведенных исследований сделаны следующие заключения:

- Металлический порошок ПР 09Х16Н4Б, изготовленный предприятием АО «Полема», соответствует заявленному химическому и морфометрическому составу и соответствует требованиям к порошкам для технологии СЛС.

- В процессе СЛС из порошковых материалов формируется изделие с однородной ячеистой структурой. Однако качество структуры и отсутствие в ней дефектов связано с выбором оптимальных параметров процесса спекания (мощностью лазерного излучения и скоростью сканирования) для каждого конкретного порошкового материала.

- Режимы термической обработки, рекомендованные действующей НТД для деформированных полуфабрикатов, не изменили структурно-фазовый состав спеченных образцов и, как следствие,

показатели твердости. Фактически после лазерного спекания материал имеет закаленную структуру. Возможности термической обработки синтезированных деталей требуют дополнительного исследования.

- Сварные швы образцов, выполненные электронно-лучевой и аргонно-дуговой сваркой, имеют удовлетворительное качество, соответствующее требованиям ОСТ 92-1114-80 «Соединения сварные. Общие технические требования», швы, полученные лазерной сваркой, имеют неудовлетворительное качество со множеством внутренних дефектов. Тем не менее для более убедительной оценки соединений необходимо исследование прочностных характеристик.

- Синтезированные детали из порошка 09Х16Н4Б хорошо поддаются механической обработке, позволяющей получить требуемую конструкторской документацией поверхность. ■



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ  
САЛОН ПРОСТРАНСТВА 1520

**PRO//Движение.ЭКСПО**

**28-31 АГУСТА**  
**2019, МОСКВА**  
**ЩЕРБИНКА**

РЕКЛАМА 12+

**БОЛЕЕ 20000 КВ.М.  
ВЫСТАВОЧНЫХ ПЛОЩАДЕЙ**

**УНИКАЛЬНАЯ  
ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭКСПОЗИЦИЯ –  
ОТ ПЕРВОГО ПАРОВОЗА  
ДО НОВЕЙШИХ РАЗРАБОТОК  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ**

**БОЛЕЕ 100 НАТУРНЫХ ОБРАЗЦОВ  
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

**ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР**  
  
ОАО «РЖД»

**ОРГАНИЗАТОР**  
  
издательский дом

**k.kurochkin@gudok.ru**  
+7 (495) 983-0818, доб.70-845  
<http://railwayexpo.ru>

\* ПРО//Движение

Н А Н О В О Й В Ы С О Т Е

Организаторы



ЖУКОВСКИЙ • 27 АВГУСТА - 1 СЕНТЯБРЯ



С 2015 ГОДА ВЫСТАВКИ «НЕВА»  
ПРОВОДЯТСЯ ПО РАСПОРЯЖЕНИЮ  
ПРАВИТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
№ 1910-Р ОТ 21 ОКТЯБРЯ 2013 ГОДА

ВЫСТАВКИ «НЕВА»  
ОСНОВАНЫ В 1990 ГОДУ  
ПО РЕШЕНИЮ МИНМОРФЛОТА  
И МИНСУДПРОМА СОЮЗА ССР



# НЕВА 2019

РОССИЯ, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, 17–20 СЕНТЯБРЯ



15-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО СУДОСТРОЕНИЮ, СУДОХОДСТВУ, ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
ПОРТОВ И ОСВОЕНИЮ ОКЕАНА И ШЕЛЬФА

КОНГРЕССНО-ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР ЭКСПОФОРУМ,  
ПАВИЛЬОНЫ F, G • ПЕТЕРБУРГСКОЕ ШОССЕ, 64/1



(812) 321-26-76, (812) 321-28-17

WWW.NEVAINTER.COM • INFO@NEVAINTER.COM

# Применение лазерной стереолитографии в медицине

[*А.В. Евсеев*, *Е.В. Ипполитов*, *М.М. Новиков*, *С.В. Черебыло*]

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»

## Введение

Современная лазерная стереолитография [1–2] является одним из быстро развивающихся направлений аддитивного производства, оперативного изготовления прототипов, макетов, функциональных объектов по их трехмерным компьютерным моделям методом послойного наращивания материала. В настоящее время эта технология позволяет решать задачи оперативного изготовления пластиковых моделей с габаритами в несколько метров и точностью 0,1 мм.

В ИПЛИТ РАН лазерная стереолитография для медицины была впервые применена в 1994 г. в рамках проведения судебно-медицинской экспертизы по идентификации найденных под Екатеринбургом останков царской семьи, которая проводилась Центром судебно-медицинской экспертизы Минздрава РФ. Впервые в России по данным компьютерного томографа методом лазерной стереолитографии была изготовлена пластиковая копия человеческого черепа с точностью, пригодной для проведения судебно-медицинской экспертизы [3].

Дальнейшее активное использование лазерной стереолитографии для медицинских приложений было стимулировано широким внедрением в клиническую практику компьютерной томографии для диагностики и получения

информации о посттравматических дефектах, состоянии имплантатов, трансплантов и эндопротезов, следов оперативного вмешательства и т.п. Современная компьютерная томография позволяет быстро создавать высокоточные трехмерные компьютерные образы различных структур и органов человека, а стереолитография дает возможность изготавливать вещественные копии этих виртуальных моделей — пластиковые биомодели.

Широкое внедрение нового поколения спиральных компьютерных томографов значительно расширило возможности использования этой прогрессивной технологии в реконструктивной нейрохирургии. Спиральный компьютерный томограф позволяет провести сканирование всего черепа всего за несколько минут. Для восстановления сложной геометрии костных дефектов черепа с высокой точностью требуется сканирование с толщиной среза не более 0,5 мм. Программное обеспечение, реализованное на быстродействующих компьютерных системах, позволяет оперативно производить обработку полученных данных и создавать трехмерные модели любого дефекта и деформации черепа, проводить моделирование имплантатов, максимально соответствующих области повреждения, до проведения реконструктивных операций. А современные методы аддитив-

ного производства трехмерных объектов, в частности лазерная стереолитография позволяют изготавливать пластиковые копии любых фрагментов костного скелета человека. Изготовление медицинских имплантатов является ярким примером единичного производства, так как каждый имплантат делается для конкретного пациента.

