

# at

аддитивные  
технологии



3D-принтер  
FIGURE 4 STANDALONE



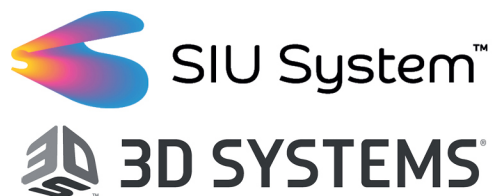
3D-принтер  
ProJet MJP 2500 W



3D-принтер  
ProX DMP Flex 350

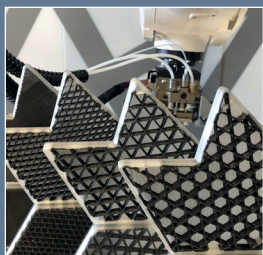


**SIU System — ведущий интегратор комплексных 3D-решений**



Элитный партнёр 3D SYSTEMS: единственный поставщик всех типов оборудования, расходных материалов, а также сервиса в России и СНГ.

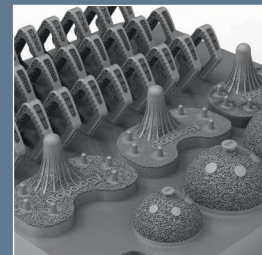
[www.siusystem.ru](http://www.siusystem.ru)



Аддитивные технологии для композитных материалов  
18



Девять шагов к созданию аддитивного центра на предприятии  
24



Аддитивные технологии в хирургии и ортопедии  
30





**ПМХ**

**ПОЛЕМА**

## **Металлические порошки**

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

## **Хром**

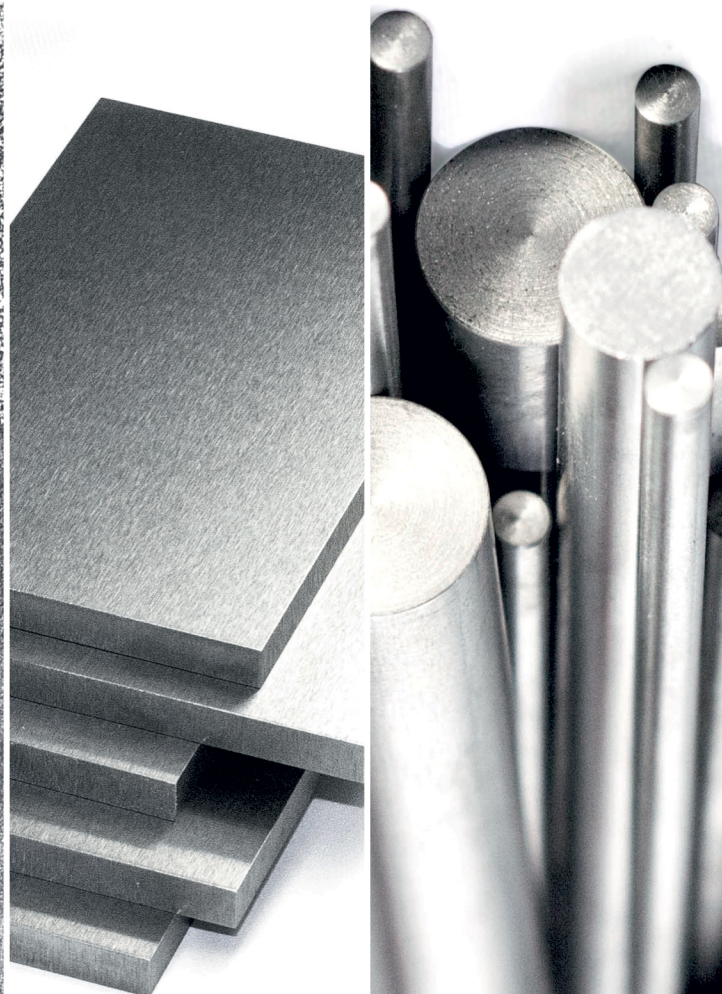
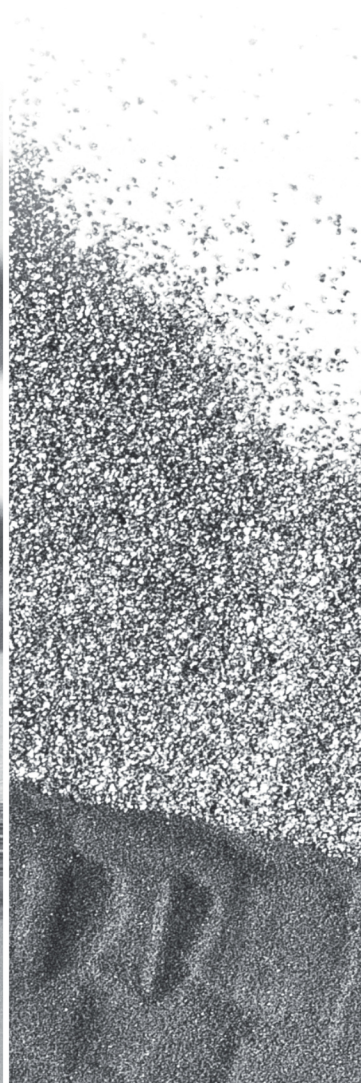
Порошки, чешуйки, пластины, распыляемые мишени, испаряемые катоды.  
Чистота хрома 99,95–99,99%

## **Композиционные материалы**

Распыляемые мишени, испаряемые катоды, контакты

## **Тугоплавкие металлы**

Листы, пластины, лодочки, прутки, электроды



### **АО «ПОЛЕМА»**

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.metholding.ru](http://www.metholding.ru)



Издатель ООО «ПРОМЕДИА»  
директор О. Фалина  
главный редактор М. Копытина

отдел редакции: Т. Карпова, Э. Сачкая  
С. Куликова, Е. Ерошкина

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

отдел рекламы: т/ф (499) 55-9999-8

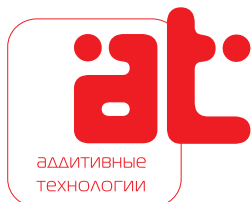
## СОДЕРЖАНИЕ

АДРЕС: 101000, Москва, Милютинский пер.,  
18А, оф. 36с, помещение 1, 3  
т/ф (499) 55-9999-8 (многоканальный),  
(495) 256-80-86  
e-mail: info@additiv-tech.ru  
www.additiv-tech.ru

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

Тираж 5000 экз.  
Распространяется на выставках и по подписке.  
Перепечатка опубликованных материалов  
разрешается только при согласовании  
с редакцией. Все права защищены ®.  
Редакция не несет ответственности за  
достоверность информации в рекламных  
материалах и оставляет за собой право  
на редакторскую правку текстов.  
Мнение редакции может  
не совпадать с мнением авторов.

- 4 Аддитивные технологии в развитии
- 7 Аддитивные технологии на «РОСМОЛД»
- 8 Законодательная база отстаёт
- 9 Главное — быть востребованными
- 10 Отечественные сплавы серийного производства для аддитивных технологий
- 14 Термообработка изделий, изготовленных с применением литья порошков под давлением и аддитивных технологий
- 18 Аддитивные технологии для композитных материалов
- 24 Девять шагов к созданию аддитивного центра на предприятии
- 29 Аддитивные технологии в российской стоматологии: мнение практикующего врача
- 30 Аддитивные технологии в хирургии и ортопедии



## ПОДПИСНОЙ КУПОН

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

### БАНКОВСКИЕ РЕКВИЗИТЫ:

ООО «ПРОМЕДИА»  
Юр. адрес: 101000, г. Москва,  
Милютинский пер., 18А  
Почт. адрес: 101000, г. Москва,  
Милютинский пер., 18А, оф. 36с  
ИНН 7708266787  
КПП 770801001  
Р/с 40702810400120033781  
ПАО АКБ «АВАНГАРД»  
г. Москва  
К/с 30101810000000000201  
БИК 044525201

Фамилия, имя, отчество (получателя):

Наименование предприятия (организации, фирмы):

Индекс и полный почтовый адрес (получателя):

Юридический адрес (для выставления счета)

ИНН/КПП

Телефон:

E-mail (если он имеется)

Подписка на:  номер  год

Для выставления счета направьте заполненный купон по адресу: [info@additiv-tech.ru](mailto:info@additiv-tech.ru).

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

101000, Москва, Милютинский пер., 18А, оф. 36с, пом. 1, 3, т/ф (499) 55-9999-8 (многоканальный), (495) 256-80-86  
e-mail: info@additiv-tech.ru, www.additiv-tech.ru



Министерство промышленности и торговли РФ сформировало каталог отечественной продукции в области аддитивного производства за 2019 год. Каталог уже содержит порядка 70 позиций и отражает актуальный статус по производимым российскими организациями 3D-принтерам, а также металлическим и полимерным материалам. По каждой позиции указываются технические характеристики, произ-

водственные возможности и индивидуальные уникальные особенности выпускаемой продукции. Список будет регулярно обновляться.

По словам министра промышленности и торговли РФ Дениса Мантурова, за последние два года произошёл ощутимый скачок развития отечественных компетенций в сфере промышленного аддитивного оборудования. Было произведено более 40 про-

мышленных и 5000 настольных 3D-принтеров, что позволило значительно снизить ежегодную зависимость от импортных поставок в общем объёме закупок. В целом объём производства отечественного гражданского и промышленного аддитивного оборудования в России по сравнению с 2011 годом в денежном выражении вырос в 20 раз, а импортозависимость за период 2001–2018 гг. снизилась с 96 до 60 процентов.

[http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/katalog\\_additivny\\_techology.pdf](http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/katalog_additivny_techology.pdf)

## Новые сверла

Новая линейка сверл компании Maral изготовлена при помощи гибридной технологии, когда хвостовик создается стандартным путем, а режущая часть — методом лазерного наплавления при помощи системы LaserCUSING от компании Concept Laser.



До использования гибридной технологии минимальный размер сверла составлял 13 мм. Одна из причин такого минимального порога — охлаждающая жидкость, которая подводится через сердцевину сверла. Сверло при меньших размерах становилось более хрупким и менее устойчивым.

В новых сверлах используется спиральная подача хладагента, что позволит внедрить технологию для изготовления насадок диаметром от 8 до 12 мм. Преимущество сверл с продвинутой системой охлаждения означает то, что они могут использоваться более длительное время.

<https://materiallab.ru>

## Сотый по счету

Частная космическая компания Rocket Lab отмечает новое достижение: изготовление сотого по счету ракетного двигателя Rutherford. Эти силовые установки печатаются на электронно-лучевых порошковых 3D-принтерах и с мая 2017 года регулярно выводят в космос ракеты-носители легкого класса Electron.

Ракета-носитель Electron использует десять двигателей — девять на первой ступени и один на второй. Двигатели весят 35 кг каждый и собираются с применением ряда 3D-печатных компонентов, включая камеры сгорания, форсунки, топливные клапаны и насосы.



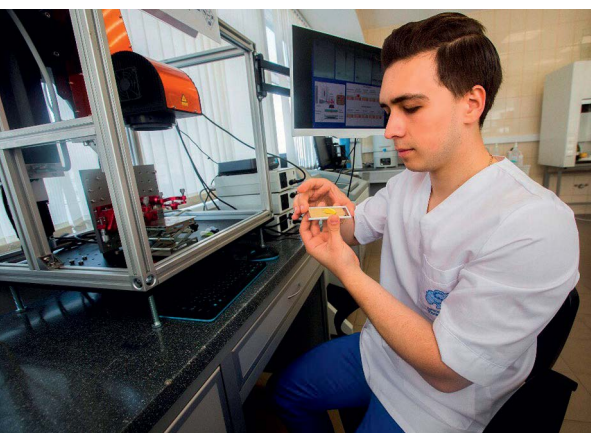
Полный комплект ключевых компонентов компания в состоянии напечатать собственными силами в течение всего одних суток.

Семьдесят из изготовленных двигателей уже слетали в космос, остальные либо ждут своей очереди, либо использовались в тестах. В общей сложности команда провела 850 стендовых испытаний, наглядно доказав состоятельность аддитивных технологий применительно к ракетостроению.

<https://3dtoday.ru>



# Первый в России лазерный биопринтер



Ученые Сеченовского университета совместно с коллегами из Института фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» создали первый в России лазерный биопринтер BioDgor, работающий по технологии LIFT — биопечати на основе индуцированного лазером переноса клеток. Она помогает с высокой точностью оперировать такими объектами, как биомолекулы и клетки тканей человека или животного. С помощью лазера их можно переносить на субстрат (например, полимерную пленку или стекло), формируя ткань с заданными свойствами.

В настоящее время на нем проводится широкий спектр научных исследований, ориентированных в большей степени на тканевую инженерию. В частности, ученые работают над созданием искусственной барабанной перепонки.

<https://sdelanounas.ru>

## Самый маленький напечатанный стент

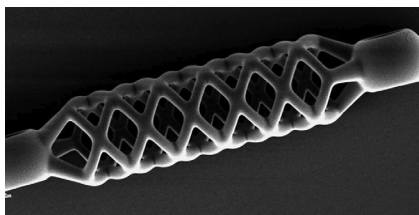
Ученые из Федеральной высшей технической школы Цюриха (ETH Zurich) разработали миниатюрный стент, способный повысить безопасность лечения стриктуры уретры.

Стриктура уретры развивается примерно у каждого тысячного ребенка, включая еще нерожденных. Для предотвращения накопления опасного уровня мочи хирурги удаляют пораженный участок, сшивая оставшийся канал. Установка стента, пока плод находится в утробе матери, менее вредна для почек.

Специалисты ETH Zurich создали подходящие структуры размером менее 100 мкм. Т.е. напечатанный стент в 40 меньше любого аналога.

Команда назвала примененный метод непрямой 4D-печатью. Он включает вырезание трехмерной формы — негатива, заполнение его полимером с памятью и обработку ультрафиолетом. Ненужные участки формы удаляются растворителем. Устройство способно запоминать заданную форму, оно легко размещается внутри хирургического инструмента, а после пересадки раскрывается до нужных размеров.

Перед клиническими испытаниями изделие должно быть протестировано на животных, но предварительные результаты выглядят многообещающе.



<http://ftimes.ru/>

## «Зеленая стена» BigRep

NOWLAB, отдел инноваций лидера крупногабаритной 3D-печати BigRep, недавно представил BANYAN ECO WALL — 3D-печатный прототип «зеленой стены» с собственной встроенной системой водоснабжения и водоотведения. Она основана на принципах природных систем, таких, как листья, корни и стебли растений.

«BANYAN ECO WALL — это сложный и элегантный дизайн в сочетании с конструктивными особенностями, реализуемый только с помощью 3D-печати. — говорит генеральный директор BigRep Стефан Бейер. — Традиционные технологии, такие как фрезерование или литье под давлением, не могут обеспечить такой уровень сложности и функциональности объекта».

BANYAN ECO WALL с габаритами 2000×2000×600 мм состоит из четырех модулей и воплощена в жизнь с использованием широкоформатных FDM-принтеров BigRep. Основная часть конструкции напечатана из материала BigRep PETG, а цветочные горшки изготовлены с использованием Black PRO HT.



<https://i3d.ru/>

Татьяна Карпова

Многочисленные конференции и выставочные экспозиции отражают развитие аддитивных технологий в России и огромный интерес со стороны специалистов целого ряда отраслей. В данном обзоре представлена информация лишь о некоторых из заслуживающих внимания.

## Встреча в ВИАМ

22 марта более 500 ведущих ученых и специалистов из 200 организаций собирались в пятый раз во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ) на международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее». Гостями в этом году стали представители Китайской Народной Республики, Франции, Израиля, Германии, Белоруссии и других стран.

Традиционно открыл конференцию генеральный директор ВИАМ, академик РАН Евгений Николаевич Каблов, который отметил, что рынок аддитивных технологий (АТ) в РФ сейчас составляет 6 млрд рублей и будет активно расти, поскольку «уже понятно, что без аддитивных и цифровых технологий, без широкого применения моделирования, компьютерного проектирования, использования новых материалов невозможно обеспечить конкурентоспособность отечественной промышленности». Он также заявил, что для дальнейшего успешного развития аддитивных технологий на базе ВИАМ был разработан комплексный план мероприятий по развитию и внедрению аддитивных технологий в РФ до 2025 года, на основе которого важно в сжатые сроки сформировать государственную подпрограмму по развитию аддитивных технологий. Среди направлений развития: создание единой информационной платформы на базе цифровых технологий, отечественных материалов, технологий, оборудования на базе российского программного обеспечения, национальных стандартов и нормативной документации, подготовка кадров, внедрение АТ в наукоемкие производства и др. В настоящее время рядом отечественных организаций уже начаты соответствующие работы, что и нашло отражение в выступлениях докладчиков как пленарного заседания, так и тематических секций.

В частности, на секции № 1 обсуждались вопросы обработки, синтеза и внедрения новых металлопо-

рошковых материалов для аддитивного производства, изготовления деталей из композиционных материалов, применения нанокompозитов для FDM-печати, производства малогабаритных деталей МИМ-методом, внедрения АТ на предприятиях ОДК, а также для строительства, нейрохирургии и др. Докладчики секции № 2 затронули темы проектирования малоразмерных ГТД и реактивных БПЛА с применением АТ, математического моделирования аддитивного производства, топологической оптимизации изделий, применения компьютерной томографии в аддитивном производстве, переработки порошка для SLM-технологии и др. На секции № 3 участники могли узнать о новых решениях целого ряда прежде всего отечественных компаний-производителей, представивших оборудование для изготовления металлических деталей методами SLM, прямого лазерного выращивания, лазерной порошковой наплавки и др.

Призы за лучшие доклады получили:

Константин Юрьевич Нагулин — сотрудник ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева—КАИ», д.т.н., за доклад «Плазменный синтез структурно-градиентных порошковых материалов»;

Вячеслав Терентьевич Эм — представитель НИЦ «Курчатовский институт» ГНЦ РФ, профессор, д.т.н. за доклад «Измерение распределения остаточных напряжений в объеме массивных металлических деталей нейтронным методом на реакторе ИР-8»;

Дмитрий Николаевич Борисенко, к.т.н. из ФГБУН «Институт физики твердого тела РАН», за доклад «Оборудование и технология изготовления профилированных изделий из тугоплавких металлов (W, Mo, Nb) способом 3D-печати».





По общему мнению, представленные на конференции доклады вызвали большой интерес благодаря научной новизне и практической значимости. Кроме того, многие участники отметили важность таких встреч и отличную возможность для обмена опытом.

## Технологии для больших габаритов

Аддитивные технологии давно и успешно применяются в ПАО «ОДК-Сатурн» (входит в Объединенную двигателестроительную корпорацию госкорпорации «Ростех»). А за время деятельности Центра аддитивных технологий, созданного в 2012 г., достигнуты значительные результаты, и развитие направления продолжается. Кроме того, прошлый год был отмечен такими знаковыми событиями, как создание в рамках «Ростех» высокотехнологичного Центра аддитивных технологий (ЦАТ), формирование и развитие в рамках ОДК центров аддитивного производства, включающих в себя взаимосвязанные структуры, конструкторско-технологические платформы, исследовательские и опытные участки аддитивного производства с целью выполнения полного цикла разработки, проектирования и внедрения. Поэтому неудивительно, что на международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (г. Рыбинск, 15–17 апреля 2019 г.), где ПАО «ОДК-Сатурн» выступает как организатор, к данной тематике традиционно был проявлен повышенный интерес.

*Экскурсия в Центр аддитивных технологий ПАО «ОДК-Сатурн». Фото: <https://cheremuha.com/>*



В этом году темой сессии «Новые решения в аддитивном производстве» стало производство крупногабаритных металлических деталей. Были рассмотрены самые различные перспективные технологии с целью оценки их преимуществ и недостатков, уровня технологической готовности, а также примеры их интеграции в цепочку создания ценностей. Среди представленных технологий: плавка металлической проволоки электронным лучом (Sciaky Inc., xBeam 3D

Printing), наплавка металлической проволоки методом дуговой сварки в защитных газах (GEFERTEC – доклад прозвучал от фирм «Солвер» и «Фитник»), прямое лазерное выращивание из металлического порошка (ИЛИСТ/Морской технический университет – технология DLMS; InssTek – технология DMT, Trumpf – технологии LMD и LMF, AddUp – технология DED), холодное газодинамическое напыление Cold spray (Impact Innovations), струйная 3D-печать фотополимерными смолами PolyJet, струйная 3D-печать металлами и керамикой NanoParticle Jetting (XJET). На основе этих технологий создано оборудование для применения на предприятиях машиностроительного комплекса.