Ежегодно в мире проводятся тысячи восстановительных операций с замещением костной ткани имплантатами и эндопротезами. Главное требование, предъявляемое к любому имплантату, — надежность, которая, в первую очередь обусловлена возможностью остеointеграции, т.е. прочного врастания имплантата в кость без воспалительных реакций, приводящих к его отторжению. Имплантат должен быть изготовлен из биосовместимого материала, обладать достаточной прочностью и иметь большую площадь поверхности, контактирующей с костью, поэтому очень важно обеспечить максимально точное соответствие имплантата дефекту в области повреждения [5]. Пластиковые биомодели все активнее используются при подготовке и планировании оперативного вмешательства в черепно-челюстно-лицевой хирургии, хирургии шеи и позвоночника, торакальной хирургии, ортопедии и нейрохирургии, а также для быстрого изготовления имплантатов из биосовместимых ма-

териалов и их предоперационной подгонки. Эффект от предварительного планирования операций с использованием пластиковых биомоделей проявляется, во-первых, в уменьшении продолжительности операции [8], что особенно существенно для маленьких пациентов, допустимое время пребывания которых под общим наркозом жестко лимитировано; во-вторых, улучшаются качественные показатели, что приводит к уменьшению реабилитационного периода; в-третьих, снижается стоимость операции.

В данной работе обобщен опыт использования современных методов лучевой диагностики в сочетании с компьютерными и телекоммуникационными технологиями при планировании реконструктивно-восстановительных операций в нейрохирургической и челюстно-лицевой практике. Разработанный метод позволяет не только получать достаточно объективную информацию о патологии в области повреждения (даже в случаях очень сложных дефектов), но создавать прецизионные имплантаты для ее устранения. Создан унифицированный подход для проведения таких операций:

1. получение и обработка данных компьютерной томографии,
2. создание компьютерной модели,
3. компьютерное моделирование,
4. изготовление методом лазерной стереолитографии пластиковых моделей поврежденных фрагментов черепа и пресс-форм для формовки имплантатов из биосовместимых материалов.

#### Получение и обработка томографических данных

Качество изображения, получаемого в компьютерной томографии, определяется пятью основными факторами: простран-

ственным разрешением, контрастностью, шумом и пространственной однородностью, линейностью и наличием артефактов.

Пространственное разрешение используется для выражения степени пятнистости изображения и характеризует способность видеть объект определенной плотности в области, содержащей вещества с различной плотностью. Оно зависит от системы коллимации, размера детектора, выбранного размера пикселя, размера фокального пятна трубы.

Контрастное разрешение изображения — способность сканера показывать малые изменения контрастности тканей больших объектов, ограничено шумом, имеющим гранулированное проявление.

Шум и пространственная однородность — это различные КТ-числа для ткани с одинаковой плотностью. Они в основном связаны с эффектами прохождения фотонов через ткань. В зависимости от источника возникновения шум разделяют на квантовый (результат ограничения фотонов, достигающих датчиков), электронный (вызванный электрическим взаимодействием в самой системе), вычислительный (приближения, используемые в процессе измерения) и лучевой (вызванный рассеиванием излучения).

Артефактами изображений в компьютерной томографии называют любое несоответствие между КТ-числами реконструированного изображения и истинными коэффициентами ослабления объекта. Технология реконструкции изображения такова, что измерения на всех детекторах суммируются, поэтому на изображениях проявляются любые ошибки измерений. Ошибки реконструкции могут быть вызваны как недостатком данных, так и наличием различных шумов. Артефакты могут проявляться в виде полос (ошибка в отдельном измерении), затемнений (посте-

пенное отклонение группы каналов), колец (ошибки калибровки отдельного детектора), искажений (спиральная реконструкция). Довольно часто в исследуемой области присутствуют объекты с высокой плотностью, например, сделанные из металла, что вызывает на изображении появление артефактов в виде полос. Это вызвано тем, что плотность металла выходит за предел нормального диапазона значений, который томограф может отобразить, давая неполные профили ослабления.

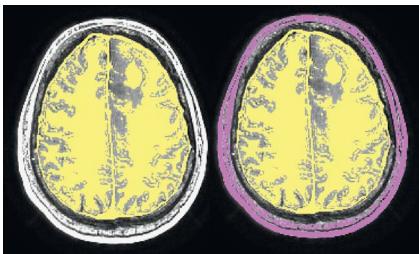
Движение пациента также дает артефакты в виде полос или размывания изображения. Это вызвано тем, что при реконструкции изображения обычно полагаются на способность компьютера размещать значения коэффициентов ослабления в матрице пикселей, имеющей строки и столбцы. Если при сканировании происходит движение, компьютер не может поместить измеренное значение в правильную пространственную ячейку, что и приводит к искажению изображения.

Все отмеченные проблемы, связанные с получением высоконформативных данных в компьютерной томографии, требуют применения специальных программ для обработки полутонаовых изображений перед преобразованием их в компьютерные модели, соответствующих реальным биологическим объектам. Для этого используются различные методы и приемы обработки.

Так, для выделения определенных областей используется масочная технология. Различные виды биологических тканей выделяются наложением маски заданного цвета с использованием разных пороговых значений плотности отсечки (рис. 1).

Процедура пиксельного вычитания выделенных областей позволяла сформировать на выходе объект, содержащий ткани только определенного типа. Та-

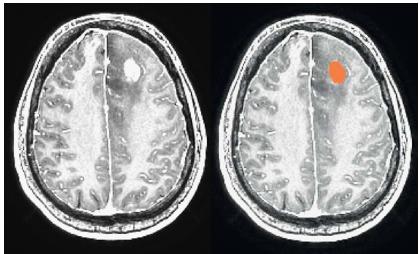
*Рис. 1. Выделение биологических тканей разной плотности с помощью масок: розовый цвет – костные структуры, желтый цвет – мозговые клетки*



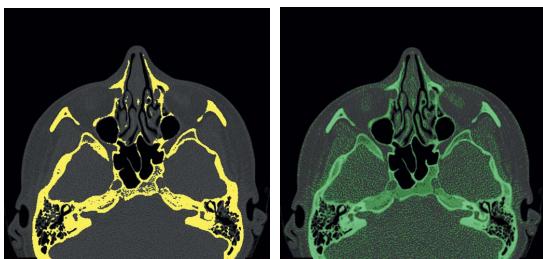
ким образом, на стадии обработки графических данных проводилось разделение объектов по их биологической принадлежности. Это значительно облегчало и ускоряло дальнейшую работу с трехмерными моделями.

Такой метод выделения хорошо работает, только если биологические ткани имеют большое различие в плотности и хорошо разделяются по пороговым значениям отсечки. В случае опухоли мозга объекты имеют практически одинаковые значения плотности и выделение возможно только в ручном режиме. В этом случае объект интереса на томограммах

*Рис. 2. Выделение биологических тканей одинаковой плотности с помощью рисования*



*Рис. 3. Применение функции выделения связанных областей для удаления шума на томограммах*



дополнительно закрашивается специальным маркером на всех срезах изображения (рис. 2).

Такой подход требует кропотливой работы и значительного времени, так как даже небольшие объекты требуют ручной обработки десятков изображений томограмм.

Для устранения шума на томографических изображениях применяется функция выделения связанных областей (рис. 3).

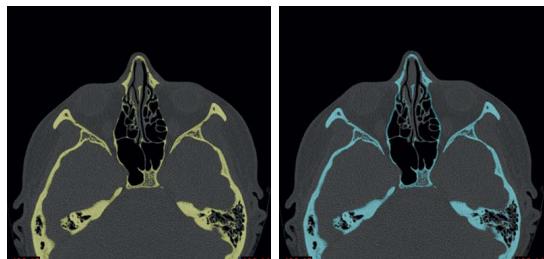
Например, для устранения артефактов, вызванных присутствием во рту пациента объектов, сделанных из металла (рис. 4), необходимо редактировать каждый срез отдельно, удаляя только ненужные полосы – блики.

Еще одним критерием качества изображения является контрастное разрешение изображения – способность сканера показывать малые изменения контрастности тканей больших объектов. Для данного набора томограмм этот параметр важен при построении тонких костных и хрящевых стенок. На рисунке показаны модели, построенные по исходным дан-

*Рис. 4. Ручное удаление артефактов, вызванных наличием металла*



*Рис. 5. Пример редактирования томограмм для восстановления тонких костных и хрящевых стенок и компьютерные модели, полученные в результате*



ным (слева) и по прорисованным срезам с последующим сглаживанием (справа) (рис. 5).

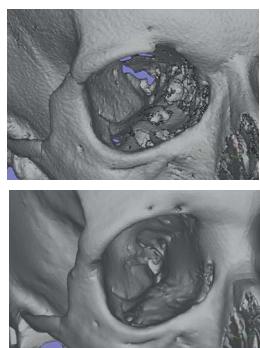
Разработанные методы обработки томографических данных позволяют построить на их основе компьютерные трехмерные модели высокой степени точности для использования в восстановительной хирургии и планировании особо сложных операций в нейрохирургии.

#### *Преобразование графических данных томографических обследований в трехмерные компьютерные модели*

Следующим шагом на пути использования метода лазерной стереолитографии в медицинских приложениях является преобразование обработанных результатов обследования пациентов на рентгеновских, магнито-резонансных или ультразвуковых компьютерных томографах в трехмерную компьютерную модель.

Результаты КТ данных в формате DICOM [4] по электронной сети пересылаются в ИПЛИТ РАН. Полученные томограммы обрабатываются и с помощью пакета 3Dview, разработанного в ИПЛИТ РАН, преобразовываются в трехмерную компьютерную модель в STL-формате, которая используется на установках лазерной стереолитографии.

Опыт изготовления моделей по томографическим данным [3] показал, что объект исследования



(например, череп человека) — достаточно сложное образование с большим количеством внутренних полостей, состоящее из биологических тканей разной плотности. В то же время с помощью лазерной стереолитографии пока возможно воспроизводить объекты только одной плотности, поэтому очень важно выбрать пороговое значение плотности отсечки (определенное значение яркости на томограмме), которое определяет, что все участки данной плотности и выше становятся твердым телом, а участки пониженной плотности отсекаются. Томограммы содержат большой объем информации (типичный результат томографического исследования — 100–500 томограмм), стратификация которой позволяет по результату одного исследования пациента построить несколько разных компьютерных моделей, например, черепа или головы с кожным покровом в целом (рис. 6).

Томограммы, полученные на рентгеновском томографе, обычно представляют собой набор серых изображений массивов сечений (слоев) исследуемого объекта по координате  $z$ . Каждый элемент томограммы есть функция плотности объекта в соответствующей точке  $q(x, y, z)$ . В большинстве случаев диапазон от  $q_{\min}$  до  $q_{\max}$  в области значений функции  $q(x, y, z)$  может быть представлен одним байтом. Таким образом, томограмму можно рассматривать как трехмерное изображение

функции плотности, приведенной к однобайтовым значениям и записанной трехмерной матрицей яркости  $Q(i, j, k)$ .