От Пермского политехнического университета анонсировали гибридный станок для создания металлических деталей плазменным оплавлением проволочных материалов с последующей механообработкой. В докладе ПАО «Электромеханика» были показаны возможности электронно-лучевой наплавки проволокой для ремонтных целей. Представитель АМСМ (подразделение группы EOS) продемонстрировал подход к созданию индивидуальных машин для 3D-печати.

Также слово предоставили ведущим отечественным производителям порошков для аддитивного производства: ФГУП ВИАМ, АО «Композит», ИЛМиТ ОК РУСАЛ, АО «ПОЛЕМА».

Результаты работы конференции всегда являются важной составляющей при формировании сводного плана исследовательских опытно-конструкторских работ по ОДК, поэтому данное мероприятие представляет большой практический интерес и отличается высоким уровнем выступлений и организации.

## В рамках «Металлообработки»

В рамках крупнейшей российской выставки по современным технологиям и оборудованию «Металлообработка», проходившей в московском «Экспоцентре» с 27 по 31 мая, уже во второй раз была организована специализированная экспозиция по аддитивным технологиям для машиностроительных производств и предложена программа, включающая в себя тематические семинары и конференции.

Среди представленного на стендах оборудования было много множество новинок. Так, компания TRUMPF (Германия) показала SLM-машину с однокилловаттным зеленым лазером для выращивания деталей из цветных металлов, в т.ч. меди. Новая SLM-машина DMG MORI – LASERTEC 30 SLM с рабочей зоной 300×300×300 мм стала дополнением к уже существующей серии станков LASERTEC 3D (рис. 1).

Вниманием пользовались разработки российских производителей. На стенде СПбГМТУ/ИЛИСТ привлекала внимание роботизированная установка для изготовления крупногабаритных стальных деталей 2×2×0,8 м методом прямого выращивания и самое большое в мире «напечатанное» кольцо из титана. Новинка компании «Аддитивное производство» — комплекс оборудования для печати высоконаполненными фотоотверждаемыми лазером пастами с содержанием твердой фракции (в качестве твердой фракции в ней могут быть использованы керамика, композитные смеси и пасты на основе металлов). Выпускается оборудование под брендом Additive Fabrication. Премьерой стала и разработка Группы компаний «Аддитивное производство» из Перми (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, «Центр ЭЛТ», ПАО «Протон-ПМ», «Инкор», «МИП «КАТ») — станок для аддитивного производства полного цикла AT-300, реализующий комплекс технологий: проволоочная наплавка, послойное упрочнение (проковка), силовая механическая обработка деталей из конструкционных сталей, коррозионных и жаропрочных сталей и сплавов, титановых, алюминиевых и магниевых сплавов, бронзы и других металлов. В станке применены уникальные плазмотроны собственной разработки, не имеющие аналогов в мире. Проект реализован за один год. НПП «Лазерные системы» (СПб) показало установку селективного лазерного сплавления (SLM) M250, а компания Additive Solutions — SLM-принтер по металлу D250.

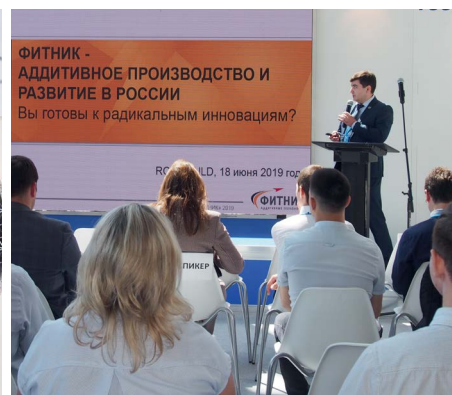
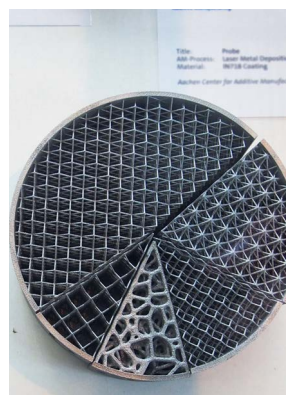
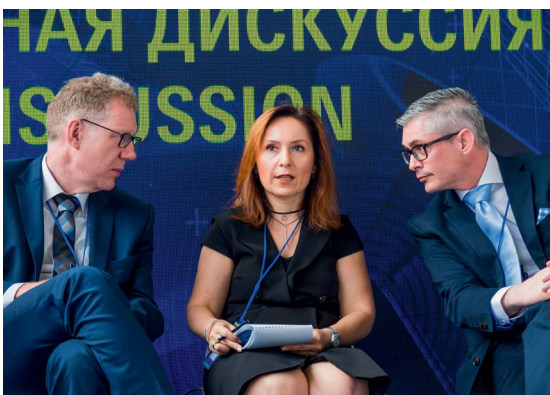
Интересные решения демонстрировались на стенде дилеров. Так, iQB Technologies показала: стереолитографический 3D-принтер ProtoFab SLA600 DLC, линейку сканеров, включая новинку 2019 года — портативный 3D-сканер нового поколения Creaform HandySCAN BLACK — устройство метрологического класса, в несколько раз производительнее и точнее предыдущей модели HandySCAN 700, программные продукты Geomagic Control X (для контроля качества), Geomagic Design X (для обратного проектирования) и Materialise Magics (для подготовки моделей



к 3D-печати) и многое другое. На стенде ООО «Шевалье» на базе принтера D33D демонстрировалась работа шнекового экструдера разработки и производства ООО «Шевалье.ру» и инжиниринговой компании «Интек» для 3D-печати микрогранулами или порошками. Экструдер устанавливается в качестве рабочего инструмента на манипуляторы, обрабатывающие центры или 3D-принтеры. Разноплановое оборудование было представлено на стенде компании «Диполь»: 3D-принтер по металлу EP-M100T и стереолитографический 3D-принтер EP-A450 от компании SHINING 3D, промышленный 3D-принтер по пластику DT60 компании Dynamical Tools, песчано-полимерный 3D-принтер от ООО «Аддитивные технологии». И понятно, что это далеко не все, что было предложено вниманию специалистов.

Что касается деловой программы, то она продолжилась в режиме нон-стоп в течение трех дней. Компания iQB Technologies провела конференцию «Как 3D-технологии помогают оптимизировать производство. Решения. Преимущества. Опыт», демонстрируя передовые решения для промышленности и примеры их внедрения. Приглашенными гостями стали представители компании SLM Solutions и Самарского университета. В международной конференции «Цифровое производство: ПО и оборудование для фабрики будущего», организованной компанией «ПОИНТ», с докладами выступили специалисты «ПОИНТ», Autodesk, WAYRAY, AddUp, «Делкам-М», СПбГМТУ, «Солвер», «АМ-КОР». На конференции RENA Solutions рассказывали об оборудовании и материалах для печати полимерами. Среди ее участников — компании INGEROLL, «Анизопринт», TOTAL Z, FMD 2.0, REC SKOLTECH, УГАТУ, «Солвер». ООО «ЭНЕРГОАВАНГАРД» провело семинар «Аддитивное производство изделий из керамики в промышленности», а Группа компаний «Диполь» — «Применение аддитивных технологий в наукоемких отраслях промышленности». Каждое мероприятие нашло свою аудиторию. ■





## АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА «РОСМОЛД»

С 18 по 20 июня 2019 года в московском «Крокус-Экспо» прошла 14-я международная выставка производственных технологий нового поколения «РОСМОЛД-2019», продемонстрировав рост по всем показателям: экспозиции — на 50% (206 участников из 16 стран), количеству посетителей — на 20% (7024 человек).

В связи с ростом интереса посетителей к теме аддитивных технологий и стремлением рынка к цифровизации промышленности команда выставки организовала специальную экспозицию «Возможности аддитивных технологий». В ней приняли участие лидеры российского и международного рынка: Sisma, Siu Sistem (3D Systems), Диполь Инжиниринг (DSM, Dynamical Tools, Insstek, Shining3D), Siemens PLM Software, СфераМ, 3D Контроль (Envisiontec, Hexagon, Abagy Robotic Systems, Surphaser, Romer, SLM Solutions), Cybercom (Netfabb, Aicon, Artec 3D, Creaform, Range Vision), Oerlikon AM, Imprinta, TotalZ, U3Print, Matricats, Терем (BigRep, HBD), «ФИТНИК» и другие. Были представлены решения в области промышленного оборудования для 3D-печати, новейшие технологии, системы 3D-сканирования, ПО, материалы. Впервые в России, на выставке «РОСМОЛД», в рамках экспозиции «Аддитивные технологии», при поддержке выставки Formnext (Германия), был представлен коллективный стенд Союза машиностроения Германии, рабочей группы по аддитивному производству VDMA AG AM. Среди участников павильона: Arburg, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, ExOne, Formnext, Gefertec, PEM RWTH Ахенский университет, Protique, SMS Group, Trumpf, VDMA AG AM. Премьера была успешной и привлекла большое внимание российских производителей, особенно из авиационной, автомобильной, аэрокосмической, энергетической и машиностроительной промышленности.

Экспозицию «Возможности аддитивных технологий» дополнил форум «Возможности 3D-печати в различных отраслях промышленности», который

прошел при поддержке партнеров: «ФИТНИК», CYBERCOM и Formnext. Более 370 участников познакомились с успешными кейсами ведущих предприятий, уже внедривших аддитивное производство. В течение двух дней форума участникам были представлены доклады в пяти блоках:

- Государство и аддитивное производство. Меры поддержки. Сертификация. (Спикеры: «РУСАТОМ», ФРП, «ФИТНИК», НГТУ им. Р. Е. Алексеева, Сколковский институт науки и технологий.)

- Опыт зарубежных стран (Спикеры: Siemens PLM, TRUMPF, Oerlikon AM, EOS, 3DCeram, SMS group, SLM Solutions, Gefertec, Fraunhofer, Formnext, VDMA AG AM.)

- Сделано в России. (Спикеры: «ПОЛЕМА», HAZ Labs, Xtreal, «Импринта», «АБ Универсал», Additive Solutions, Total Z, «Лазеры и аппаратура», «Лазерные системы».)

- Внедрение аддитивных технологий в традиционное производство. Риски и преимущества. (Спикеры: Центр аддитивных технологий, Cybercom, «Диполь Инжиниринг», «ТЕРЕМ», SIU System, Nissa Digispace, РУДН.)

- Сферы применения аддитивных технологий (Спикеры: НМИЦ нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко, 3D Bioprinting Solutions, ММП им. В. В. Чернышева, СНИУ им. С. П. Королева, НАМИ, МГСУ.)

В рамках форума состоялось подписание соглашения о сотрудничестве между Группой компаний «Лазеры и аппаратура» и воронежским Центром аддитивных технологий. Целью проекта является развитие отечественных аддитивных технологий, проведение опытной эксплуатации лазерных машин, управляющего ПО, создание технологического ПО и технологической БД, создание системы обслуживания и продаж продукции, совместные разработки.

Очевидно, что форум и выставка являются одной из основных площадок для обсуждения актуальных вопросов в индустрии и принятия решений.

<https://rosmould.ru>

Зинаида Сацкая

Два дня работы Евразийского ортопедического форума на площадке «Экспоцентра» вместили в себя 647 выступлений на 13 научных секциях и 5 международных конгрессах. Участие 4325 специалистов из более чем 70 стран констатировало актуальность темы.

Одна из секций была посвящена 3D-печати имплантатов, но преобладал медицинский аспект — как имплантировать. Врачи, представлявшие результаты научных исследований и интересные клинические случаи, отмечали кастомизированность как основное достоинство имплантатов, созданных с использованием аддитивных технологий. Была отмечена важность взаимодействия между больницей, производителями материалов и оборудования, которое напечатает имплантат.

Сегодняшние проблемы использования аддитивных технологий в медицине нашли отражение в выступлении Николая Карякина, председателя правления ассоциации специалистов по 3D-печати в медицине, ректора Приволжского исследовательского медицинского университета Минздрава РФ.

Как следует из доклада, в 2018 году в мире произведен 480901 индивидуальный имплантат на общую сумму 660,4 млн долл. США. В травматологии-ортопедии аддитивные технологии уверенно, с позитивной динамикой занимают второе место по объему использования, уступая пальму первенства стоматологии. В 2018 году на долю стоматологии пришлось 34% общемирового дохода, на травматологию-ортопедию — 19,1%. В нашей стране сейчас под наблюдением находится 877 пациентов, для лечения которых в последние три года использовались напечатанные имплантаты, из них 611 были custom-made.

Как и во многих странах мира, в России актуален законодательный аспект. Юридические процедуры применения 3D-печати в медицине не прописаны. Вся ответственность делегирована учреждениям здравоохранения, которые сами производят такие изделия. Закон оговаривает только применение материалов, имеющих регистрационные удостоверения. Но, как сообщил Николай Карякин, «в США и некоторых европейских странах уже есть разрешение не только на материал, но и на изделие. У коллег из Израиля ряд имплантатов, изготовленных с использованием аддитивных технологий, уже включен в страховую медицину. Пока за рамками государственного финансирования, но первый шаг сделан». Для выработки шагов,

которые позволят решить эту проблему, ассоциация специалистов по 3D-печати в медицине создала рабочую группу для подготовки клинических рекомендаций по использованию индивидуальных изделий медицинского назначения, изготовленных методом 3D-печати.

Как подчеркнул Николай Карякин, из опыта Приволжского исследовательского медицинского университета Минздрава РФ следует, что использование аддитивных технологий показано прежде всего при гнойных заболеваниях костей и суставов с большим дефицитом костной ткани и при ортопедической онкологии с большими площадями поражения. Но, отметил Карякин, хотя «аддитивные технологии весьма существенно снижают стоимость лечения в случае онкологических первичных или вторичных опухолей и других тяжелых патологий, следует понимать, что 3D-печать не является финансово замещающим методом. Это важно иметь в виду, чтобы не дискредитировать самую идею». Специалисты на полях форума подтвердили этот тезис. Так, один из моих собеседников рассказал, что пациенту напечатанный имплантат обойдется дорого. Например, по ОМС лечение плечевого сустава стоит примерно 40 тысяч рублей, это — операция, пребывание, питание, медикаменты, зарплата врача, а имплант обойдется в 60 тысяч рублей, и оплачивать его предстоит пациенту. Но все же представляется, что по мере развития и совершенствования аддитивных технологий цена на индивидуальные имплантаты будет снижаться. Вспомним, что первые мобильные телефоны стоили несколько тысяч долларов, а сейчас они доступны практически любому.

С большим оптимизмом Николай Карякин сообщил, что сейчас «Росатом» при поддержке правительства заканчивает трехлетнюю грантовую работу и создает большую производственную цепочку из программных продуктов, материалов и стандартизированной производственной линейки по изготовлению индивидуальных имплантатов. Иными словами, предложение растет, и расширение рынка можно только приветствовать.

Форуму сопутствовала выставка, на которой около 120 участников представляли различного рода медицинские изделия. Две компании представляли услуги по 3D-печати, но не было ни принтеров, ни материалов. Несколько компаний представляли металлические порошки для создания изделий методом порошковой металлургии. ■



Зинаида Сацкая

Аддитивные технологии уверенно прокладывают себе дорогу на российский рынок, но не будет журналистским преувеличением сказать, что пока это один большой стартап в ожидании реального спроса. Наш журнал в меру своих сил рассказывает обо всем интересном, что служит развитию этой предметной области, но в первую очередь, конечно, мы с понятным пристрастием следим за отечественными компаниями. По этой причине мы не могли пройти мимо важного события, которым стал выпуск в июле «Каталога аддитивного оборудования, производимого в Российской Федерации», подготовленного департаментом станкостроения и инвестиционного машиностроения Минпромторга РФ.

Обстоятельное издание. В нем не только перечислены российские производители 3D-принтеров (там есть даже один опытный образец) и расходных материалов, но также даны определения основных видов технологий и приведен краткий обзор мирового и российского рынков. Однако в каталоге мы не обнаружили, например, производителя 3D-принтеров для печати металлом AddSol, о которой подробно рассказывали в № 4/2018 журнала «Аддитивные технологии». На тот момент компания была стартапом и, что называется, готовилась к прыжку, но отсутствие компании в каталоге можно было трактовать как угодно. Неужели компания, которая подавала большие надежды, «сошла с дистанции»?

Нам показалось логичным обратиться непосредственно в компанию с вопросом, состоялось ли задуманное. Станислав Козин, генеральный директор AddSol, рассказал, что за год произошло много событий, которые говорят о том, что разработки компании замечены и оценены. Подписаны договоры о сотрудничестве с МГТУ им. Н.Э. Баумана и Мосполитехом. Совместно с МАИ выполнены работы по изготовлению перспективной авиарестойкой топливной системы (АСТС) для вертолетов, которая прошла огневые испытания. О качестве продукции, получаемой на принтере AddSol, можно судить по отзывам. Например, компания Intas Power Systems (IPS) проводила испытания напечатанного импеллера для экспериментального жидкостного насоса высокого давления и поделилась мнением своих специалистов: «Импеллер отработал на ресурсных испытаниях на тестовой установке уже более 3500 часов без разрушения и коробления лопастей, в том числе с 3-кратной перегрузкой и на максимально допустимых оборотах установки 19500 об/мин. Признаков кавитационных разрушений не отмечено».

Не менее важно, что компания несет знания об аддитивных технологиях, формируя потребность в их использовании. Так, Межотраслевой инженеринговый центр МГТУ им. Н.Э. Баумана прислал компании письмо со словами благодарности за лекцию по аддитивным технологиям, которую для участников финала олимпиады «Я — профессионал» провел специалист AddSol.

И, может быть, самое престижное сегодня: компания AddSol стала партнером 45-го мирового чемпионата WorldSkills в Казани. На оборудовании именно этой компании будут соревноваться конкурсанты.

На вопрос, что обеспечивает компанию, пока спрос на 3D-принтеры для печати металлом невелик, Станислав Козин рассказал, что компания сосредоточилась на оказании услуг, выполняя на своем оборудовании заказы зарубежных и отечественных компаний.

Было интересно, на какого рода детали компания получает зарубежные контракты. Как рассказал Станислав, в первую очередь это воздухопроводы и патрубки для автомобилей. «Оказывается, на Западе наши услуги нужны, потому что мы получаем толщину стенки 0,5 мм на изделии с габаритами 200×100×200 мм, а от печати патрубка с такой толщиной стенки отказались зарубежные производители. Обладатели немецких машин на обращения с просьбой напечатать патрубки с толщиной стенки 0,5 мм отвечали, что могут сделать стенку не менее 1–1,2 мм. А мы сделали. У нас получилось. Этой деталью мы гордимся по праву. А в принципе мы можем делать протяженные тонкостенные изделия, от чего другие отказываются». Второе направление — элементы двигателей негабаритных самолетов для авиамоделлистов, которые принимают участие в соревнованиях. И еще у компании есть контракт на отладку печати из ПТ-3 В для ОСК, чего, как утверждает Станислав Козин, «в мире еще никто не делал. Это детали насоса, работающего в агрессивной среде на подводной лодке».

Вопрос, как случилось, что компания не попала в каталог, не показался моему собеседнику важным. «Не попали в этот выпуск попадем в следующий. Главное, что мы востребованы и наш бизнес устойчиво развивается».

А журнал «Аддитивные технологии» берет на себя труд восполнить пробел в работе составителей каталога. Приводим информацию, которая могла быть в каталоге: «В линейке оборудования AddSol представлены SLM-принтеры с зоной построения от 70×70×70 до 800×800×800 мм». ■

# Отечественные сплавы серийного производства для аддитивных технологий

С 2018 года тульское предприятие «ПОЛЕМА» отвоевывает рыночную нишу, которая ранее была полностью оккупирована импортной продукцией. Инновационный проект «Производство металлических высоколегированных порошков для наплавки, напыления и аддитивных технологий», реализованный при участии Фонда развития промышленности, — это пример импортозамещения в сфере высоких технологий. Благодаря ему отечественная промышленность получает качественные современные материалы для технологий аддитивного производства.