Для перевода томограммы в STL-формат необходимо построить математическую модель объекта как твердого тела. В общем виде такая модель может быть представлена как:

$$f(x, y, z) = \begin{cases} 0, & \text{если не имеется никакого объекта в данной точке} \\ 1, & \text{если имеется объект в данной точке} \end{cases} \quad (1)$$

В случае, если координаты  $x, y, z$  определены на дискретной сетке:

$$\begin{aligned} x_i &= d_x * i, i = 0, 1, \dots, N_x \\ y_j &= d_y * j, j = 0, 1, \dots, N_y \\ z_k &= d_z * k, k = 0, 1, \dots, N_z, \end{aligned} \quad (2)$$

функция  $F(x_i, y_j, z_k)$  имеет вид трехмерного с двумя градациями (0 или 1 — бит на пиксель) изображения. Таким образом, если представить пиксель изображения как куб с размерами  $d_x * d_y * d_z$ , преобразование томографических данных к STL-формату может быть выполнено преобразованием  $Q(i, j, k)$  к  $F(x_i, y_j, z_k)$ . При этом каждая внешняя сторона куба описывается двумя треугольниками.

Для корректности преобразования необходимо правильно определить границу реального объекта в томограмме. В простейшем случае соотношение (1) принимает вид

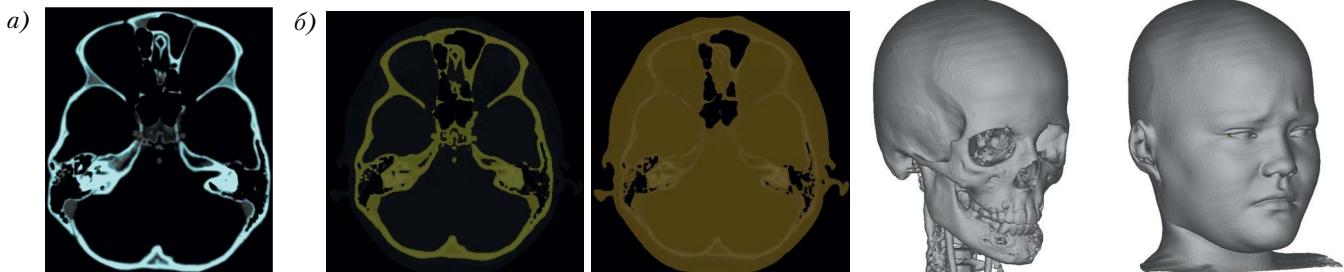
$$F(x_i, y_j, z_k) = \begin{cases} 0, & \text{если } Q(i, j, k) < Q_{\text{пороговая}} \\ 1, & \text{если } Q(i, j, k) > Q_{\text{пороговая}} \end{cases} \quad (3)$$

Правильное определение границы объекта возможно только при знании всех нюансов механизма томографического сканирования конкретных типов объектов и представлении их изображений на томограмме. После определения границ объекта точность изготовленной модели полностью определяется числом точек изображения и числом слоев в исходных данных.

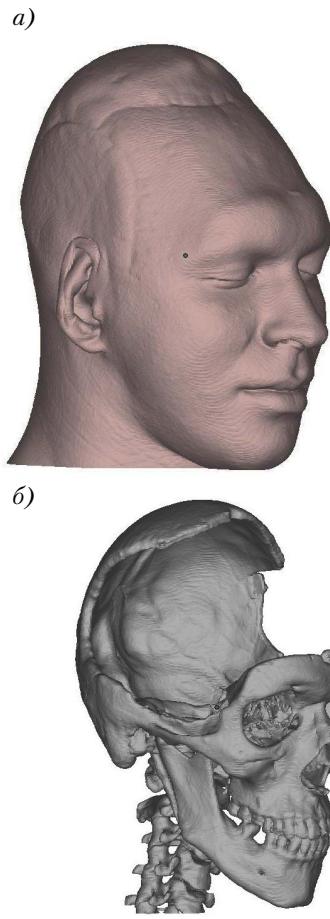
Программа 3Dview выполняет следующие функции:

- читает исходные данные компьютерных томографов в форматах DICOM, BMP, PCX;
- формирует яркостное представление и приводит изображение к трехмерной матрице яркости;
- определяет границу объекта на томограммах и формирует трехмерную твердотельную модель объекта с заданным коэффициентом сглаживания;
- фильтрует твердотельную модель (удаляет малогабаритные одиночные фрагменты и замкнутые полости);
- позволяет оператору-эксперту при необходимости выполнять интерактивное редактирование полученной твердотельной модели для удаления артефактов и внутренних закрытых полостей, которые не несут полезной информации;
- транслирует трехмерную твердотельную модель в формат STL, который является общепринятым для установок лазерной стереолитографии.

Рис. 6. Томограмма (а) и примеры преобразования томограммы (б) при задании разных значений плотности отсечки для построения модели



*Рис. 7. Модель черепа пациента с посттравматическим костным дефектом: а) – восстановление модели по кожным тканям; б) – восстановление модели только по костным тканям*

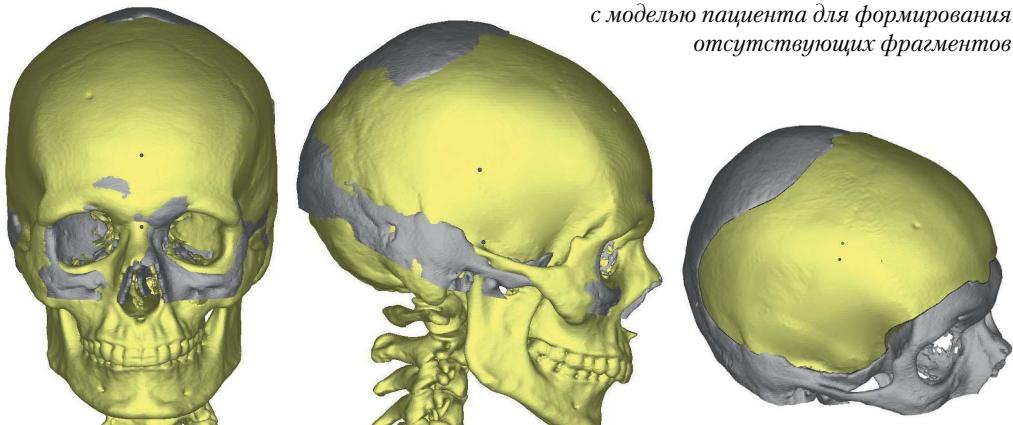


Пакет 3Dview позволяет работать как с томограммами, представленными в формате DICOM, так и в любом стандартном графическом формате (BMP, PCX и т. п.). Для построения компьютерных моделей костных фрагментов скелета человека по данным, полученным на рентгеновском компьютерном томографе, в программе 3Dview достаточно только правильно задать уровень яркости, соответствующий границе костной ткани.

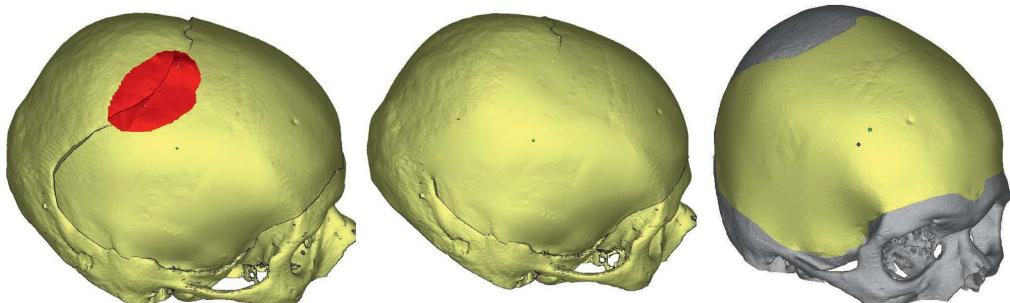
#### Компьютерное моделирование имплантата

После получения трехмерной компьютерной модели дефекта

*Рис. 8. Совмещение подходящей «донорной» модели с моделью пациента для формирования отсутствующих фрагментов*



*Рис. 9. Формирование полной модели черепа пациента, восстанавливающей область дефекта и точно повторяющей его форму до травмы*



и деформации черепа из программы 3DView проводится построение компьютерной модели имплантата. Возможны различные подходы к моделированию, так, при односторонних костных дефектах моделирование и построение имплантатов проводится с использованием метода зеркальной симметрии и работа ведется только с компьютерной моделью, полученной из томографического обследования данного пациента. В более сложных случаях при локализациях дефектов по средней линии (рис. 7) используется метод виртуального донора.

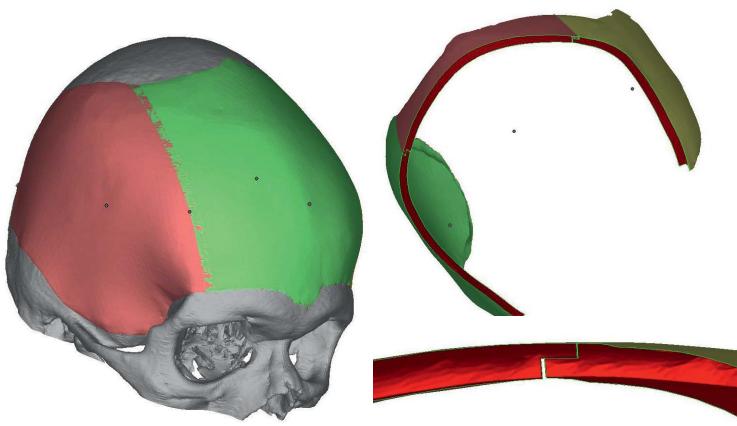
Этот метод основан на использовании трехмерных компьютерных моделей из созданного банка данных 3D-реконструкций черепов различных конфигураций. Из базы данных осуществляется подбор 3D-модели черепа, близкой по параметрам черепу пациента, и на его основе проводятся все этапы моделирования с созданием модели имплантата (рис. 8).

Из модели донора вырезают недостающую часть кости. Но на этом этапе могут оставаться ступенчатые переходы между имплантатом и черепом пациента из-за не полного совпадения моделей. Поэтому специальными средствами создается плавность перехода у краев имплантата для увеличения соответствия (рис. 9).

В итоге получается модель черепа пациента, максимально повторяющая его форму до травмы. На последнем этапе моделирования с помощью булевых операций формируется имплантат, уже полностью совпадающий и являющийся продолжением кости черепа по краям дефекта. Задается толщина имплантата, достаточная для выполнения функций утерянной части черепа, при этом учитывается усилие сжатия пресс-формы, которое она должна выдержать при отливке биосовместимых костных цементов.

В данном случае, чтобы создать пресс-формы такого сложного де-

*Рис. 10. Секционирование имплантата сложной пространственной конфигурации*



фекта, нужно было дополнитель- но разделить имплантат на более плоские части, чтобы не создавать очень сложную конфигурацию матрицы. В нашем случае этих частей будет три: две боковые и центральная. Для правильного расположения частей имплантата делаются установочные пазы в виде ступени с зазором между стыковочными плоскостями не менее 0,1 мм (рис. 10).

Последний этап компьютер- ного моделирования — создание пресс-форм для формовки им- плантатов из костнозамещающих материалов (рис. 11).

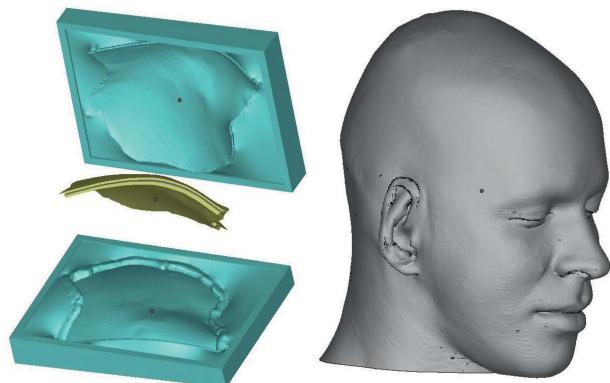
Важным преимуществом на- ших отечественных методов, в от- личие от зарубежных аналогов, является не только моделирова- ние имплантата, но и разработка модели пресс-формы имплан- тата.