В рамках проекта закуплен новый, уникальный для России парк оборудования, включающий атомизатор, ситовые и воздушные классификаторы, а также сфероидизатор. Благодаря новому оснащению предприятие расширило номенклатуру выпускаемых порошков и усовершенствовало их качество.

На сегодняшний день АО «ПОЛЕМА» выпускает аналоги всех популярных зарубежных марок порошков, разрабатывает новые сплавы для различных отраслей промышленности, а также является единственным предприятием в России, освоившим выпуск

сферичных порошков хрома, вольфрама и молибдена устойчивого качества для 3D-печати.

Среди освоенных материалов для аддитивных технологий — жаропрочные сплавы, используемые в авиационной промышленности:

- ПР-ХН78Т (ЭИ435) — применяется в различных областях техники для изготовления слабонагруженных ответственных деталей с рабочей температурой до 1000–1100°C (жаровые трубы, камеры сгорания, газоходы, чехлы термопар и т. д.);
- ПР-11Х11Н2В2МФ (ЭИ962) — для изготовления дисков компрессоров, лопаток и других нагруженных деталей, длительно работающих при температурах до +600°C;
- ПР-ХН45МВТЮБР (ЭП718) — для высоконагруженных элементов силовых конструкций и других деталей ГТД, работающих в условиях при температурах до 700°C;
- ПР-ХН55В5МБТЮ (ЭП648) — для печати лопаток газовых турбин, работающих при температурах 900–950°C.

## Металлические порошки серийного производства для аддитивных технологий, производимые АО «ПОЛЕМА»

| Марка         | Аналоги     | Массовая доля элементов, % |    |             |             |           |           |   |        |
|---------------|-------------|----------------------------|----|-------------|-------------|-----------|-----------|---|--------|
|               |             | Fe                         | Co | Cr          | Ni          | Cu        | Mo        | Наличие дополнительных легирующих элементов | O, ppm |
| <b>Стали</b>  |             |                            |    |             |             |           |           |   |        |
| ПР-12Х18Н10Т  | AISI 321    | основа                     | –  | 16,00–20,00 | 9,00–12,00  | –         | –         | +   | < 300  |
| ПР-09ХН2МД    | –           | основа                     | –  | 0,30–1,00   | 1,80–2,20   | 0,40–1,00 | 0,20–0,40 | +   | < 500  |
| ПР-30Х13      | AISI 420S   | основа                     | –  | 12,00–14,00 | < 0,60      | < 0,30    | –         | +   | –      |
| ПР-40Х13      | AISI 420    | основа                     | –  | 12,00–14,00 | < 0,60      | < 0,30    | –         | +   | < 500  |
| ПР-Х16Н4Д4Б   | 17-4PH      | основа                     | –  | 15,00–17,50 | 3,00–5,00   | 3,00–5,00 | < 0,50    | +   | < 300  |
| ПР-07Х18Н12М2 | AISI 316L   | основа                     | –  | 16,00–18,00 | 10,00–14,00 | –         | 2,00–3,00 | –   | < 300  |
| ПР-Х15Н5Д4Б   | PH1, 15-5PH | основа                     | –  | 14,00–15,50 | 3,50–5,50   | 2,50–4,50 | < 0,50    | +   | < 300  |
| ПР-Х18Н9      | AISI 302    | основа                     | –  | 16,00–20,00 | 8,00–11,00  | –         | –         | –   | < 300  |



Металлические порошки серийного производства для аддитивных технологий, производимые АО «ПОЛЕМА» (продолжение)

| Марка                         | Аналоги                     | Массовая доля элементов, % |             |             |             |           |           |   | Наличие дополнительных легирующих элементов | O, ppm |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|---|---|--------|
|                               |                             | Fe                         | Co          | Cr          | Ni          | Cu        | Mo        |   |   |        |
| <b>Стали</b>                  |                             |                            |             |             |             |           |           |   |   |        |
| ПР-25Х15КА                    | –                           | основа                     | 14,00–16,00 | 24,00–26,00 | –           | –         | –         | + | –   |        |
| ПР-03Х17Н14М3                 | AISI 316L                   | основа                     | –           | 16,80–18,30 | 13,50–15,00 | –         | 2,20–2,80 | + | < 300                                       |        |
| ПР-03Х17Н12М2                 | AISI 316L                   | основа                     | –           | 16,00–18,00 | 10,00–14,00 | –         | 2,00–3,00 | + | < 300                                       |        |
| ПР-28Х3СНМВФА                 | СП-28Ш                      | основа                     | –           | 2,80–3,20   | 0,90–1,20   | –         | 0,35–0,50 | + | < 300                                       |        |
| ПР-20Х13Н2                    | –                           | основа                     | –           | 12,00–14,00 | 1,80–2,60   | –         | –         | + | < 500                                       |        |
| ПР-06Х14Н6Д2МБТ               | ЭП817                       | основа                     | –           | 13,50–15,00 | 5,40–6,20   | 1,80–2,20 | 1,40–1,70 | + | < 300                                       |        |
| ПР-05Х13Н4М                   | DIN 1.4313                  | основа                     | –           | 12,00–14,00 | 3,50–4,50   | –         | 0,30–0,70 | – | < 300                                       |        |
| ПР-07Н18К9М5Т                 | –                           | основа                     | 7,00–10,00  | –           | 17,00–19,00 | –         | 4,50–5,20 | + | < 500                                       |        |
| <b>Жаропрочные сплавы</b>     |                             |                            |             |             |             |           |           |   |   |        |
| ПР-08Х15Н5ДТ                  | ЭП410                       | основа                     | –           | 14,00–16,00 | 4,00–6,00   | 1,00–2,00 | –         | + | < 300                                       |        |
| ПР-08ХН53БМТЮ                 | Inc. 718                    | ост.                       | < 1,00      | 17,00–21,00 | 50,00–55,00 | < 0,30    | 2,80–3,30 | + | < 150                                       |        |
| ПР-ХН58МБЮ                    | ЭК171                       | < 3,00                     | –           | 26,00–28,00 | основа      | –         | 7,00–8,00 | + | < 300                                       |        |
| ПР-81Н3М                      | –                           | ост.                       | –           | –           | основа      | –         | 2,3–2,9   | + | < 300                                       |        |
| ПР-ХН78Т                      | ЭИ435                       | 1                          | –           | 19,00–22,00 | основа      | < 0,07    | –         | + | < 500                                       |        |
| ПР-11Х11Н2В2МФ                | ЭИ962                       | основа                     | –           | 10,50–12,00 | 1,50–1,80   | –         | 0,35–0,50 | + | < 300                                       |        |
| ПР-ХН45МВТЮБР                 | ЭП718                       | ост.                       | –           | 14,00–16,00 | 43,00–47,00 | –         | 4,00–5,20 | + | < 300                                       |        |
| ПР-ХН55В5МБТЮ                 | ЭП648                       | 4                          | –           | 32,00–35,00 | основа      | –         | 2,30–3,30 | + | < 300                                       |        |
| <b>Бронзовые сплавы</b>       |                             |                            |             |             |             |           |           |   |   |        |
| ПР-БрХ                        | –                           | < 0,35                     | –           | 0,70–0,95   | < 0,05      | основа    | –         | – | < 300                                       |        |
| ПР-БрО5Ц5С5                   | AISI C83 600                | < 0,40                     | –           | –           | < 1,00      | основа    | –         | + | < 300                                       |        |
| <b>Кобальт-хромовый сплав</b> |                             |                            |             |             |             |           |           |   |   |        |
| ПР-КХ28М6                     | MP1,<br>UNS 31537,<br>Co-Cr | < 0,75                     | основа      | 26,00–30,00 | < 0,10      | –         | 5,00–7,00 | – | < 300                                       |        |

Диапазоны фракций: 0–20, 20–45, 20–63, 40–100 мкм.

Возможен расцвет по спецификации заказчика. ■



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

# 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)**

## Пробоподготовка для материалографии

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



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

Металлические детали требуют дальнейшего исследования, например, после процесса спекания. Большой выбор машин ATM 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)





# Измерение твёрдости



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

**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.



# 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 отсева порошков и измельчения металлических компонентов, что позволяет в дальнейшем повторно использовать переработанный материал в производственном процессе.



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



# Анализ размеров и формы частиц

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

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.



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



# Термообработка изделий, изготовленных с применением литья порошков под давлением и аддитивных технологий

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.

Аддитивные технологии производства металлических изделий можно разделить на два подтипа — прямые и непрямые. Всё оборудование, разрабатываемое компанией CARBOLITE GERO, отвечает требованиям самых строгих стандартов. Печи GPCMA предназначены для прямого, а печи НТК — для непрямого аддитивного производства (3D-печати) и литья порошков под давлением. Эти две печи — лишь небольшая часть ассортимента продукции компании CARBOLITE GERO.

## Прямое аддитивное производство: снятие внутренних напряжений

При прямом аддитивном производстве порошок выборочно расплавляется и отверждается, таким образом, послойно создается трехмерное изделие.

При лазерной плавке порошков, также известной как селективная лазерная плавка (SLM) или, более точно, лазерная плавка

в заранее сформированном слое (L-PBF), проводится последующая термообработка готового изделия.

Селективная лазерная плавка выполняется под управлением системы автоматизированного трехмерного проектирования (3D CAD). Программное обеспечение управляет нанесением тонких слоев металлического порошка (титановый сплав Ti6Al4V, кобальт-хромовый сплав, нержавеющая сталь, никелевые сплавы

инконель 625 и инконель 718, алюминиевый сплав AlSi10Mg) на подложку, а затем материал выборочно расплавляется лазерным лучом с высокой точностью. Таким образом, слой за слоем, создается готовое изделие.

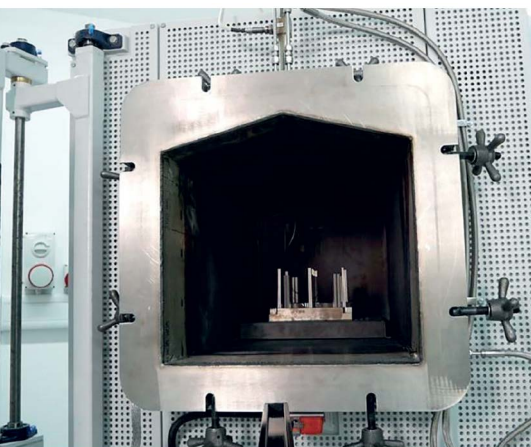
Селективная лазерная плавка подходит для производства изделий очень малых размеров, позволяя создавать геометрические формы, которые невозможно получить на станке. Толщина одного слоя может достигать 20 мкм, а до-

*Рис. 1. Печи GPCMA для термообработки в регулируемой газовой среде с максимальной рабочей температурой до 1200 °C и содержанием кислорода <30 ppm, предназначенные для снятия внутренних напряжений изделий, изготовленных методом селективной лазерной плавки*





*Рис. 2. Металлическая реторта печи GPCMA/174 с изделием, изготовленным с применением аддитивных технологий, используемая для снятия внутренних напряжений*



пуск на геометрические неровности составляет  $\pm 50$  мкм.

Сегодня скорость изготовления изделия методом селективной лазерной плавки относительно невелика, а стоимость процесса, наоборот, высока, так как для получения порошка используется шаровая мельница, а затем, для контроля качества, проводится ситовой анализ. Существующие технологии селективной лазерной плавки требуют значительных капиталовложений.

Однако если размеры изделия не превышают  $250 \times 250 \times 350$  мм, данная технология может успешно использоваться для быстрого создания опытных образцов, а также деталей сложной геометрии, которые затем будут дорабатываться на станке (сверление, нарезание пазов, фрезерование, нанесение покрытий, полирование или анодирование).

Изделия, изготовленные с использованием прямого аддитивного производства (селективная лазерная плавка), отличаются высоким уровнем внутренних напряжений, связанных с локальным нагревом/охлаждением в значительном температурном диапазоне.

Для снятия напряжений выполняется термообработка гото-

вого изделия, обязательным требованием к которой является однородное распределение температуры: изделие удерживается при строго определенной температуре в течение строго определенного времени. Условия термообработки должны контролироваться, так чтобы механические свойства изделия находились в требуемом диапазоне.

Кроме этого, термообработка должна выполняться в среде инертного газа для предотвращения окисления изделия и, соответственно, ухудшения его физико-химических свойств.

Компания CARBOLITE GERO предлагает камерные печи GPCMA общего назначения для термообработки в регулируемой газовой среде, предназначенные для снятия внутренних напряжений изделий, изготавливаемых с применением аддитивных технологий. Использование этих печей снижает эксплуатационные затраты, предотвращает окисление изделий и обеспечивает превосходную однородность температуры.

Предлагаются печи различных типоразмеров (GPCMA/37, GPCMA/56, GPCMA/117, GPCMA/174 (рис. 2), GPCMA/208 и GPCMA/245), подходящие для размещения от 1 до 4 изделий, так чтобы оптимально использовать объем рабочей камеры. Под заказ печи могут быть доработаны для соответствия требованиям стандарта AMS2750E Nadcap, класс 1, что позволяет использовать их в авиакосмической промышленности (для этого используется реторта из сплава инконель или Haynes 230).

Термообработка выполняется в среде инертного газа (как правило, азота или аргона [при работе с изделиями из титана]). В зависимости от области применения уровень кислорода можно снизить до 30 ppm.

Печи GPCMA оснащаются нагревательными элементами, раз-

мещенными под подом, в своде и стенках рабочей камеры для обеспечения однородности температуры; для измерения температуры рабочая камера оснащается термомпарами. Для управления нагревом используются контроллеры с каскадным регулированием, что значительно сокращает время выполнения цикла, особенно в сочетании с вентиляторами принудительного охлаждения.

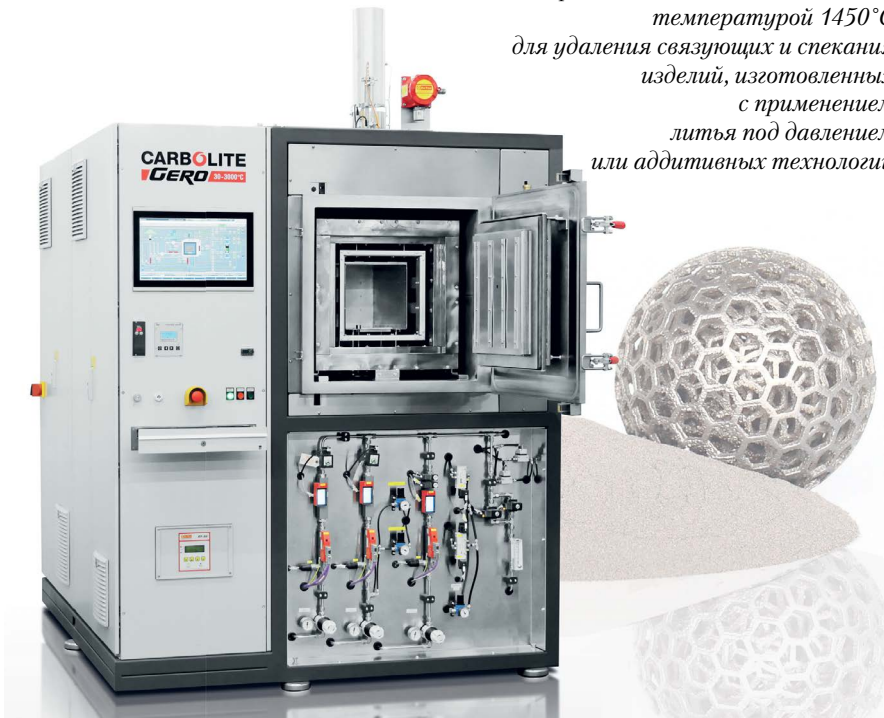
Чтобы еще больше сократить время выполнения цикла, печи GPCMA/174 оснащаются охлаждаемыми дверцами на двух петлях с предохранительным замком, чтобы загрузка и выгрузка выполнялась быстро и безопасно, а силиконовое уплотнение дверцы делает возможной термообработку в регулируемой газовой среде.

#### [Удаление связующих и спекание изделий, изготовленных с использованием литья порошков под давлением и непрямым аддитивных технологий](#)

Такие методы производства, как литье порошков под давлением и непрямым аддитивные технологии, используются для создания изделий из металла и керамики. В начале цикла порошок смешивается со связующими веществами, которые после получения первичной промежуточной отливки удаляются под действием высокой температуры, катализатора или растворителя, в процессе чего отливка несколько уменьшается в размерах. Вторичная промежуточная отливка подвергается спеканию, приобретая размеры и свойства готового изделия.

В первую очередь выполняется высокотемпературное удаление связующих, после чего в изделии остается лишь остаточное количество связующих и изделие становится очень хрупким. Следующий этап — удаление остатков связующих и спекание в одной и той же печи. В процессе удаления связу-

Рис. 3. Камерные печи НТК с максимальной температурой 1450°C для удаления связующих и спекания изделий, изготовленных с применением литья под давлением или аддитивных технологий



изготовленных с применением аддитивных технологий или литья порошков под давлением. Высокая однородность распределения температуры по всему объему рабочей камеры обеспечивает высокую точность процесса, а возможность работать в среде инертного или реакционного газа, высокого или даже сверхвысокого вакуума позволяет безопасно выполнять спекание самых чувствительных материалов. Прямоугольная форма передней дверцы значительно упрощает загрузку и выгрузку хрупких изделий, содержащих только остаточные количества связующих веществ. Печи НТК предлагаются в четырех типоразмерах: 8 л, 25 л, 80 л и 200 л.

Печи с теплоизоляцией и нагревательными элементами из вольфрама (НТК W) или молибдена (НТК MO) обеспечивают максимальную чистоту инертного газа, а также позволяют поддерживать уровень вакуума  $5 \times 10^{-6}$  мбар. При необходимости можно дооснастить печи для работы в сверх-

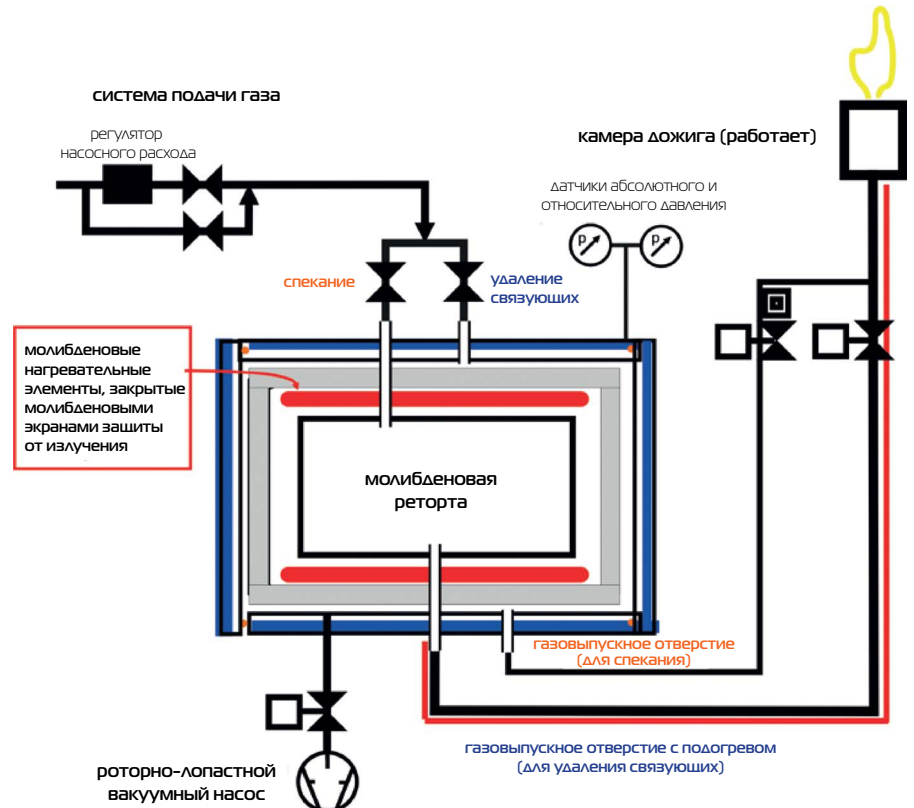
ющих необходимо отводить газы, образующиеся при термообработке, и следить за однородностью температуры, так чтобы свойства изделия строго соответствовали заявленным. Удаление связующих выполняется в среде вакуума, воздуха или инертного газа. Воздух или инертный газ могут использоваться в качестве рабочей среды для увеличения скорости потока и сокращения времени выполнения цикла.