#### Изготовление методом лазерной стереолитографии пластиковых биомоделей

Следующим этапом проводит- ся прототипирование моделей че- репа, имплантатов и пресс-форм из фотополимеризующих компо- зиций на лазерном стереолитогра- фе в ИПЛИТ РАН (рис. 12).

Полученные компьютерные трехмерные модели подвергаются верификации и дополнительной

*Рис. 11. Пресс-форма для формовки имплантатов из костнозамещающих материалов и модель, созданная по данным компьютерной томографии того же пациента после операции*



обработке перед изготовлением на лазерном стереолитографе. Ве- рификация, включает в себя про- верку целостности и связности компьютерной модели, устрани- ние разрывов и неправильно ори- ентированных поверхностей. По- сле устранения дефектов модель разбивается на оболочки, затем выделяется и сохраняется одна ос- новная оболочка, несущая самую полную информацию о модели. В связи с особенностями техноло- гии лазерной стереолитографии нельзя изготовить модели с вну-тренними полностью замкнутыми полостями. После верификации модели проводится ее простран- ственная ориентация на рабочей платформе. Модель располагалась в положительном квадрате на рас- стоянии примерно 10 мм от края по осям X, Y для того, чтобы под- порки не падали в область отрица-

*Рис. 12. Модель на рабочей платформе после изготовления на стереолитографе ЛС-250*



тельных значений. В программе обработки есть опция автома-тического размещения несколь-ких моделей после их ориентации на ра- бочей платформе.

Для изготовления необходи-мо сгенерировать систему под-порок. В специальной программе предусмотрена автома-тическая генерация подпорок, но при работе с биологическими объектами необходи-ма ручная корректиро-вка системы подпорок, преду-смотренная программой.

После программной подго-товки данные модели были изго-тovлены на лазерном стереоли-тографе ЛС-250 (рис. 12). Время изго-тования одного комплекта модели операционного черепа слоями 150 мкм при мощности ла-зерного излучения в рабочей зоне 25 мВт составляет 20 часов. После изго-тования полученные формы проходили специальную пост-обработку, удаление подпорок и ультрафиолетовую сушку в УФ-камере.

Важным моментом краино-пластики является эстетическое совер-шенство реконструктивной опе-рации, особенно при костных де-фектах сложной краино-орби-тальной и краино-базальной ло-кализаций.

Компьютерное моделирование и разви-тие технологий про-тотипи-рования карди-нальным обра-зом

изменили возможности реконструктивной хирургии дефектов и деформаций черепа травматического, опухолевого и врожденного характера, а также после резекционных и декомпрессивных операций [8].

#### Применение лазерной стереолитографии при реконструктивной хирургии дефектов черепа

Несмотря на свою долгую историю, проблема восстановления целостности черепа после вдавленных переломов, декомпрессивной трепанации, огнестрельных ранений, а также других патологических процессов по-прежнему актуальна [5–8]. Количество пострадавших с костными дефектами (КД) постоянно увеличивается в связи с ростом тяжелой черепно-мозговой травмы и хирургической активности, расширением показаний к декомпрессивной трепанации черепа не только при травме, но и сосудистых заболеваниях.

Во многих клиниках мира накоплен большой опыт по краинопластике, и вместе с тем поиски оптимальных решений продолжаются: это касается методов реконструкции КД, выбора пластических материалов, временных параметров хирургии и ряда других вопросов [5, 6].

Стереолитографические модели при реконструктивных операциях в одном из ведущих медицинских институтов НИИ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко [7, 8] используются с конца 90-х годов. В период 1999–2017 гг. в отделении черепно-мозговой травмы у сотен пациентов с дефектами костей черепа проведены реконструктивные вмешательства с использованием компьютерного моделирования и лазерной стереолитографии. Площадь костных дефектов варьировала от 16 до 320 см<sup>2</sup>. Преобладали

обширные и гигантские костные дефекты (более 60 см<sup>2</sup>), а также дефекты сложной конфигурации, преимущественно лобно-орбитальной локализации.

Имплантаты изготавливаются из биосовместимых современных метилметакрилатов (Polacos R. Palamed G-40 Merc Biomaterial GmbH, Germany). Наличие пресс-формы позволяет изготовить имплантат как интраоперационно в стерильных условиях, так и до операции с последующей стерилизацией имплантата. В последнем случае сокращается время операции, полимеризация имплантата с экзотермической реакцией происходит вне раны. Изготовление имплантата с использованием пресс-формы требует определенного опыта в силу быстро меняющейся текучести и пластичности материала. В процессе изготовления возможна его предварительная доработка на пластиковой модели черепа. Окончательная подгонка имплантата проводится с помощью высокоскоростных фрез. Точная пластиковая копия черепа пациента позволяет также до операции изготовить имплантат из титановой сетки пластины, что сокращает время операции и улучшает ее качество.

В ряде случаев при низких дефектах лобно-височной локализации даже идеальное сопоставление имплантата с краями костного дефекта дает только удовлетворительный косметический результат (западение мягких тканей в височной области). Для дальнейшего улучшения качества реконструктивных операций необходимо

учитывать изменения мягких тканей головы, прежде всего обусловленных рубцово-атрофическими изменениями височной мышцы.

Таким образом, применение технологии компьютерного моделирования и лазерной стереолитографии привнесло принципиально новые возможности в реконструктивную нейрохирургию и существенно улучшило качество операций при сложных по конфигурации и локализации дефектах и деформациях черепа.