Спекание также должно выполняться в определенной среде, и компания CARBOLITE GERO готова предложить оборудование, предназначенное для решения такой задачи. Для предотвращения окисления металлов и неоксидной керамики спекание рекомендуется выполнять в среде инертного (Ar или N<sub>2</sub>) или восстанавливающего газа (H<sub>2</sub> для изделий из нержавеющей стали). Для обеспечения высокой степени чистоты, например при спекании изделий из титана, можно выполнять термообработку в вакууме. Изделия из оксидной или нитридной керамики (оксиды алюминия и циркония, нитриды

алюминия) могут спекаться в воздушной среде.

Печи НТК (рис. 3) производства CARBOLITE GERO идеально подходят для удаления остатков связующих и спекания изделий,

Рис. 4. Схема подачи газа в реторту в процессе удаления связующих и спекания





высоком вакууме. Стандартные используемые газы: азот, аргон (для изделий из титана), водород (для изделий из нержавеющей стали), а также смеси этих газов.

Нагревательные элементы изготавливаются из тех же металлов, что и теплоизоляция. Теплоизоляция представляет собой несколько экранов защиты от излучений, изготовленных из вольфрама или молибдена, в зависимости от модели печи. Использование реторты позволяет работать в регулируемой газовой среде с высокой однородностью температуры. Максимальная рабочая температура печей НТК W составляет 2200°C, а печей НТК MO – 1600°C.

Газы, образующиеся в процессе термообработки, направляются через газовыпускное отверстие в камеру дожига. Компания CARBOLITE GERO предлагает оборудование, позволяющее выполнять спекание высокочувствительных материалов в регулируемой газовой среде (см. рис. 4).

При спекании газ подается в печь через отверстие в задней части рабочей камеры. Поскольку реторта не является полностью герметичной и давление снаружи немного выше, чем внутри, окружающий воздух будет попадать внутрь реторты. Рабочий газ, проходящий через реторту, вытесняет пары связующего, которые отводятся через газовыпускное отверстие в нижней части реторты. Отработанные газы затем направляются в камеру дожига.

Регулирование подачи газа после удаления связующих позволяет поддерживать высокую чистоту рабочей среды: газ подается через газовыпускное отверстие в левом верхнем углу реторты и выводится через газовыпускное отверстие в правом нижнем углу реторты, направляясь в камеру дожига. Поскольку количество паров связующего невелико, по-

догрев газовыпускного отверстия не требуется.

Это позволяет предотвратить возврат паров связующих в реторту во время спекания.

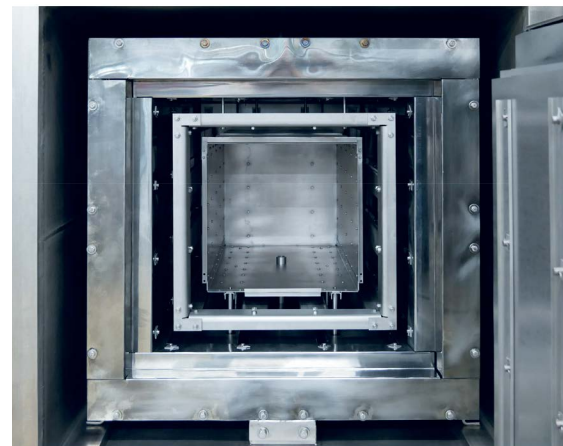
Нагревательные элементы располагаются в нижней и верхней части рабочей камеры, а также крепятся к ее стенкам, обеспечивая высокую однородность температуры. Печи с рабочими камерами большего объема оснащаются нагревательными элементами, которые крепятся к задней и передней стенкам рабочей камеры. Печи НТК имеют кожух с водяным охлаждением. Охлаждающая вода подается между двойными стенками кожуха (рис. 5).

#### Заключение

Компания CARBOLITE GERO предлагает камерные печи для снятия внутренних напряжений изделий, изготавливаемых с применением аддитивных технологий. Использование этих печей снижает эксплуатационные затраты, предотвращает окисление изделий и обеспечивает превосходную однородность температуры. Общее время выполнения цикла сокращается благодаря нагреву со всех сторон рабочей камеры, принудительной циркуляции воздуха (опция) и удобству загрузки и выгрузки через дверцу на двух петлях с водяным охлаждением и силиконовым уплотнением.

Печи НТК производства CARBOLITE GERO идеально подходят для удаления остатков связующих и спекания изделий, изготовленных с применением аддитивных технологий или литья порошков под давлением. Высокая однородность распределения температуры по всему объему рабочей камеры обеспечивает высокую точность процесса. Высочайшая степень чистоты инертного газа, а также возможность работы в высоком и даже сверхвысоком

*Рис. 5. Печь НТК с ретортой из молибдена обеспечивает максимальную степень чистоты рабочей среды и высочайший уровень вакуума.*



вакууме делает возможным спекание таких чувствительных материалов, как титан.

Под заказ компания CARBOLITE GERO готова провести испытания для подтверждения соответствия требованиям стандартов данной отрасли. ■

| Модель    | Размеры:<br>Реторта: В×Ш×Г [мм] |
|-----------|---------------------------------|
| GPCMA/37  | 205×337×538                     |
| GPCMA/56  | 229×400×610                     |
| GPCMA/117 | 279×500×840                     |
| GPCMA/174 | 428×500×815                     |
| GPCMA/208 | 428×500×970                     |
| GPCMA/245 | 650×700×1050                    |
| НТК 8     | 190×170×200                     |
| НТК 25    | 250×250×400                     |
| НТК 80    | 400×400×500                     |

**VERDER**  
scientific

ОО "Вердер Сайнтифик"  
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  
www.verder-scientific.ru

# Аддитивные технологии для композитных материалов

Федор Антонов, компания «Анизопринт», [anisoprint.ru](http://anisoprint.ru)

## Как всё начиналось

3D-печать, как известно, относится к аддитивным технологиям, к коим изначально, еще задолго до 3D, относилось и производство композитов. Компания «Анизопринт» разработала технологию 3D-печати композитом, которая совмещает две эти сферы, но и одновременно абсолютно новая для них обеих.

Прежде всего стоит поговорить об углепластике — короле композитов. Однонаправленный углепластик в несколько раз прочнее и легче алюминия, гораздо легче стали при схожих прочностных характеристиках. В свое время он был очень популярен в производстве высоконагруженных ответственных конструкций — ракетах и самолетах. Особенность в том, что его высокая прочность лежит вдоль волокон, вдоль направления армирования. В поперечных направлениях свойства гораздо ниже. Почему-то это посчитали недостатком и начали исправлять. Слои однонаправленного угле-

пластика стали укладывать друг на друга под разными углами, чтобы получить так называемый квазиизотропный ламинат, который инженеры, работающие в этой области, любят называть «черным алюминием». По свойствам он как листовой алюминий, используется примерно в таких же конструкциях: фюзеляж самолета, крыло, корпус ракеты. После того, как свойства углепластика «размазались» в разные стороны, его прочность стала примерно в 10 раз меньше, то есть приблизилась к обычному алюминию. Таким образом, все преимущества однонаправленного углепластика были потеряны, но при этом появилось много проблем, связанных с технологией, ударной прочностью, особенностями разрушения, соединениями таких узлов между собой. Из-за этого в последнем поколении гражданских самолетов было 50–60% композитов, а в следующем ожидается еще в два раза меньше. У «Боинга» была программа Dreamliner, которая как раз по этой причине стала

провальной. Углепластик пытались «исправить» и сделать «все-направленным», но ничего не получилось.

## Новый подход

Мы увидели в однонаправленности композита не недостаток, а преимущество. Из композитов очень эффективно делать сетчатые конструкции.

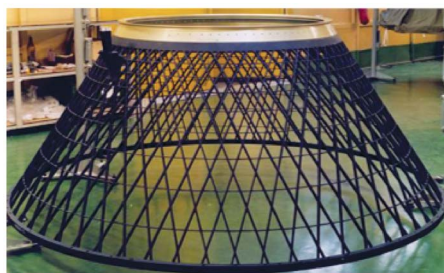
На рис. 1 изображен адаптер полезной нагрузки ракеты-носителя «Протон-М», который сделан из углепластика, но не из черного алюминия, а в виде сетчатой конструкции с ребрами определенного направления и определенной плотности.

Деталь весит около 50 килограммов и выдерживает нагрузку 200 тонн. Аналогичная деталь, сделанная из сэндвича углепластика, весит на 30 процентов больше и выдерживает меньшую нагрузку (рис. 2). Алюминиевые демонстрируют еще меньшие показатели (рис. 3).

Рис. 1. Адаптер полезной нагрузки ракеты-носителя «Протон-М»

Рис. 2. Аналог из сэндвича углепластика

Рис. 3. Аналог алюминия



В сетчатой конструкции композит работает только вдоль волокон. У него нет возможности работать поперек, поэтому все его анизотропные свойства используются наиболее эффективно.

#### Управляемая укладка волокон

Есть еще одно интересное направление помимо сетчатых конструкций, называемое fiber steering — управляемая укладка волокон. Волокна укладываются не под фиксированными углами прямолинейно, а по криволинейным траекториям таким образом, чтобы направления волокон в каждой точке соответствовали направлениям векторов главных напряжений в детали.

Рассмотрим панель фюзеляжа самолета с досмотровым отверстием, изготовленную методом автоматизированной выкладки по криволинейным траекториям. Сейчас этот метод иногда тоже называют 3D-печатью, хотя этой технологии несколько десятков лет и она давно и активно используется для изготовления деталей из композитов.

Рис. 4. Траектории укладки волокон по слоям



Были проведены сравнительные испытания таких деталей из черного алюминия (рис. 5). Файбер-стиринговая панель при том же весе и характере нагрузок выдерживает на 30 процентов большую нагрузку на сжатие (105 тонн). При этом наблюдается совершенно другой характер разрушения.

Одна из наших основных идей заключалась в том, чтобы дать возможность инженерам-конструкторам изготавливать, производить и проектировать действительно эффективные конструкции из композитов. Уходить от черного алюминия и делать так, чтобы анизотропия материала из недостатка, как многие считали, стала главным преимуществом. Мы хотели делать композиты, в которых можно произвольно управлять направлением анизотропии и степенью анизотропии в каждой точке материала.

Зная, как работает деталь, зная условия нагружения, расчетные случаи, внутренние усилия и напряжение, можно было бы в каждой точке фокусировать свойства материала именно в том направлении, в котором это нужно. Таким образом, получается целое дополнительное пространство для оптимизации. Мы можем оптимизировать не только форму деталей, но и их внутреннюю структуру.

К сожалению, традиционные автоматизированные технологии изготовления деталей из композитов не позволяют укладывать волокна произвольно в каждой точке. Тогда мы обратились к 3D-печати.

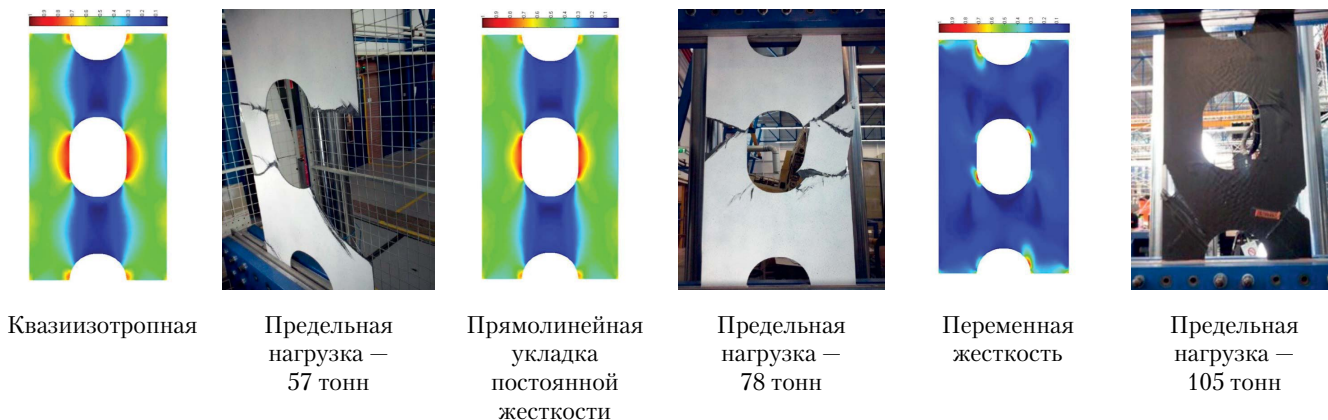
#### Композиты в мире 3D-печати

Когда мы говорим, что печатаем углепластиком, слышим, что все им печатают. Но обычно это пластик, наполненный рублеными волокнами, по сути — обычный пластик с наполнителем — изотропный материал, в котором мы никаким направлением этих волокон не управляем. Никаких свойств, даже близко приближающихся к свойствам настоящих композитов, там нет. Материал получается в два-три раза более жестким, чем обычный пластик, иногда он может быть чуть прочнее, но ничего нового с точки зрения проектирования и технологии в целом этот подход не дает. Это обычный FDM или, как в этом случае, SLS, когда мы в полиамидный порошок добавляем мелко рубленое волокно.

#### Непрерывные волокна: намотка и выкладка препрега

Кроме рубленых волокон есть интересный вариант с волокнами длинными, например — технологии ламинирования.

Рис. 5. Результаты испытаний панели фюзеляжа самолета с разными способами укладки волокон





Берутся листы заранее пропитанной термопластом углеродной ткани, так называемые «препреги». В одной зоне этот лист раскраивается по контуру слоя, возможно ультразвуком, потом в другой зоне он прикатывается, ламинируется, таким образом формируется слой. Получается чистой воды черный алюминий, только изготовленный на специальной машине. То есть это такой квазиизотропный материал, в котором есть все недостатки черного алюминия, такие как разрыв волокон и, как следствие, концентрация напряжений и краевые эффекты, которые приводят к тому, что очень слабыми местами становятся отверстия и места соединений.

Следующий шаг, чуть ближе к тому, что мы начали делать, — это экструзия термопласта с непрерывным волокном. По сути, это FDM-технология, только в процессе печати в сопло непрерывно добавляется армирующее волокно. Довольно много научных групп во всем мире занимается подобными вещами.

Здесь проблема в том, что конструкционные волокна не являются мононитью, они состоят из сотен или тысяч микронных нитей, и если мы просто добавляем это волокно в расплав вязкого пластика, он не попадает внутрь, не пропитывает волокно и не формирует композит. А в композите должно быть армирующее волокно и связующее вещество, которое соединяет все компоненты между собой, заставляя их работать вместе. В данном случае этого не происходит. Поэтому хотя прочность на растяжение может быть достаточно большой, на сжатие никаких особых характеристик в таких материалах нет. Если смотреть на микроскопию, внутри очень много пор между волокнами.

Второй подход, чуть более удачный, так называемая «выкладка препрега» — это когда мы

берем то же самое волокно, например, углеродное или стеклянное, и заранее, на специальной установке, пропитываем его вязким пластиком под большим давлением либо вымачиваем в растворе и потом выпариваем и протягиваем через фильеру. То есть мы пытаемся заранее поместить этот вязкий пластик внутрь волокна. На выходе получаем пропитанную нить, которая традиционно в композитной отрасли называется препрегом. Это полуфабрикат для изготовления композита. И дальше мы этот «препрег» через сопло разогреваем и экструзией или выкладкой формируем деталь.

Наверное, самый известный пример в мире 3D-печати непрерывным волокном (выкладки препрегов) — это довольно давно предлагаемые системы американской компании Markforged. В этих системах тоже присутствует заранее пропитанное нейлоном углеродное волокно и сопло, в котором оно разогревается и которым выкладывается. Кроме того, есть еще дополнительное сопло для печати просто пластиком. У принтеров Markforged достаточно хорошие характеристики. Прочность уже выше 700 мегапаскалей. Есть выбор типов армирующих волокон. Но, судя по множеству исследований микроструктуры этих материалов, там содержится очень большое количество пор. Возможно, это объясняется недостаточной пропиткой или свойством нейлона набирать воду и вскипать при печати.

#### Технология коэкструзии (composite fiber co-extrusion — CFC)

В отличие от описанных методов, в технологии «Анизопринт» мы заранее пропитываем волокно, но не термопластом, а реактопластом, что позволяет обеспечивать более качественную, более дешевую, более надежную про-

питку. Этот процесс называется коэкструзией.

Так как такое волокно уже расплавить нельзя, в процессе печати мы к нему добавляем отдельно пластик. И на выходе получается двухматричный композит, в котором внутри волокна у нас есть нерасплавляемый реактопласт, который обеспечивает пропитку волокна, а между волокнами — термопласт, который их связывает.

В нашем случае пластик может быть любым. Если нужен негорючий пластик, или цветной, или пластик со стойкостью к определенным химическим или температурным воздействиям или окружающей среде, — вы можете выбрать тот, который вам подходит. Все основные поверхностные свойства материала определяются именно связующим — матрицей.

За счет того, что волокно и пластик подается отдельно в один экструдер, можно в каждой точке локально менять объемную долю волокна и пластика. Мы можем подавать меньше пластика — тогда у нас увеличивается объемная доля волокна, можем подавать больше пластика — тогда она уменьшается. Можно подобрать оптимальные для предполагаемых нагрузок значения, не тратя больше материала, чем нужно, и не повышая вес детали.

Мы можем управлять степенью анизотропии и, что более важно, печатать сетчатые конструкции с пересечениями волокон внутри одного слоя. То есть можно укладывать армирующие волокна друг на друга, под любыми нужными углами, в пределах каждого слоя индивидуально. При этом у нас не растет толщина слоя в месте пересечения, у нас изменяется только объемная доля волокон в этом самом месте.

Благодаря такой технологии мы получаем материал в десятки раз прочнее пластика, прочнее и легче металлических аналогов с такими же свойствами. Важный

Рис. 6. Схема печати по технологии CFC

## «АНИЗОПРИНТ»: ТЕХНОЛОГИЯ CFC

1.



Сухое волокно

+ РЕАКТОПЛАСТ =



Композитное (твердое) волокно

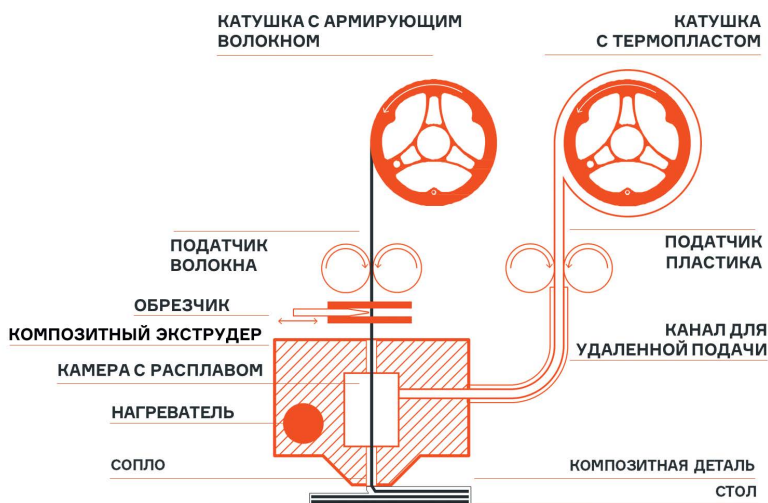
### КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ «АНИЗОПРИНТ»

- Композитное углеволокно (CCF)
- Композитное базальтовое волокно (CBF)



2.

### В процессе печати — КОЭКСТРУЗИЯ:



### РЕЗУЛЬТАТ

**ДВУХМАТРИЧНЫЙ КОМПОЗИТ**

- До 20 раз прочнее пластика
- До 7 раз легче стали
- До 2 раз прочнее и легче алюминия

для многих компаний и будущего технологии момент: помимо выдающихся свойств материала конечные детали получаются еще и более дешевыми, чем их аналоги из других материалов. Внедрение технологии «Анизопринт» позволяет существенно сократить издержки производства, при этом получая не менее (а часто и более) эффективную замену во множестве сфер от оснастки на производственных линиях до деталей корпусов самолетов и автомобилей.

### Применение

У технологии «Анизопринт» множество сфер применения: от авиации до потребительских товаров. При массовом внедрении практически любая компания в мире могла бы уменьшить издержки производства. Посмотрим на более близкий к жизни пример из сферы производства повседневных товаров.

На производственную линию молочного бренда нужен поршень для формирования стаканчиков для йогурта. Когда оригинальная деталь из фрезерованного полиамида подвергается разрушению,

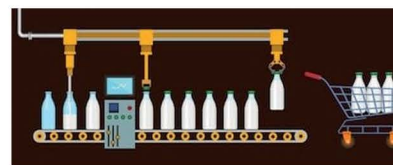
Рис. 7. Пример замены поршня для производственной линии молочного производства

## ПОРШЕНЬ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ МОЛОЧНОГО БРЕНДА

✓ Снизил время простоя производства с 3 месяцев до 24 часов

Цели:

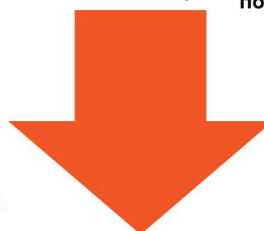
- снизить время простоя производства
- увеличить срок службы поршня, чтобы менять деталь реже



Время, необходимое для замены детали, — в течение этого времени производственная линия **ПОЛНОСТЬЮ ОСТАНАВЛИВАЕТСЯ**

3 МЕСЯЦА

Фрезерованный полиамид



24 ЧАСА

PETG + CCF (композитное углеволокно)



замену нужно заказывать в сторонней компании и ждать 3 месяца. В это время производственная линия останавливается: компания несет убытки из-за остановки в производстве продукта. Увеличить срок службы и сократить время простоя производства можно, заменив деталь на напечатанную на 3D-принтере Anisoprint Composer. Поршень из композитного углеволокна печатается за сутки, сокращая время простоя производства с 3 месяцев до 24 часов (рис. 7).

Одна из особенностей — при печати на Anisoprint Composer можно выбирать, какой пластик использовать в качестве связующего (PETG, ABS, PC, PLA, Nylon и т.д.). Технология коэкструзии предполагает армирование пластика прямо в процессе печати, а не до этого, как в других случаях. Таким образом, можно получать материал с особыми свойствами, необходимыми для конкретной ситуации и сферы. Например, для производственной линии, где детали промываются перекисью, мы напечатали вилку с использованием пластика PETG — устойчивого к перекиси (рис. 8).

Вилка передвигается на валу по производственной линии, цепляет бутылочку и увозит в зону промывки, деталь промывается перекисью. Оригинальная деталь из фрезерованного полиамида изготавливается на заказ в течение 3 месяцев. В это время производственная линия останавливается, из-за чего компания несет убытки. Деталь заменили на напечатанную из устойчивого к перекиси PETG, армированного композитным углеволокном. Время печати составило 6 часов — время простоя производства сократилось на несколько месяцев. Кроме того, благодаря устойчивости к перекиси увеличился срок службы вилки.

Три продукта — одно решение

### ПО

Подготовить 3D-модель, задать схему армирования и объемную долю армирующих волокон в разных частях детали можно с помощью разработанного в «Анизопринт» программного обеспечения — слайсера «Ауры». В нем можно управлять армированием, задавать пластиковый пе-

риметр и пластиковое заполнение, композитные периметры, композитное заполнение, поддержки — весь функционал обычного слайсера + функционал для работы с армирующим волокном.

Хранение, обработка и запуск печати полностью автоматизированы и производятся с **локального компьютера**, что обеспечивает конфиденциальность и безопасность данных разрабатываемых моделей.

### Материал

Для армирования применяется созданное в «Анизопринте» композитное волокно. Изначально было доступно только углеволокно, недавно компания объявила о появлении композитного **базальтового** волокна. Детали из последнего получаются еще более дешевыми при схожих прочностных характеристиках: в 15 раз прочнее пластика, в 5 раз легче стали, в 1,5 раза прочнее и легче алюминия. Композитное базальтовое волокно отлично подойдет для производства корпусных токонепроводящих элементов — базальт радиопрозрачен.

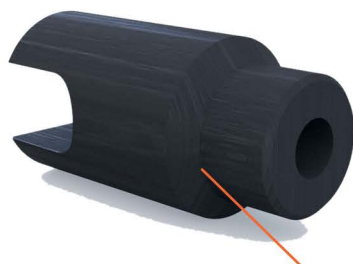
Рис. 8. Пример замены детали «вилка» для молочного производства

## ВИЛКА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ МОЛОЧНОГО БРЕНДА

- ✓ Снизил время простоя производства с 3 месяцев до 6 часов
- ✓ Получили деталь, стойкую к перекиси, — увеличили срок службы

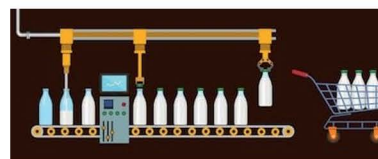
### Цели:

- снизить время простоя производства
- увеличить срок службы вилки для более редких замен — получить деталь, стойкую к перекиси



УСТОЙЧИВО К ПЕРЕКИСИ

Время, необходимое для замены детали, — в течение этого времени производственная линия **ПОЛНОСТЬЮ ОСТАНАВЛИВАЕТСЯ**



3 МЕСЯЦА

Фрезерованный полиамид

6 ЧАСОВ

PETG (пластик, стойкий к перекиси) + CCF (композитное углеволокно)



Рис. 9. Проектирование с помощью ПО «Аура»

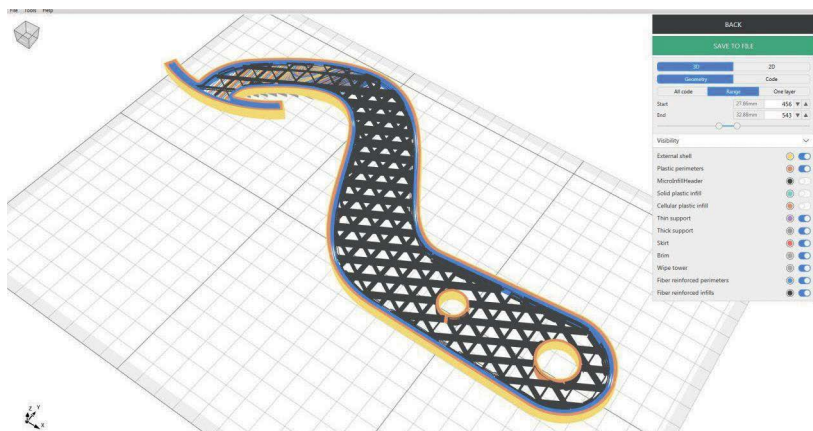


Рис. 10. Принтер Anisoprint Composer



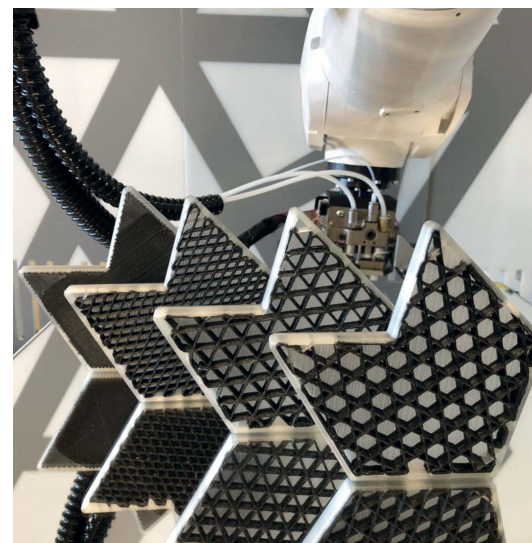
Рис. 11. Печатная головка «Анизопринт» на работе «Кука»



Рис. 12. Способы армирования по технологии CFC (слева направо, сверху вниз): сплошное заполнение, армированные периметры, ромбическое армирование, изогридное армирование, анизогридное армирование



Рис. 13. Разные типы заполнения углепластиком по технологии CFC



### Принтеры

Печать осуществляется на принтерах Anisoprint Composer (рис. 10, 11), сейчас доступны две модели: A3 с объемом области печати 420×297×210 мм и A4 (297×210×147 мм).

Главным преимуществом машин «Анизопринт» является возможность печатать сетчатые структуры, что в конечном итоге снижает вес детали, а как следствие, время и стоимость производства (рис. 12, 13).

Несмотря на множество неоправдавшихся ожиданий от ад-

дитивных технологий, эра 3D-печати все же придет — у нас как у общества совершенно нет шансов этого избежать. Преимущества перед традиционным производством очевидны, так что нужно лишь работать над изучением и внедрением аддитивных технологий. Применение найдется для различных подходов: композитов, металлов и пластиков, но способ, которым мы проектируем и производим вещи, изменится. И это будет более естественный и эффективный путь. ■

# Девять шагов к созданию аддитивного центра на предприятии

Семен Попадюк, главный редактор блога iQB Technologies, [blog.iqb.ru](http://blog.iqb.ru)

Ваше производственное предприятие, лаборатория, конструкторское бюро или НИИ уже получило общее представление о возможностях аддитивных технологий и рассматривает вопрос их внедрения? В этой статье мы расскажем, какие факторы следует принять во внимание при организации центра аддитивных технологий в компании, с чего начать, какие технологии выбрать исходя из конкретных задач, как подобрать и обучить специалистов.

Прежде всего:

## 1. Определяем отрасли и типы предприятий, где аддитивные технологии будут незаменимы.

Самые перспективные отрасли для внедрения 3D-печати — те, где в приоритете оптимизация или создание новых типов изделий: авиационно-космическая, атомная и нефтегазовая промышленность, машиностроение, энергетика, судостроение, а также автомобилестроение, архитектура, медицина. На производствах с литьем и металлообработкой 3D-принтеры станут эффективным решением при создании литейных моделей, прототипов и оснастки.

Трехмерное сканирование и моделирование найдут применение везде, где выполняются контроль качества и обратное проектирование (раздел 4).

3D-технологии востребованы в следующих организациях:

- конструкторские и опытно-экспериментальные бюро при предприятиях, разрабатывающие новые виды продукции;
- технологические центры с опытным производством;
- научно-исследовательские институты и центры;
- университеты, напрямую работающие с производственными компаниями.

## 2. Как понять, нужны ли вообще 3D-технологии вашему предприятию?

Инновации имеет смысл применять там, где они приносят выгоду. Перед тем, как принимать решение, важно учесть:

- нет универсальной аддитивной технологии, которая бы могла

с максимальной эффективностью решить все производственные задачи;

- у каждой 3D-технологии есть преимущества и недостатки;
- при выборе 3D-принтера и/или 3D-сканера нужно исходить из поставленных задач.

3D-печать на сегодня не претендует заменить традиционные методы. Аддитивное производство интегрируется в существующий производственный процесс и предлагает решения, зачастую недоступные традиционным технологиям, с целью сократить производственный цикл и, как следствие, значительно сэкономить время и издержки.

Основной момент, который следует принять во внимание: 3D-печать подходит только для

*В 2018 году на территории предприятия ОДК — Московского машиностроительного предприятия им. В.В. Чернышева началось создание высокотехнологичного Центра аддитивных технологий/Фото: rostec.ru*





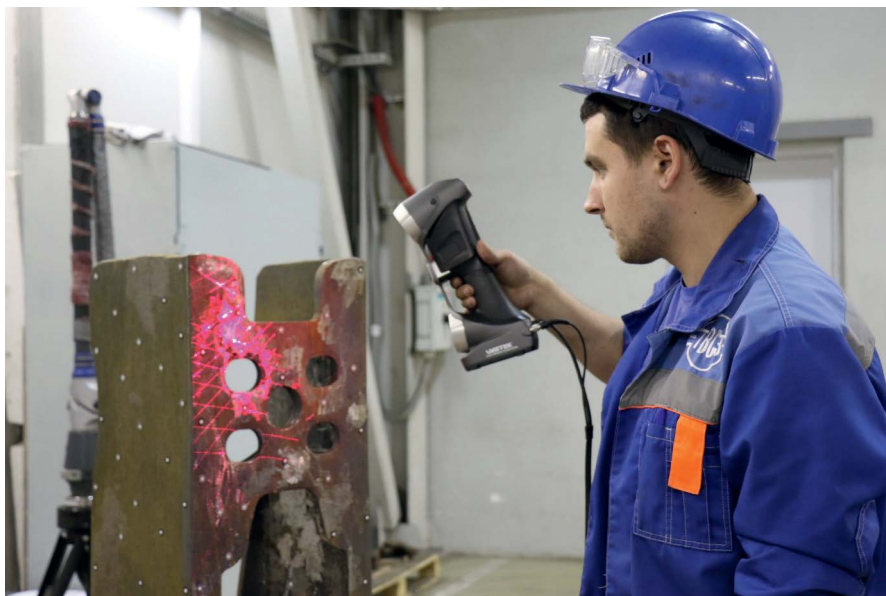
опытного, экспериментального или мелкосерийного производства. Она потребуется вашему предприятию, если поставлены следующие цели:

- разработка и производство нового продукта с уникальными свойствами;
- НИОКР;
- прототипирование, тестирование, отработка технологических решений;
- оптимизация/модернизация изделий, возможная только средствами аддитивных технологий (сложная геометрия, снижение веса, тонкие стенки, внутренние каналы и т. п.).

Отдельным ограничением может стать размер камеры построения 3D-принтера (это зависит и от технологии, и от производителя).

Если традиционные методы обеспечивают желаемую производительность, если не требуется разрабатывать новую продукцию, оптимизировать их конструкцию и улучшать характеристики изделий, — организовывать аддитивный центр нецелесообразно.

*Разметчик модельного цеха Тихвинского вагоностроительного завода Даниил Жидков создает трехмерную модель отливки при помощи 3D-сканера Creafort HandySCAN 3D. Этот портативный 3D-сканер позволяет создать модель детали, когда под рукой нет размеров и чертежей, что значительно облегчает работу конструкторов/Фото: tvsz.ru*



*На базе Самарского университета создан центр гибридных аддитивных технологий, где применяется технология селективного лазерного сплавления с последующей механической, электрохимической и термической обработкой/Фото: sgpress.ru*



### 3. Подбираем технологию 3D-печати под определенные задачи

Выбор аддитивной технологии всецело зависит от того, что вы хотите получить на выходе. Вам потребуется учесть следующие параметры: размер изделия, точность печати, прочность и дол-

говечность продукта, назначение (прототип, демонстрационная модель или готовое изделие).

Рассмотрим основные аддитивные технологии и используемые материалы, их основные преимущества и недостатки (таблица 1).

Таблица 2 поможет выбрать технологию 3D-печати применительно к производственным задачам. Возможно, вам потребуется несколько аддитивных установок, работающих по разным технологиям.

### 4. Вам также понадобится 3D-сканирование

3D-сканер и программное обеспечение для обработки полученных данных — необходимые инструменты для современного предприятия. 3D-сканирование может использоваться на любом этапе управления жизненным циклом продукта, позволяет сократить время и расходы на этапе разработки и ускорить выпуск продукта на рынок.

С помощью 3D-сканера и специализированного ПО вы сможете гораздо эффективнее решать следующие задачи:



Таблица 1.

| Технология   | Расходные материалы  | +   | -  |
|--|--|---|--|
| <b>SLA</b><br>(лазерная стереолитография)              | Фотополимеры   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Самая высокая прочность моделей;</li> <li>один из лучших показателей точности;</li> <li>идеальное качество поверхности изделий;</li> <li>возможность построения моделей сложной формы и структуры;</li> <li>быстродействие 3D-принтеров;</li> <li>большой объем рабочей камеры (до 2,4 м);</li> <li>выращенный из пластика прототип можно использовать как готовое изделие.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Крупные первоначальные инвестиции;</li> <li>особые требования к помещению и условиям эксплуатации;</li> <li>необходимость в обучении технического специалиста.</li> </ul>   |
| <b>SLM</b><br>(селективное лазерное плавление)         | Металл   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Печать конечных изделий;</li> <li>высокая точность, плотность и повторяемость изделий;</li> <li>возможность печати уникальных сложнопрофильных объектов, в том числе мельчайших деталей и изделий с внутренними полостями (размер до 500 мм);</li> <li>уменьшение массы изделий;</li> <li>экономия материала (отходы составляют 0,5%);</li> <li>сокращение цикла НИОКР;</li> <li>требуется минимальная механическая обработка, нет необходимости использовать дорогостоящую оснастку.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Самая дорогостоящая аддитивная технология;</li> <li>особые требования к помещению и условиям эксплуатации;</li> <li>сложность в интеграции 3D-решений в традиционные технологические процессы;</li> <li>необходимость в обучении технического специалиста.</li> </ul> |
| <b>SLS</b><br>(селективное лазерное спекание)          | Полистирол, полиамид, нейлон и др. пластики, керамика, стекло, композитные материалы, песчаные составы | <ul style="list-style-type: none"> <li>Отличные механические характеристики напечатанных моделей (полиамид – один из самых прочных пластиков);</li> <li>большое разнообразие материалов;</li> <li>высокая скорость печати;</li> <li>возможность создавать изделия сложнейших форм и фактур;</li> <li>большой размер камеры построения (до 1 м);</li> <li>печать как прототипов, так и конечных изделий для узлов и элементов.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Высокая стоимость оборудования и материалов;</li> <li>необходимость обработки шероховатых или пористых поверхностей напечатанных на 3D-принтере изделий;</li> <li>особые требования к помещению и условиям эксплуатации.</li> </ul>                                   |
| <b>FDM</b><br>(метод послойного наплавления материала) | Термопластики  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Самая доступная технология 3D-печати;</li> <li>высокая скорость построения;</li> <li>возможность печатать крупные объекты (до 2 м).</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Наибольшая шероховатость поверхности (качество зависит от диаметра сопла и от расходных материалов);</li> <li>риск растрескивания пластика;</li> <li>повышенная чувствительность к перепадам температур.</li> </ul>   |
| <b>MJP/MJM</b><br>(многоструйная 3D-печать)            | Воск   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Высокая скорость печати;</li> <li>максимальная детализация и точность построения (до 14 микрон);</li> <li>простота эксплуатации аддитивных установок;</li> <li>возможность непрерывной работы.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Преимущественно функциональное прототипирование;</li> <li>дорогостоящий расходный материал;</li> <li>модели уязвимы к солнечному свету.</li> </ul>  |
| <b>MJP/MJM</b><br>(многоструйная 3D-печать)            | Фотополимеры   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Высокая скорость печати;</li> <li>многообразие модельных материалов с различными свойствами;</li> <li>превосходные физико-механические свойства готовых моделей и прототипов;</li> <li>простота эксплуатации аддитивных установок.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Преимущественно функциональное прототипирование;</li> <li>модели уязвимы к солнечному свету.</li> </ul>   |

• контроль геометрии изделий и оснастки, входной и выходной контроль;

• реверс-инжиниринг для модернизации, ремонта, восстановления деталей;

• получение CAD-модели.

Устройства 3D-сканирования обеспечивают точность в диапазоне 20–50 микрон на метр. Если такие параметры точности вас не устраивают, продолжайте ис-

пользовать координатно-измерительные машины. Однако в плане скорости измерений, портативности и стоимости трехмерные сканеры оставляют КИМ далеко позади.