#### Применение биомоделей для пластической хирургии

Совместно с областной клинической больницей им. М. И. Калинина (г. Самара) была разработана оригинальная методика создания трехмерных моделей кожной и мышечной ткани с использованием томографических данных для реконструктивно-восстановительных операций в пластической хирургии. В данном случае проведено моделирование носа реального пациента рис. 13, 14, 15.

#### Применение лазерной стереолитографии и биомоделирования для кардиохирургии

Целью данной работы являлась разработка методов оперативного построения индивидуальных компьютерных моделей сердца пациентов, области сердечного клапана с фрагментом восходящей аорты и изготовления из пластиковых копий с целью индивидуальной

Рис. 13. Моделирование лицевого скелета, облика пациента и имплантатов

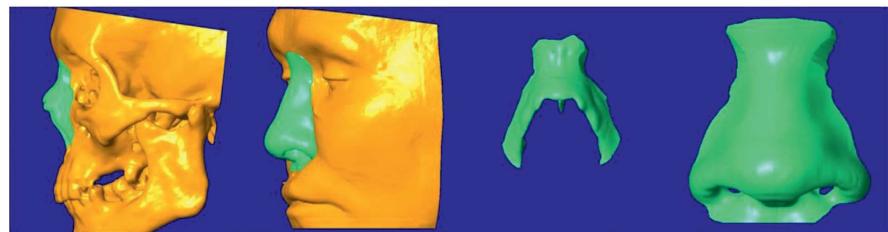


Рис. 14. Пластиковые копии фрагментов лицевого скелета пациента, изготовленные в ИПЛИТ РАН методом лазерной стереолитографии

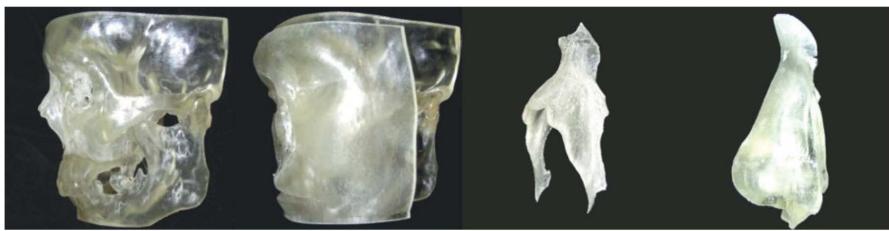


Рис. 15. До- и послеоперационный облик пациента. Силиконовая модель носа, изготовленная по пластиковой модели для областной клинической больницы им. М.И. Калинина, г. Самара



подгонки биопротезов клапанов, имплантируемых в сердце. Работа выполнялась совместно с научно-производственным отделом медицинской биотехнологии научного центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева РАМН.

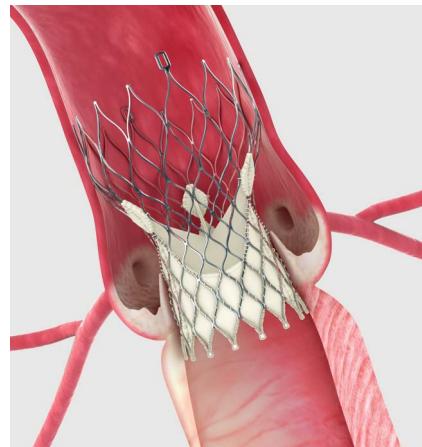
В этом отделе разработаны каркасные и бескаркасные биопротезы клапанов и освоено их мелкосерийное производство для замещения пораженных сердечных клапанов. Эти клапаны имплантируют с применением искусственного кровообращения (открытое сердце). Стент-клапаны — это новая разновидность протезов клапанов, которые можно имплантировать с помощью закрытых методик, эндоваскулярных или малоинвазивных.

Стент-клапаны в сжатом виде (на катетере) доставляют до позиции имплантации под рентгеновским контролем. В надлежащей позиции стент-клапан расправляют (например, с помощью баллона, или он расправляется сам, если каркас стент-клапана сделан из нитинола). В конечном итоге

стент-клапан фиксируется в надлежащей позиции (рис. 16).

Для оптимизации конструкции стент-клапанов необходимо их испытание на моделях, которые соответствуют реальным пациентам. Одной из наиболее подходящих моделей может быть трехмерная модель соответствующего участка выводного отдела левого желудочка с частью восходящей аорты, выполненная из достаточно упругого и достаточно прозрачного материала (силикон,

Рис. 16. Схема имплантации стент-клапана на нитиноловом каркасе в позицию аортального клапана



полиуретан, латекс...). Такой фантом позволит эффективно решить ряд задач, связанных с оптимизацией конструкции самого клапана, а также доставляющих устройств. Более того, присоединив фантом к пульс-дупликатору, можно будет изучать функциональные характеристики клапанов перед их испытаниями на животных.

Задача изготовления фантома на первом этапе сводится к созданию компьютерной модели на основе данных томографических обследований больных со стенозом аортального клапана. По томограммам производится обмер основных характерных геометрических размеров, необходимых для построения трехмерной модели (рис. 17).

Данные таких обмеров пациентов со стенозом аортального клапана представлены в табл. 1.

По полученным данным проводилось построение компьютерной модели 1 и последующее изготовление ее пластиковой копии 2 на лазерном стереолитографе ЛС-250 (рис. 18).

Были обработаны комплекты томограмм и построены компьютерные модели сердца в области сердечного клапана для 10 пациентов. По компьютерным моделям определены геометрические размеры области локализации биопротеза сердечного клапана.