Таблица 2.

| Задача   | Технология             |
|--|------------------------|
| Функциональное прототипирование и тестирование   | SLA, SLS, MJP, FDM     |
| Макетирование, изготовление демонстрационных образцов  | SLA, SLS, FDM          |
| Проверка эргономики, проверка изделий на собираемость  | SLA, MJP / фотополимер |
| Изготовление конечных изделий из пластика  | SLA, SLS, FDM          |
| Изготовление готовых металлических деталей агрегатов и узлов и сложных конструкций (в том числе когда стоит задача оптимизации изделия — снижение веса, объединение детали из нескольких элементов в цельнометаллическую и т.д.) | SLM                    |
| Создание мастер-моделей для литья по выплавляемым моделям, форм для технологической оснастки   | SLS, MJP / воск        |
| Создание мастер-моделей для литья по выжигаемым моделям  | SLA, MJP / фотополимер |
| Быстрое изготовление оснастки  | SLA, FDM               |
| Проведение экспериментов   | SLA, MJP / фотополимер |

*Рыбинское предприятие «ОДК-Сатурн», входящее в Объединенную двигателестроительную корпорацию, активно применяет аддитивные технологии в процессе производства газотурбинных двигателей./Фото: rostec.ru*



## 5. Планируем бюджет

Цены на аддитивные установки колеблются в диапазоне от полутора тысяч евро (FDM) до нескольких миллионов евро (SLM), на 3D-сканеры — от 20 до 130 тысяч евро.

Окончательная стоимость принтера зависит от выбранной конфигурации оборудования и многих других факторов, поэтому на начальном этапе организации аддитивного центра цифры назвать затруднительно.

Кроме того, нужно принять во внимание сопутствующие рас-

ходы (материалы для 3D-печати, дополнительное оборудование, потребление электроэнергии и пр.).

## 6. Проверяем, как работают 3D-технологии, прежде чем приобретать оборудование

Хотите предварительно проверить решение ваших задач?

В центрах быстрого прототипирования вы можете заказать тестовые услуги 3D-печати фотополимерами, металлом, воском и гипсом, а также 3D-сканирования и 3D-моделирования.

## 7. Дополнительное оборудование

В зависимости от типа аддитивной установки может потребоваться дополнительное оборудование. Например, для SLA-принтеров понадобится УФ-камера, где готовое изделие доотверждается. Самое сложное оборудование — металлические 3D-принтеры, для которых необходимы:

1. муфельная печь для снятия остаточного напряжения металла;
2. дреммель, ленточная пила или электроэрозионный станок для удаления поддержек;
3. дробеструйная или пескоструйная камера для постобработки изделия и улучшения качества поверхности.

## 8. Особые требования к эксплуатации 3D-принтеров

К помещениям и условиям эксплуатации могут предъявляться особые требования, к примеру, подвод нужного количества электроэнергии и кондиционирование. Самые строгие требования касаются установок 3D-печати металлами — необходимо соблюдать технику безопасности (обеспечивать герметичность при эксплуатации машины, работать в защитной спецодежде) в связи с опасностью металлических по-

рошков, которые спекаются в среде инертного газа.

Приведем пример стандартных требований к металлическому 3D-принтеру:

- напряжение 3 фазы 380 В, рабочий режим потребления 7 кВт, в пике до 12 кВт;
- подвод инертного газа к машине (3–5 баллонов);
- система кондиционирования в помещении (от 18 до 23°C), оптимально — в режиме осушения воздуха;
- компрессор либо линия с подводом сжатого воздуха 4 атмосферы;
- техническая вода для промывки фильтров и изделий.

## 9. Готовим специалистов центра аддитивных технологий

Сотрудники аддитивной лаборатории — это конструктор и оператор 3D-принтера, их число зависит от состава оборудования и объема работ. Если для профессиональных установок 3D-печати достаточно одного оператора, то для промышленных (SLA, SLS, SLM) потребуется минимум двое

обученных специалистов, поскольку стоимость простоя такого оборудования очень высока.

Оптимально, если оператор и конструктор будут разными людьми. Конструктор проектирует изделия для аддитивного производства в специализированном ПО и понимает, как применить соответствующие методы, а оператор — скорее технолог, он воплощает видение конструктора в готовое изделие. При этом оператор 3D-принтера должен быть творческой личностью, специалистом с высшим техническим образованием, который любит учиться и увлечен инновациями. Высокого качества печати можно добиться, грамотно подобрав настройки принтера. Это может быть достаточно сложной задачей: в SLM-машинах, например, 170 открытых параметров, которые можно менять в процессе построения.

Например, в нашем учебном центре вы можете пройти обучение работе на промышленных 3D-принтерах за 3–4 дня. Также доступны программы обучения по 3D-сканированию и основным

программным продуктам для обработки данных сканирования (Geomagic Control X/Design X/Wrap) и подготовки моделей к печати (Materialise Magics). Есть и расширенные комплексные программы длительностью до 12 дней.

## Заключение

Мы выяснили, что 3D-печать подходит только для опытного, экспериментального или мелкосерийного производства преимущественно в высокотехнологичных отраслях. Аддитивные технологии позволят оптимизировать производственный процесс при разработке новых видов продукции или усовершенствовании текущего ассортимента, создании прототипов и оснастки. 3D-сканирование дает возможность сократить время и расходы на этапе разработки при выполнении задач контроля качества и реверс-инжиниринга.

Материалы об актуальных 3D-решениях читайте в блоге [iqb.ru](http://iqb.ru) ■



*Металлические изделия, напечатанные на аддитивных установках SLM Solutions (стенд iQB Technologies на выставке «Металлообработка-2019») / Фото: iQB Technologies*





# Аддитивные технологии в российской стоматологии: мнение практикующего врача

Станислав Загорский

По публикациям в «Фейсбуке» в профильных группах по стоматологии, из 10 пользователей 3D-технологий 7 — из США, 2 — из Южной Америки, 1 — из Старого Света, где Россия практически не представлена, буквально 1–3 человека, и то, как правило, это не врачи-стоматологи, а зуботехнические лаборатории. Безусловно, 3D-технологии развиваются семимильными шагами, и то, что мы еще 2–3 года назад только мечтали бы увидеть, сейчас уже вовсю используется в практике.

Сейчас есть возможность предварительно в программу загрузить КТ челюстей, фото лица, оптические слепки челюстей и в программе смоделировать весь ход операции по имплантации зубов, начиная от предварительного планирования, моделирования хирургического шаблона, изготовления опорных элементов и непосредственно самих зубов, затем все это изготовить и в одно посещение установить имплантаты и коронки в полости рта. Активно этим занимается фирма Zirkonzahn, ее представитель в России — лаборатория Риком. Однако говорить о массовом распространении 3D-технологий у нас рановато, прежде всего из-за высокой стоимости хорошего, качественного оборудования, программного обеспечения и самое главное — косности нашего мышления. Пока 3D-технологии не преподаются в наших вузах на регулярной основе, они остаются уделом фанатов и энтузиастов. Например, последние два года я занимаюсь изготовлением хирургических шаблонов для имплантации, стоимость шаблона колеблется в пределах 20\$, что совсем незаметно на фоне стоимости самой операции, но безусловно повышает точность и прогнозируемость. Но практически никто из мои знакомых этим не заинтересовался — зачем, у нас рука и так набита. Единственные из стоматологов, кто активно старается этим пользоваться, — врачи-ортодонты. Печать моделей, изготовление кап для выравнивания зубов у многих уже поставлено на поток. Протезирование зубов — непаханое поле для внедрения 3D-технологий. В целом было бы интересно посмотреть статистику по распространению цифровых технологий и оборудования в России, думаю, что 85% — это Москва и Санкт-Петербург, в других же регионах основная масса работ — литье конструкций. Да и штампованные конструкции, придуманные более 100 лет назад, никуда не делись из нашей жизни.

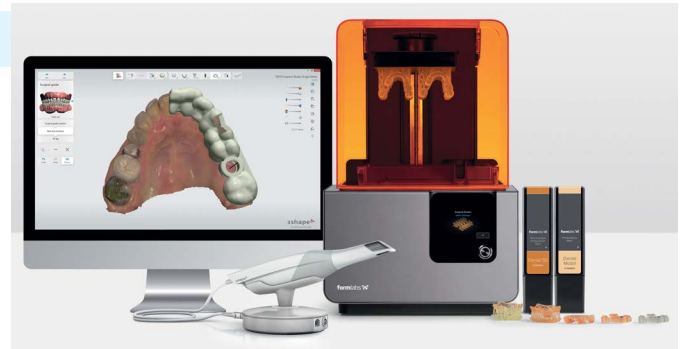


Рис. 1. Оборудование и материалы для 3d печати FormLabs

Хочу отметить, что программное обеспечение постоянно развивается и совершенствуется, но все упирается в ограничения непосредственно самого оборудования для 3D-печати. FDM-принтеры в силу особенностей технологии, а именно слоистости получаемой поверхности, мало подходят для каких-либо точных конструкций. Заявленная точность в 20 микрон сильно зависит от материала и диаметра сопла, а также непосредственно от шаговых двигателей и на практике приближается к 100 микронам. Для печати каких-либо высокоточных работ они не подходят, но отлично справляются с печатью вспомогательных вещей. По собственному опыту: слепочные ложки, хирургические шаблоны получаются вполне качественными и удобными в работе. Для точных работ, таких как печать моделей, хирургических шаблонов, лаборатории покупают FormLabs (рис. 1). Ему на пятки наступают китайцы со своими DLP принтерами, которые являются более интересным предложением с коммерческой точки зрения. Но на 3D-принтерах мы печатаем вспомогательные материалы, для печати конструкций для долговременного ношения в полости рта нет материалов. Здесь царствуют фрезерные станки, которые обеспечивают точность фрезерования в 5 микрон (по заявлению производителя). Уже давно и успешно фрезеруются металлические балки, каркасы, абатменты из титана. Для коронок используют блоки из диоксида циркония и РММА для временных работ. Они полностью подходят для использования в полости рта. Однако и здесь есть свои нюансы, которые выясняются уже на практике.

Но в целом это многообещающее направление, которое с растёт каждым годом и занимает все большее место на рынке. Уверен, что со снижением цены и, в первую очередь, изменением мышления врачей-стоматологов перспективы очень даже оптимистические! ■

# АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ХИРУРГИИ И ОРТОПЕДИИ

Н.М. Максимов, ООО «Ника-Рус»



Следующим по значимости и объему после промышленности является применение аддитивных технологий в медицине, на долю которой приходится 17% всего рынка аддитивного производства (АМ).

В реальности существующий уровень использования АМ в медицине пока еще довольно мал, но перспективы его роста огромны. Для этого необходимо внедрять специальный дизайн для АМ в разные сектора производства медицинских изделий, заниматься поиском новых материалов и согласованием новых решений с регулируемыми требованиями. И обязательное условие — это продвижение готовых решений через сети дистрибуции и получение отзывов от конечных потребителей и клиентов.

Наиболее широкое применение АМ нашли в стоматологии для изготовления различного рода реставраций, брекетов, вспомогательных элементов и инструментов. Подробно эта тема изложена в [1]. Отдельно следует выделить использование АМ в биотехнологиях, поскольку последние охва-

тывают помимо регенеративной медицины (выращивание тканей и органов для пересадки) огромную сферу искусственных продуктов питания и прежде всего мяса. Другое важное направление, о котором пойдет речь в этой статье — развитие АМ для хирургических и ортопедических целей. По данным Stryker (США, Мичиган, <http://stryker.com>), в 2018 г. услуги и инновационные продукты в ортопедии, хирургии, нейротехнологиях для позвоночника составили: 13,6 млрд USD — продажи, 36000 работников, 7784 патента, 862 млн USD — затраты на исследования и разработки. Большие возможности появляются с использованием моделирования. Так, школа для слепых и слабовидящих в Индиане (США) использует АМ-технологии для тактильного обучения студентов [2] на моделях. И конечно, это изготовление хирургических инструментов, шаблонов и медицинских приборов.

## Развитие хирургии

В 2016 г. FDA одобрила применение 85 разных типов имплантатов, изготовленных с помощью АМ-технологий, за 2018 год это количество выросло [3].

В целом можно сказать, что имплантаты сохраняют свою традиционную форму и функции, а вот технологии их изготовления и внедрения меняются стремительно. В частности, все шире

применяются в хирургии роботизированные системы, системы визуализации, дополненной реальности — как для обучения и планирования операций, так и при выполнении самих операций. Для производства имплантатов используются в основном технологические процессы АМ (по приоритету): соединение порошка в ванне (powder bed fusion, PBF), лазерное сплавление (selective laser melting, SLM), лазерное спекание (laser sintering, SLS), сплавление электронным пучком (electron beam melting, EBM) — [3]. Основное преимущество использования АМ для производства имплантатов — возможность изготавливать сложные сетчатые изделия с меньшим весом, с меньшими затратами в сравнении с традиционными методами. В дополнение АМ позволяет создавать пористую структуру на поверхности имплантата для быстрой остеоинтеграции костной ткани, а также пористую (губчатую) структуру — аналог реальной ткани кости — внутри имплантата.

В 2016 г. компания Smith & Nephew представила свою пористую чашку REDAPT Acetabular с технологией CONCELOC, первым титановым имплантатом ТБС, отпечатанным на 3D-принтере. Полностью пористая структура имплантатов имитирует структуру кости, что обеспечивает быструю остеоинтеграцию и лучшую фиксацию имплантата.

Вслед за Smith & Nephew

Stryker запустил свой первый 3D-отпечатанный тазобедренный имплантат — ацетабулярную систему Trident II в марте 2018 года. Имплантат также имитирует структуру кости и обещает многочисленные клинические преимущества, такие как улучшение стабильности сустава и диапазона движений. В 2017 г. DePuy Synthes приобрела технологию 3D-печати у Tissue Regeneration Systems. Имплантаты, изготовленные по AM-технологии, предполагают более прогрессивные бесцементные методы фиксации. Хотя в Европе применяют более консервативный гибридный подход — используют оба метода фиксации. Преимуществом цементной фиксации является более низкая стоимость имплантата, а также их исключительная применимость в случаях слабой структуры костей или их недостаточности. В то же время большим недостатком цементной фиксации является деградация цемента со временем, что приводит к потере имплантата, а также негативное воздействие материала цемента на окружающие ткани.

Требования к материалу имплантатов помимо высоких механических свойств включают биосовместимость с тканями человека и остеоинтеграцию, например, с костной тканью. Лучшие материалы для металлических имплантатов — это титан и его сплавы (Ti-6Al-4V), сплав кобальт-хром и нержавеющие стали (316L). Для более быстрого врастания костной ткани в имплантат на его поверхности создается при печати специальная пористая структура или решетка [4]. Также популярны полимерные материалы — полиэтилен сверхвысокой молекулярной массы (СВМПЭ/УНМВРЕ), полиэфирэфиркетон (ПЭЭК/РЕЕК) и цирконий. Для более быстрого прорастания костной ткани в имплантаты из пластика (РЕЕК)

на их поверхность наносят в вакууме плазменное пористое покрытие из титанового сплава.

Реальное AM-производство и медицина взаимно дополняют друг друга в выборе наилучших решений с точки зрения исследований и получения прибыли, как, например, точность изготовления имплантатов, высокие механические свойства, отсутствие вредных примесей, новые материалы, стерилизация изделий. И здесь, конечно, ведущую роль играют гиганты рынка медицинских изделий: компании Stryker, DePuy Synthes, Smith & Nephew, которые в состоянии проводить дорогостоящие исследования и разработки новых изделий с использованием преимуществ AM. Вместе с тем растет число небольших компаний, специализирующихся на разработке и производстве нишевых материалов и изделий для ортопедии.

Рынок производителей имплантатов ежегодно растет, что связано как с созданием нормативных требований, предъявляемых к материалам, так и появлением минимально инвазивных процедур и навигационных систем. Кроме того, нет необходимости иметь на складе большие запасы имплантатов разных размеров, поскольку имеется база 3D-файлов таких изделий, и их можно напечатать на 3D-принтере в нужное время.

Новые AM-технологии с более эффективными операциями и коротким временем восстановления приводят к сдвигу операций от стационара в сторону центров амбулаторной хирургии. Это связано и с растущей конкуренцией на рынке производства эндопротезов и услуг по их установке.

Ожидания специалистов и владельцев бизнесов в медицине связаны с развитием и вовлечением AM-технологий в производство, обучение, а также в снижение затрат на приобретение

3D-принтеров и соответствующего оборудования (металлический 3D-принтер от компании Markforged стоимостью ниже \$100 000, обычная цена металлических принтеров в 5–6 раз выше).

Другая проблема связана с DfAM (design for AM) — нужны подготовленные специалисты, умеющие конструировать на основе компьютерной и магнито-резонансной томографии пациента 3D-цифровую модель нужного элемента для его последующей печати.

Рассмотрим на примере ведущих игроков на рынке применение AM-технологий для решения различных задач по реставрации костей и суставов человека как частичных, так и при полной замене.

#### Челюстно-лицевая хирургия

Одним из первых применений AM в челюстно-лицевой и черепной хирургии было изготовление протезов костей, которые были разрушены в результате травмы или заболевания. AM практически не имеет ограничений по форме протеза, его сложности в производстве и позволяет выпускать как мелкие серии стандартных протезов разных размеров, так и индивидуальные протезы для конкретного пациента. В качестве исходной информации для создания такого протеза обычно используются данные, полученные с томографа (КТ или МРТ). Иногда для более точной подгонки протеза используют полимерный макет, выращенный на 3D-принтере. На таком макете можно также подготовить план операции и протестировать его с помощью специального софта (например, FreeForm Modeling от 3D Systems [5]). Процедуры изготовления протезов и их установки достаточно отработаны и описаны во многих публикациях, например [4–6].

**1. Индивидуальные черепные реставрации** изготавливаются как



услуга на основе компьютерной томографии пациента из материалов MEDPOR (биосовместимый пористый полиэтилен) (рис. 1) и PEEK (рис. 2). При этом предел текучести материала имплантата выше, чем реальной кости.

**2. Индивидуальные черепные имплантаты** (Pterional PLUS, рис. 3, 4) позволяют исправлять естественные дефекты черепа, например, типа асимметрии из-за атрофии тканей.