Рис. 17. Томограмма выводного отдела левого желудочка с частью восходящей аорты с геометрическими размерами

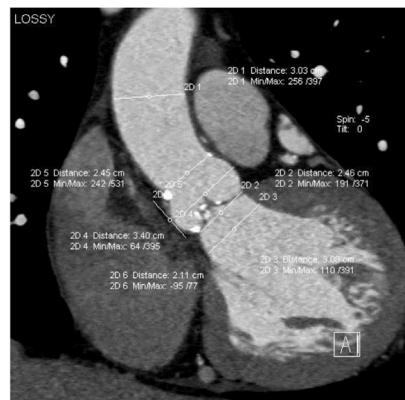


Таблица 1. Данные обмеров пациентов со стенозом аортального клапана

Пациент	D1	D2	D3	D4	DR	DL
1	31,3	43,2	37,3	27,8	10,0	18,8
2	24,6	34,0	24,5	21,1	12,5	16,3
3	23,3	33,1	27,2	19,7	11,9	
4	29,3	34,4	29,3		12,4	9,7
5	22,9	31,0	22,6	17,2		
6	24,8	28,9	23,5	15,2		
7	22,9	25,6	22,4	16,7	9,7	10,2

Также по томографическим данным, предоставленным НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН, проводилось изготовление пластиковой копии гипертрофированного сердца реального пациента для планирования сложной хирургической операции (рис. 19.)

Проведенная работа показала возможность использования томографических исследований сердца и кровеносной системы человека для построения трехмерных компьютерных моделей этих объектов и изготовления с помощью лазерной стереолитографии пластиковых копий для планирования хирургической операции на сердце.

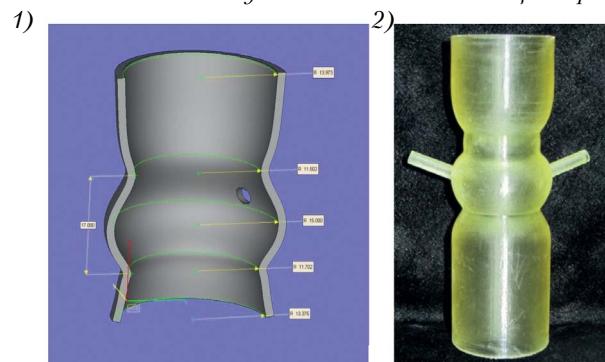
Построены CAD-модели сердца в области сердечного клапана, самого биопротеза, которые, в принципе, могут использоваться для проведения динамического моделирования методом конечных элементов с оптимизацией конструкции биопротеза.

### Заключение

Разработанная оригинальная методика создания индивидуальных имплантатов с помощью лазерной стереолитографии позволяет:

- создавать трехмерные модели биологических объектов, используя томографические данные;
- проводить моделирование и изготовление имплантата для

Рис. 18. 1 – один из вариантов компьютерной модели и 2 – пластиковая копия фантома выводного отдела левого желудочка с частью восходящей аорты



устранения посттравматических костных дефектов;

- значительно сократить время операции, улучшить послеоперационный облик пациента и уменьшить период его реабилитации. ■

### Литература

1. Антонов А.Н., Евсеев А.В., Камаев С.В., Кулаков В.Б., Коцюба Е.В., Марков М.А., Новиков М.М., Панченко В.Я., Семешин Н.М., Якунин В.П. Лазерная стереолитография — технология послойного изготовления трехмерных объектов из жидких фотополимеризующихся композиций. Оптическая техника. 1998. Т. 1. № 13. С. 5–14.
2. А.В. Евсеев, С.В. Камаев, Е.В. Коцюба, М.А. Марков, А.Н. Никитин, М.М. Новиков, В.Я. Панченко, В.Г. Низьев, В.В. Васильцов. Лазерные технологии быстрого прототипирования и прямой фабрикации трехмерных объектов. В монографии: Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. Под ред. В.Я. Панченко — М.: Физматлит, 2009. Глава 10. С. 346–412.
3. Абрамов С.С., Болдырев Н.И., Евсеев А.В., Коцюба Е.В., Новиков М.М., Панченко В.Я., Семешин Н.М., Якунин В.П. О возможности применения метода лазерной стереолитографии в судебной медицине. // Судебно-медицинская экспертиза. 1998. № 41 (3). С. 13.
4. Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM), National Electrical Manufacturers Association, Rosslyn, USA, <http://medical.nema.org/standard.html>
5. Кравчук А., Потапов А., Корниенко В., Панченко В., Евсеев А., Шурхай В., Биттиров А. Поиск оптимальных материалов и технологий изготовления имплантатов при реконструктивной хирургии посттравматических дефектов и деформаций черепа. // Российская нейрохирургия. 2006. № 2 (17).
6. Fallahi B, Foroutan M, Motavalli S, Dujoynu M, Limaye S. Computer-aided manufacturing of implants for the repair of large cranial defects: an improvement of the stereolithography technique. Neurol Res 1999; 21 (3). P. 281–286.
7. Kravchuk A., Potapov A., Kornienko V. et al. Computed modeling in reconstructive surgery for posttraumatic skull vault bone defects. Neurotrauma (Eds. A. Potapov, L. Likhterman, K. R.H.von Wild) Moscow, 2002. P. 187–190.
8. Коновалов А.Н., Потапов А.А., Лихтерман Л.Б. и др. Реконструктивная и минимально инвазивная хирургия последствий черепно-мозговой травмы. Москва, 2012. С. 319.

Рис. 19. Пластиковая копия сердца реального пациента для планирования хирургической операции



ОРГАНИЗATOR



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ФОРУМ «АРМИЯ-2019»**

**25–30 ИЮНЯ  
ПАТРИОТ ЭКСПО**

[WWW.RUSARMYEXPO.RU](http://WWW.RUSARMYEXPO.RU)

ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР



МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ

# rosmould

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

**18–20 июня 2019**

МВЦ «Крокус Экспо», Москва

## От идей до готового изделия



Формы, пресс-формы и штампы



Аддитивные технологии



Сырье и материалы



Оборудование и оснастка



[www.rosmould.ru](http://www.rosmould.ru)



messe frankfurt

**mesago**  
Messe Frankfurt Group