**3. Анатомические реконструкции костей лица**, включая эстетические задачи (рис. 5).

**4. Комбинированный имплантат MEDPOR TITAN 3D** для реконструкции черепа состоит

Рис. 1. Черепной имплантат из MEDPOR



Рис. 2. Черепной имплантат из PEEK



Рис. 3. Установка черепного имплантата: а) черепной дефект, б) стандартный черепной имплантат; в) эстетический имплантат из материала PEEK Pterional PLUS

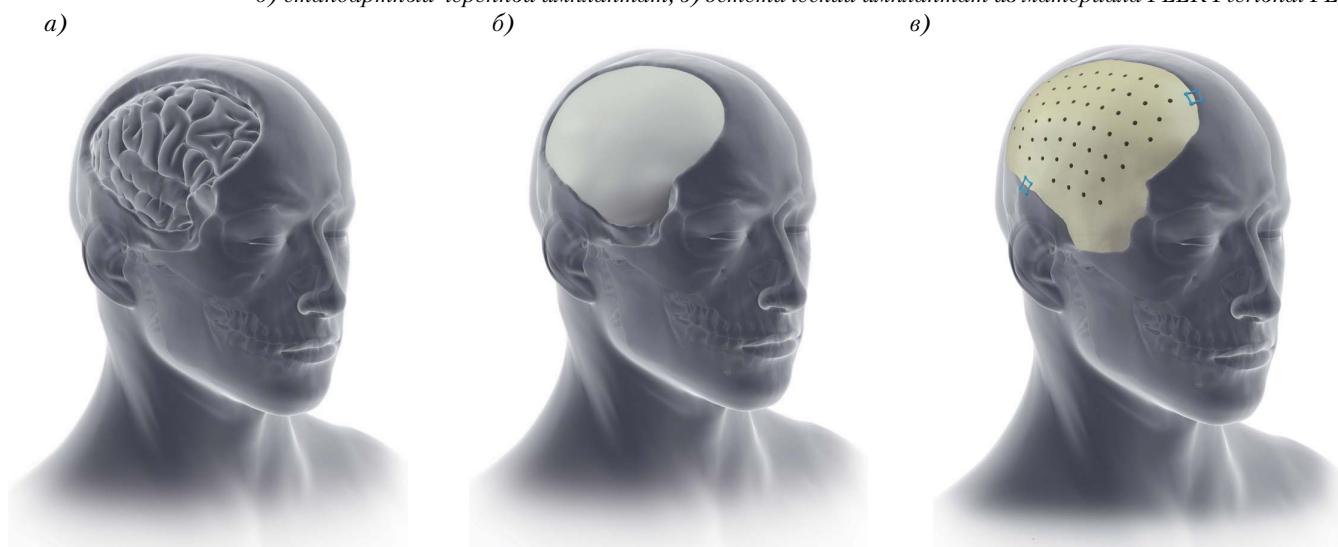


Рис. 4. Установка черепного имплантата: а) конструкция черепного имплантата; б) исходный дефект черепа; в) стандартный черепной имплантат; г) индивидуальный черепной имплантат (Pterional PLUS); д) вид до операции; е) вид после операции; ж) визуализация операции: было — стало

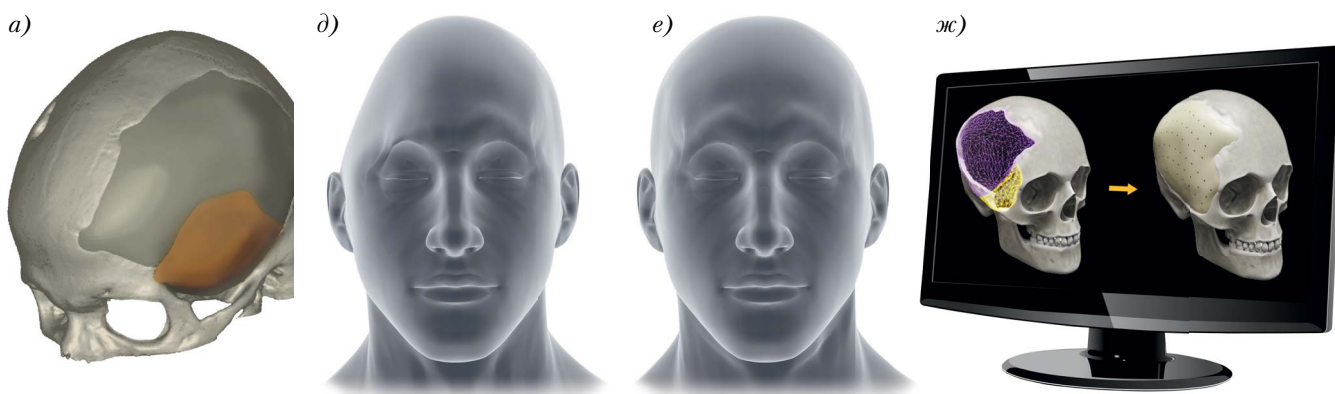


Рис. 5. Реконструкции лицевых костей и челюсти



из двух частей: основы из сплава титана и покрывающей ее внешней части из пластика MEDPOR (рис. 3в, 4ж).

**5. Виртуальное планирование хирургических операций (VSP).** Совместный проект с 3D Systems.

Данные компьютерной томографии трансформируются в объемное изображение зоны хирургического вмешательства, что позволяет составить последовательный план операции шаг за шагом. Далее предоперационный пошаговый план вместе с необходимыми пояснениями, руководствами и шаблонами передается бригаде хирургов в операционную комнату. Также можно изготовить на 3D-принтере (SLA-технология) объемные модели черепа с детальным структурным изображением сосудов, корней зубов, возможных опухолей для более точного планирования операции.

**6. Внутренняя система дистракции** разработана для случаев удаления части кости черепа или лица и предназначена для временной стабилизации и постепенного удлинения лицевых костей черепа с использованием элементов разных производителей (рис. 6).

**7. Коррекция костей черепа** с целью восстановления нарушенной функциональности или по эстетическим причинам очень востребована и дает возможность на основе компьютерной томографии подготовить план операции и успешно выполнить его с использованием плоских и объемных пластин (системы дистракции, рис. 7).

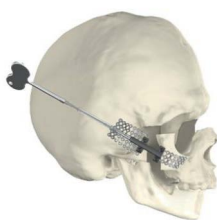


Рис. 7. Коррекция лицевых частей черепа

Рис. 6. Пример использования системы дистракции для удлинения лицевой кости черепа



**Реставрация костей и суставов**

На металлических 3D-принтерах хорошо освоены и используются технологии печати имплантатов тазобедренного и коленного суставов, позвоночных дисков, костей ноги и других протезов для восстановления разрушенных в результате травм, различных заболеваний костей человека [4, 7]. Растущий тренд показывает рынок имплантатов для суставов плеча (в США в 2016 г. — 100 000 операций по сравнению с 14 000 в 2000 г.) и операции по полной замене лодыжки.

**1. Ступня и лодыжка**

Модель ступни пациента на основе компьютерной томографии помогает составить план операции для хирурга для устранения дефекта (рис. 8–11).

Лодыжка включает берцовую, таранную и малоберцовую кости. Хирургические операции (The Scandinavian Total Ankle Replacement (STAR™ Ankle) возможны с полной заменой лодыжки в случае различных видов артрита (реальная процедура — см. <https://youtu.be/0k693SFNaV4>). Имплантат, показанный на рис. 9, применяется в практике в США и Канаде. В случаях перелома отдельных костей лодыжки для фиксации фрагментов используются различные накладочки (рис. 10). Подготовленный план

Рис. 8. Кости ступни и лодыжки



Рис. 9. Имплантат лодыжки (STAR™ Ankle)



Рис. 10. Лодыжка с установленной накладкой



Рис. 11. Накладки для фиксации костных фрагментов



операции можно протестировать на 3D-модели лодыжки. Сложная структура костей ступни обусловила разработку хирургических процедур для исправления дефектов каждой из костей фаланг пальцев ноги, костей плюсны, соответствующих суставов. Для их

фиксации также используются различные титановые накладки. Место установки и план операции определяются по 3D-модели.

## 2. Имплантаты тазобедренного сустава (ТБС)

На 3D-принтере чаще всего печатают из сплава титана индивидуальный ТБС: чашку с нанесенным снаружи пористым покрытием (рис. 12), реже ножку с таким же покрытием. Существует несколько вариантов ножек для бесцементного крепления в кости в зависимости от размеров, формы и состояния сустава. Современная конструкция ТБС является результатом многолетней хирургической практики и исследований механики сустава: минимальное трение в шаровом шарнире, малый износ полиэтиленового вкладыша, что обеспечивает длительный срок работы ТБС, большой угол поворота ножки в чашке, надежную фиксацию ножки и чашки в кости, в том числе и за счет остеоинтеграции. Поскольку необходимо соблюдать высокую размерную точность и углы наклона ножки, а также выбрать правильную конусность сопряженных элементов ножки и шарика, то либо элементы ТБС полностью выполняют на 5 координатных станках с ЧПУ, либо

на них делают финишную обработку после печати на 3D-принтере. Чашку иногда выполняют из сплава кобальт-хром с последующим плазменным покрытием из титана и затем слоем гидроксилпатита (для лучшей остеоинтеграции, рис. 12). Чашка большего диаметра обеспечивает большую устойчивость с хорошей износостойкостью (~1 мкм в год).

3. Для первичной установки, или ревизии части, или полной замены коленного сустава могут устанавливаться имплантаты типа TKS (Triathlon Knee System) (рис. 13). TKS-имплантаты изготавливаются по технологии АМ с бесцементной фиксацией (AMagine исследовательский институт в Ирландии занимается изучением АМ-технологий, владелец компания Stryker). Технология полной замены коленного сустава хорошо отработана, дает почти полное восстановление функциональности, а количество операций ежегодно только в США растет на 4,5% (с 1,6 млн операций по замене ТБС и коленного сустава в 2018 г. до 2,1 млн операций в 2024 г., прогноз [2]).

4. Имплантаты для позвоночника компании Zimmer Biomet [8], показаны на рис. 13–15. Пористый танталовый имплантат ТМ-S

Рис. 14. Пористый танталовый имплантат ТМ-S из материала Trabecular Metal аналогичен губчатой структуре кости



(рис. 14) из материала Trabecular Metal аналогичен губчатой структуре кости (пористость до 80%), обладает высоким коэффициентом трения для начальной фиксации и используется как матрица для прорастания костной ткани.

На рис. 16 представлен шейный имплантат (ROI-C) с более простой процедурой установки, чем винтовые фиксации.

Компания nTopology [9] также разработала дизайн пористых структур для металлических имплантатов (рис. 17–18) для 3D-печати.

## Протезирование

Рынок протезов растет ежегодно, что связано со старением населения (2017 г. — 960 млн людей

Рис. 12. Имплантат тазобедренного сустава (с улучшенными характеристиками) включает полусферическую ацетабулярную чашку с плазменным покрытием титаном размерами 42–74 мм, с 3–5 отверстиями, полиэтиленовый вкладыш с шаровым шарниром, ножку с пористым покрытием. Возможно нанесение покрытия PureFix HA (hydroxyapatite) для быстрой остеоинтеграции



Рис. 13. Имплантат коленного сустава (Triathlon Knee System) с цементной/бесцементной фиксацией



Рис. 15. Шейный имплантат из биосовместимого полимера РЕЕК-ОПТИМА с метками из танталовых шариков для определения положения по рентгенограмме





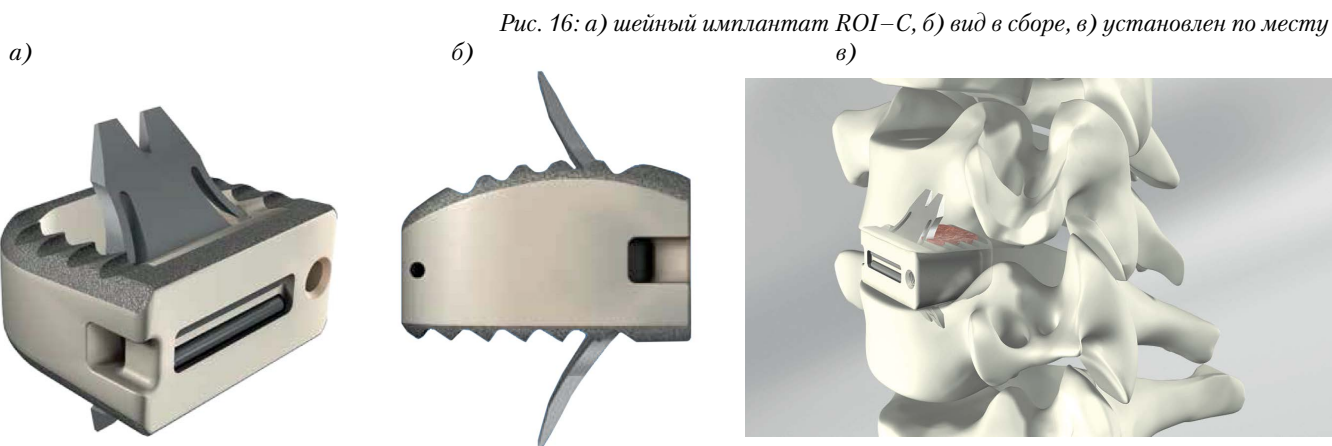


Рис. 16: а) шейный имплантат ROI-C, б) вид в сборе, в) установлен по месту

свыше 60 лет, 2050 г. – 2.1 млрд), с увеличением количества спортивных травм и травм от занятий йогой, фитнесом, а также от увеличения ампутаций, связанных с заболеваниями диабетом и раком костей. Оценка рынка ортопедических изделий к концу 2024 г. показывает объем в 53 млрд USD с 3% ежегодным ростом начиная с 2017 г. Обусловлено это растущим количеством костных

заболеваний – остеопороза и артрита, а также прогрессом в разработке новых ортопедических изделий. При этом США имеют почти 90% рынка ортопедических изделий и услуг в Северной Америке, Германия – почти 20% соответственно в Европе. Мировые лидеры этого рынка – Medtronic, MicroPort Scientific Corporation, ConforMIS, Zimmer Biomet, DJO Global, Stryker.

ки и редактирования рабочих STL-файл отправляется на печать на 3D-принтер. Например, готовый протез ступни состоит из нескольких частей, соединенных специальными брекетами (рис. 19б), рассчитанными для каждого пациента [10].

Другой пример: поддержка для шеи (рис. 20а). Необходимость такой поддержки вызвана неестественным положением головы, когда люди часто смотрят в свой смартфон, что приводит к болям в шее, шейному артриту, грыже диска, головной боли, боли в руке

Рис. 17. Имплантат в виде пластины для шейного отдела позвоночника с пористой структурой (а – дизайн, б – пластина после финишной обработки)



Создание протеза начинается со сканирования (рис. 19а), это занимает несколько минут и удобно для пациента. После обработ-

Рис. 19. Скан (а) и протез (б) ступни



Рис. 18. Рабочий стол с напечатанными имплантатами

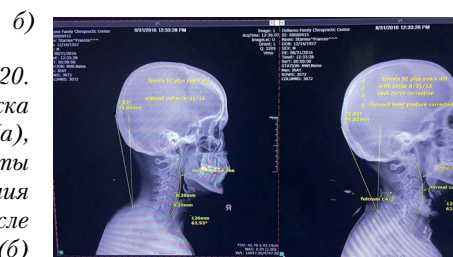
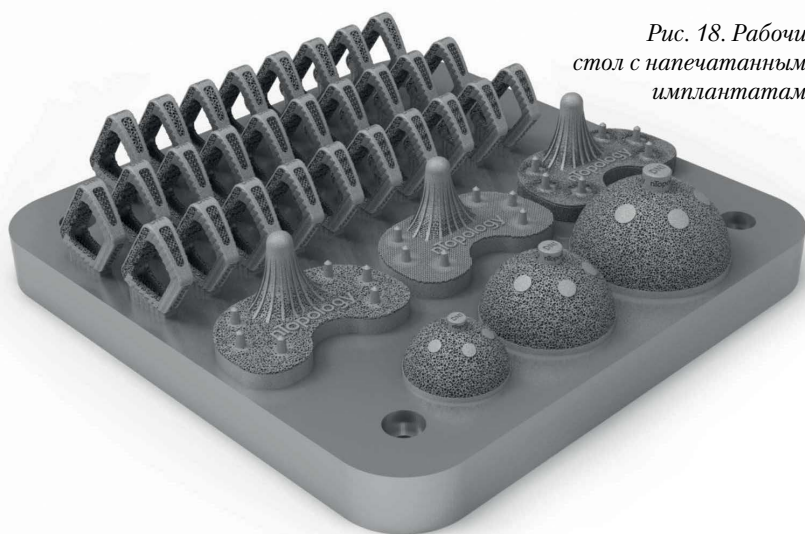


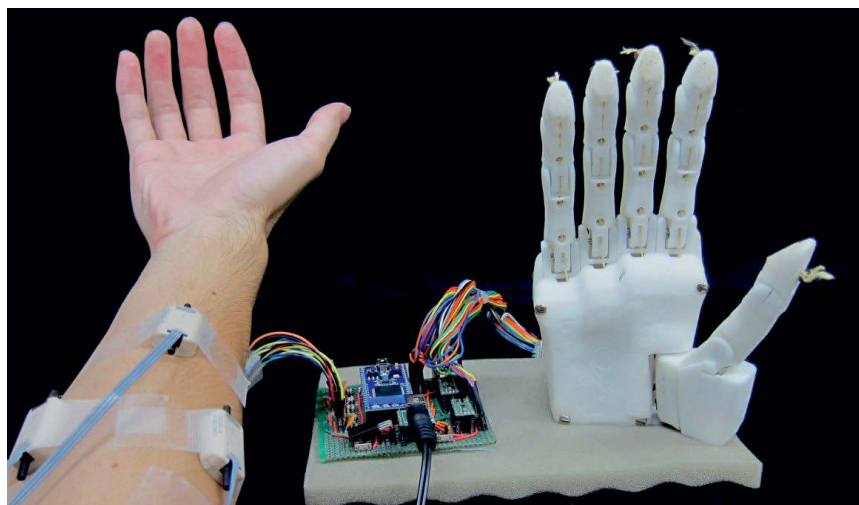
Рис. 20. Поддержка для шеи (а), результаты до применения и после применения (б)

и в плече, в нижнем поясничном диске и вызывает суставные изменения. Применение поддержки ежедневно по 20 мин приводит к исправлению положения головы и снимает болевые ощущения (рис. 20б: слева — до применения, справа — с поддержкой).

Изготовленный с помощью 3D-печати протез руки с управлением от компьютера (работа Biological Systems Engineering Lab at Hiroshima University [11]) дает более быструю реакцию на движение, легче и дешевле предыдущих изделий, и потому более доступен для пациентов. Обучение движению пальцев похоже на известную игру «камень-ножницы-бумага», где пациенту нужно только подумать о движении соответствующего пальца, и робот автоматически выполнит это движение (рис. 21). Робот является как бы частью тела человека. Электроды протеза фиксируют сигналы от нервных окончаний через кожу (типа ЭКГ сердца), отправляют информацию в компьютер, и в течение 5 миллисекунд робот получает сигнал на соответствующее движение. Таким же образом можно тренировать практически любые движения пальцев для выполнения процедур типа «взять бутылку с водой»; поздороваться за руку с кем-то, контролируя усилие. «Это одна из отличительных особенностей этого проекта. Машина может запоминать простые базовые движения, а затем комбинировать и создавать сложные движения», — говорит руководитель работ профессор Т. Цудзи.

Испытания на группе добровольцев показали высокую адаптацию к использованию протеза: точность на уровне 95% для простых движений и 92% для сложных. Однако нынешний вариант протеза руки не годится для постоянного ношения, так как требует сосредоточения внимания на движениях руки, что вызывает

Рис. 21. Протез руки использует сигналы от электродов и машинное обучение для копирования положения руки



мышечную усталость. В дальнейшем команда разработчиков будет работать над решением этой проблемы как в техническом плане, так и в программе тренировки.

Управление по контролю за продуктами и лекарствами США (FDA) дало разрешение на проведение исследований по разработке имплантируемых устройств нового поколения, которые могут быть более полно интегрированы с собственным мозгом пациента. По мнению Скотта Готлиба (доктор медицинских наук, комиссар FDA), «известные как устройства интерфейса мозг—компьютер (BCI), они обладают потенциалом для прямого управления, например, протезом конечности посредством мыслительных процессов пациента. Мы выпускаем проект руководства, чтобы помочь в разработке устройств BCI для пациентов с параличом или ампутацией. Наша цель заключается в разработке политики, которая поощряет использование более новых методов лечения, которые могут резко изменить траекторию здоровья и мобильности».

Как пример наиболее перспективных работ в этом направлении можно рассматривать проект Neuralink И. Маска [12] по созданию масштабируемой широ-

копосной системы ВМИ (Brain-machine-interface). В долгосрочной перспективе, по мнению Маска, это может быть некий симбиоз человека и искусственного интеллекта.

В этом проекте используются новейшие технологии объемного напыления электропроводящих дорожек, микроэлектроника для получения и передачи информации на компьютер, нейрохирургический робот для прецизионной установки нитей в определенные области мозга с точностью позиционирования до 1 мкм.

Система ВМИ состоит из трех основных компонентов: сверхтонкие полимерные зонды (рис. 22), нейрохирургический робот (рис. 23) для быстрой имплантации 96 полимерных нитей, каждая из которых с 32 электродами, в общей сложности 3072 электрода (рис. 24: игла, картридж и пинчер) и специализированная электроника высокой плотности (рис. 25). Матрица электродов упакована в небольшое имплантируемое устройство, которое содержит 12 микросхем для маломощного встроенного усиления и оцифровки: пакет для 3072 каналов занимает объем 23×18,5×2 мм. Один кабель USB-C обеспечивает потоковую передачу данных



Рис. 22. Полимерные зонды с 32 контактами электродов, разнесенными на 50 мкм или 75 мкм

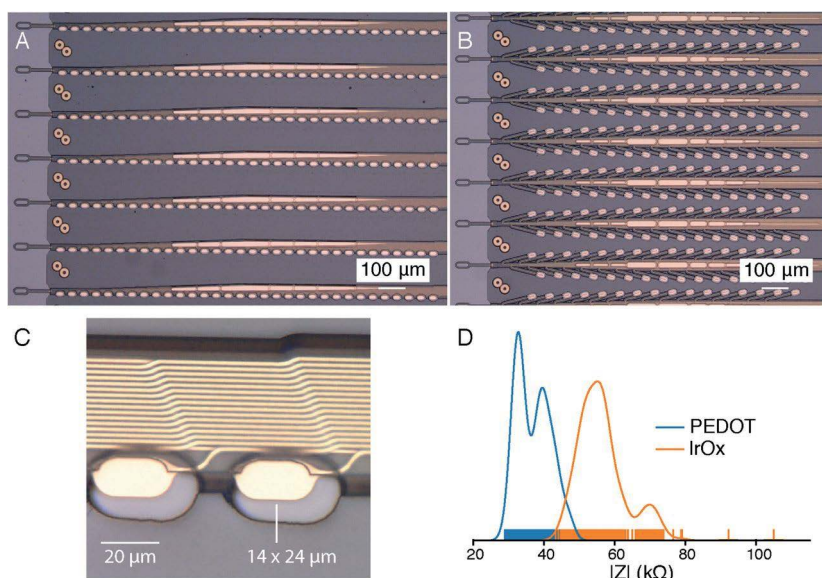
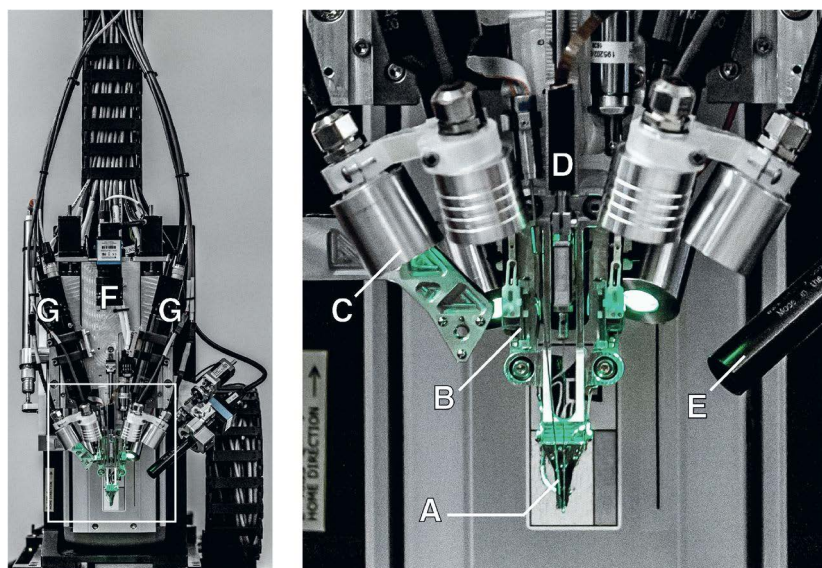


Рис. 23. Робот для установки нитей. А. Загружен иглодержатель. В. Контактный датчик положения мозга с низким усилением. С. Световые модули с несколькими независимыми длинами волн. D. Игольчатый мотор. E. Одна из четырех камер фокусируется на игле во время введения. F. Камера с широким углом обзора операционного поля. G. Стереоскопические камеры.



с устройства с полной полосой пропускания и одновременную запись со всех каналов.

Было разработано и изготовлено более 20 различных типов нитей и электродов для имплантации (рис. 24): ширина нити от 5 до 50 мкм, толщина от 4 до 6 мкм, нить включает в себя до трех слоев изоляции и двух слоев проводника. Длина нити около 20 мм. Чтобы обработать эти длинные

тонкие нити перед введением, на них наносится полимерная пленка, на которой нити остаются прикрепленными до тех пор, пока хирургический робот их не снимает. Каждая нить заканчивается петлей 16×50 мкм для захвата иглой. Диаметр иглы 24 мкм.

Игла отфрезерована из вольфрам-рениевой проволоки диаметром 40 мкм, электрохимически травленной до диаметра 24 мкм

вдоль вводимой длины (рис. 25А). Кончик иглы предназначен как для зацепления петель для введения, так и для проникновения в мозговые оболочки и ткани мозга. Игла приводится в движение линейным двигателем, обеспечивающим переменную скорость введения и быстрое ускорение втягивания (до 30000 мм/с<sup>2</sup>), что способствует отделению зонда от иглы. Пинчер представляет собой вольфрамовую проволоку диаметром 50 мкм, согнутую на кончике и приводимую как в осевом, так и во вращательном направлении (рис. 25В). Он служит в качестве опоры для зондов во время транспортировки и в качестве направляющей, чтобы гарантировать, что нити вставляются вдоль пути иглы. На рис. 26 показана последовательность фотографий процесса вставки в выделенный отдел мозга.

Робот работает в автоматическом режиме со скоростью до 6 нитей (192 электрода) в минуту, при этом хирург может выполнять ручную микрорегулировку положения нити перед каждым введением в кору мозга. Система контроля включает 6 независимых световых модулей с разной длиной волны и несколько камер, информация с которых поступает вместе с регистрацией мест введения в общую координатную рамку с ориентирами на черепе. Это в сочетании с отслеживанием глубины позволяет точно выбирать анатомически определенные структуры мозга. Интегрированный пользовательский пакет программного обеспечения позволяет предварительно выбирать все места вставки и планировать пути вставки, чтобы избежать сосудистой сети.

Постоянная запись с тысяч сайтов электродов представляет значительные проблемы с электроникой и упаковкой. Плотность каналов записи требует размещения стека усиления и оцифровки



сигнала в сборке массива, в противном случае требования к кабелю и разъему будут чрезмерно высокими. Этот стек записи должен усиливать малые нейронные сигналы ( $<10$  мкВРМС), в то же время подавляя внеполосный шум, дискретизировать и оцифровывать усиленные сигналы и выводить результаты для обработки в реальном времени — все с использованием минимальной мощности и размера. Электроника построена на специализированной интегральной схеме (ASIC) для приложений Neuralink, которая состоит из 256 индивидуально программируемых усилителей («аналоговых пикселей»), встроенных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и периферийной схемы управления для оцифрованных выходов.

Нынешняя система ВМІ рассматривается как исследовательская платформа для использования на грызунах (рис. 26) и служит прототипом для будущих человеческих клинических имплантатов. Для увеличения пропускной способности потоковой передачи необработанных данных система имеет проводное соединение. В отличие от этого клинические устройства, которые будут производиться от этой платформы, будут полностью имплантируемыми, что требует герметичной упаковки, и будут иметь встроенное сжатие сигнала, пониженное энергопотребление, беспроводную передачу энергии и телеметрию данных через кожу без соединительных проводов.

Эта система имеет несколько преимуществ по сравнению с предыдущими подходами. Размер и состав тонкопленочных зондов лучше соответствуют свойствам материала мозговой ткани, чем обычно используемые кремниевые зонды. Кроме того, возможность выбирать, куда вставлять зонды, в том числе в подкорковые структуры, позволяет создавать собственные геометрии массивов для нацеливания на определенные области мозга, избегая при этом сосудистой сети. Эта особенность важна для создания высокопроизводительной системы, поскольку распределение электродов может быть настроено в зависимости от требова-

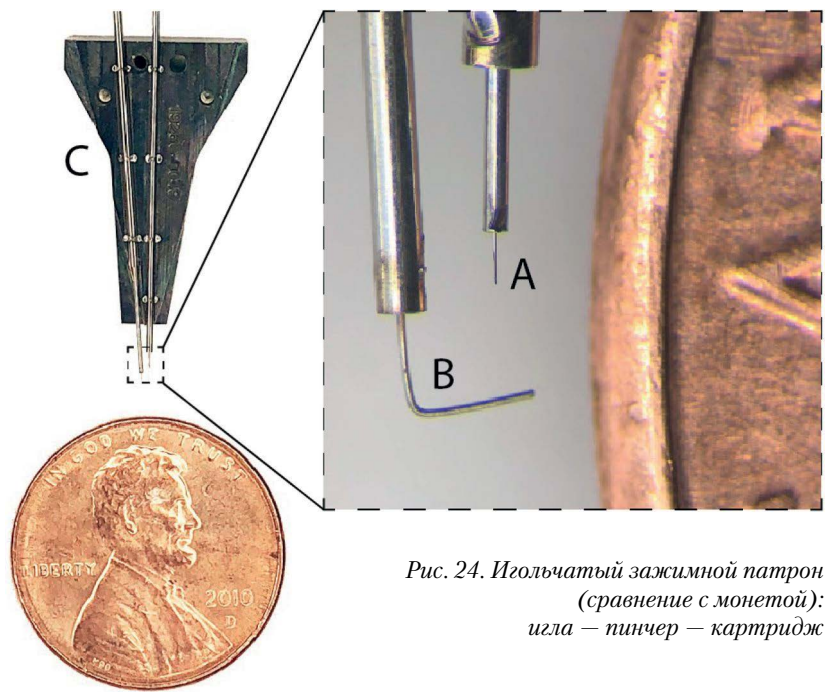


Рис. 24. Игольчатый зажимной патрон (сравнение с монетой): игла — пинчер — картридж

Рис. 25. Упакованное сенсорное устройство из 12 чипов: А — индивидуальная нейронная ASIC, способная обрабатывать 256 каналов данных; В — полимерные нити на париленовой основе. С — титановый корпус (крышка снята). D — цифровой разъем USB-C для питания и данных

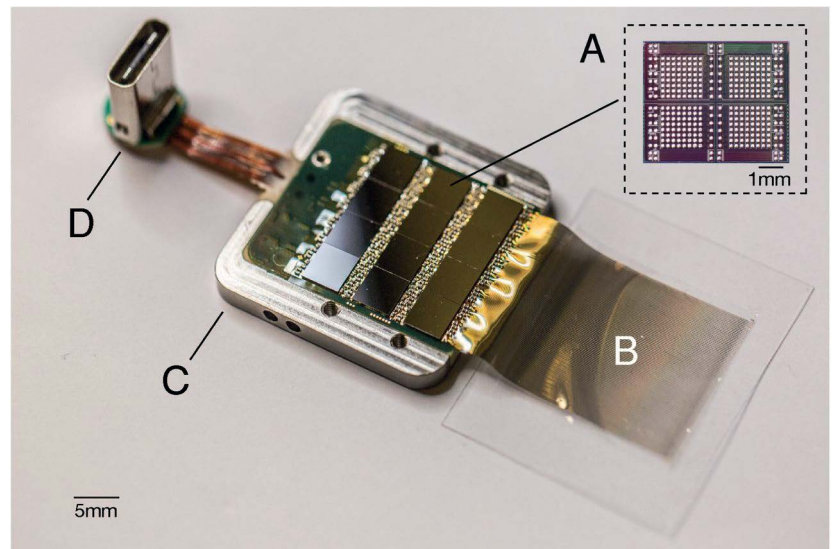
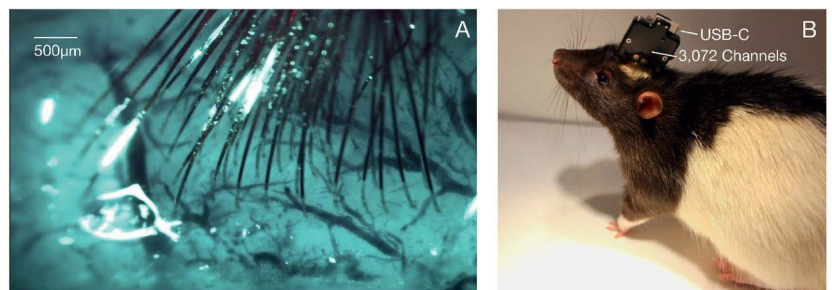


Рис. 26. Имплантация нитей и упаковка: А — пример изображения, показывающего поверхность коры с имплантированными нитями и минимальным кровотечением; В — упакованное сенсорное устройство, имплантированное крысе



ний задачи. Наконец, миниатюризация и дизайн Neuralink ASIC обеспечивают большую гибкость в проектировании системы и поддерживают очень высокое число каналов в пределах практического размера и ограничений мощности.

Можно надеяться, что пациент с повреждением спинного мозга мог бы легко управлять цифровой мышью и клавиатурой. В сочетании с быстро совершенствующимися методами стимуляции позвоночника в будущем этот подход поможет восстановить моторную функцию. Нейронные интерфейсы с высокой пропускной способностью должны обеспечивать множество новых терапевтических возможностей.

Важная тема обсуждалась на конференции ASTM [13] — материалы для АМ и их структура в изделиях. Сюда входят:

- свойства материалов, такие как усталость, разрушение, растяжение, износ, коррозия и ползучесть;
- влияние на свойства шероховатости поверхности, ориентацию при построении, термообработку, размеры и формы;
- применимость существующих методов механических испытаний и необходимость разработки новых методов;
- влияние параметров процесса и конструкции изделия на прочностные характеристики (усталость и разрушение);
- оптимизацию процесса построения изделия для улучшения структурной целостности;

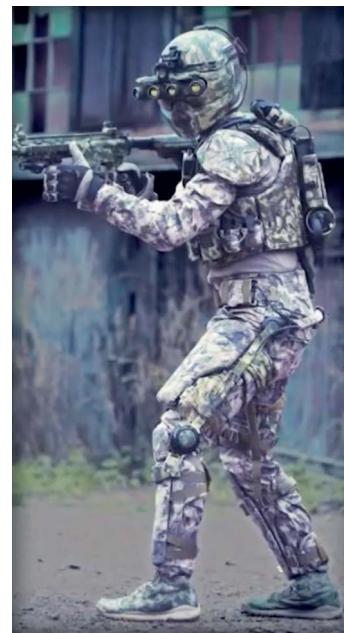
- наличие дефектов и критерии приемки;
- прогностические модели зависимости свойств от микроструктуры;
- полномасштабное моделирование поведения усталости и разрушения;
- структурную целостность изготовленных с помощью АМ биоматериалов (титановых и кобальт-хром сплавов, нержавеющей стали, никель-титановых сплавов и т. д.)

### Экзоскелеты

История экзоскелетов (ЭС) начинается с 1890 г., а первый прототип был представлен в 2005 г. Потребность в ЭС есть у военных, в медицине и в промышленности. Задача ЭС помочь собственной мускулатуре человека, или добавить мощности, или и то, и другое вместе. Сейчас на рынке предлагается 10 различных типов ЭС со средней ценой \$70000, которая слишком высока для большинства нуждающихся. Тем не менее емкость рынка ЭС к 2025 г. оценивается в 3,3 млрд USD.

В частности, в вооруженных силах США применяется ЭС TALOS (Tactical Assault Light Operator Suit) с питанием от батареи и предназначенный для защиты жизни солдат на передовой. Особенность ЭС в использовании жидких материалов, которые мгновенно становятся твердыми при попадании в них пули (рис. 27).

Рис. 27. Экзоскелет армии США



### Заключение

По мнению специалистов, АМ реально преобразовывают медицину на наших глазах. Но если персонификация по заказу и выращивание органов и тканей из клеток — это перспективы десятилетия, то планирование и изучение хирургических операций с использованием моделей, напечатанных на 3D-принтере для конкретного пациента по КТ или МРТ данным, уже широко используется. Такая предварительная подготовка экономит дорогостоящее время операции и позволяет избежать ошибок и риска внесения инфекции, уменьшить потери крови и т. п. ■

### Литература

1. Н. М. Максимов. Аддитивные технологии в стоматологии // Аддитивные технологии. 2019. № 1. С. 34–41.
2. <https://www.3dprintingolutions.com.au/News/Australia/3d-printing-in-blind-education>
3. <https://clck.ru/HRoZM>
4. <https://www.concept-laser.de/en/industry/medical.html>
5. <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2018-09/3d-systems-freeform-whatsnew-en-a4-web-2018-09-19.pdf>
6. А. В. Евсеев и др. Применение лазерной стереолитографии в медицине // Аддитивные технологии. 2019. № 2. С. 56.
7. <https://clck.ru/HTUsw>
8. <https://www.zimmerbiomet.com/medical-professionals/spine.html>
9. <https://ntopology.com/medical/>
10. <http://braceguy.com/>
11. <https://clck.ru/HMMGu>
12. <https://clck.ru/HNY4F>; <https://clck.ru/HNYA2>;
13. <https://doi.org/10.1101/703801>
13. <http://tinyurl.com/ydhal5ub>



**3D**  
TODAY  
**FEST**

# КРУПНЕЙШИЙ В РОССИИ ФЕСТИВАЛЬ 3D-ПЕЧАТИ

Москва, “Экспоцентр”  
29 - 30 ноября

- ✓ Ведущие производители и поставщики оборудования и расходных материалов
- ✓ Более 1000 проектов, выполненных с применением 3D-принтеров
- ✓ Перспективные стартапы
- ✓ Демонстрация самодельного и фирменного оборудования для 3D-печати и 3D-сканирования
- ✓ Доклады отраслевых экспертов
- ✓ Образовательные мастер-классы
- ✓ Незабываемые 3D-печатные инсталляции



**29-30 ноября, с 10:00 до 18:00**

Адрес:

**ЦВК «Экспоцентр», Павильон №5  
Краснопресненская наб., 14**

Официальный сайт мероприятия:

**fest.3dtoday.ru**



НА НОВОЙ ВЫСОТЕ



#### ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА

более 60 конференций, круглых столов, семинаров и мастер-классов. Деловая программа «Future Hub» — инновационные научно-технические разработки молодых ученых

#### ПРЕМЬЕРЫ МАКС-2019

отечественный лайнер МС 21-300 и гражданские вертолеты Ка-62 и Ми-38 в полете и на земле. Новинки от Embraer и Pilatus.

#### СПЕЦИАЛЬНЫЙ ПАВИЛЬОН

полноразмерный макет российско-китайского широкофюзеляжного дальнемагистрального самолета CR-929

#### МАСШТАБНАЯ ЭКСПОЗИЦИЯ БВС

беспилотники, авионика, двигатели и целевая нагрузка. Демонстрационные полёты БВС и встречи в рамках деловой программы.

#### БОЛЕЕ 1000 ДЕЛОВЫХ ВСТРЕЧ MATCHMAKING

поиск деловых партнёров для участников авиасалона: перечень компаний, готовых к встрече, контактные лица, расписание назначенных переговоров.

Подробности на [www.aviasalon.com](http://www.aviasalon.com)

# МАКС 2019

Организаторы

Устроитель

КИТАЙ —  
страна-партнёр



**ЖУКОВСКИЙ • 27 АВГУСТА - 1 СЕНТЯБРЯ**

Стратегический банк-партнёр



Стратегический партнёр



Генеральный финансовый партнёр



Официальный партнёр



Официальный страховщик



Международный  
информационный партнёр



Генеральные информационные партнёры





МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



# 3D/AM

Тематический раздел

## «Аддитивные технологии. 3D-печать»

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

[www.metobr-expo.ru](http://www.metobr-expo.ru)

[www.technoforum-expo.ru](http://www.technoforum-expo.ru)



12+



21-я международная специализированная выставка

## МЕТАЛЛООБРАБОТКА

25–29.05.2020

«Оборудование, приборы и инструменты  
для металлообрабатывающей  
промышленности»



В рамках проекта «Наука-Технологии-Инновации Экспо»  
международная политехническая выставка

## ТЕХНОФОРУМ

21–24.10.2019

«Оборудование и технологии обработки  
конструкционных материалов»



Организаторы:





4-5 ОКТЯБРЯ  
МОСКВА



# PRINT EXPO

**VII КРУПНЕЙШАЯ ВЫСТАВКА  
ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
3D-ПЕЧАТИ И СКАНИРОВАНИЯ**

[3d-expo.ru](http://3d-expo.ru)

Организатор:







**28 – 31 ЯНВ**

**2020**

**МОСКВА**

**Выставка аддитивных технологий  
в промышленности 3D fab + print Russia**



в рамках выставки  
«interplastica»

[www.3Dfabprint.ru](http://www.3Dfabprint.ru)

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

[messe-duesseldorf.ru](http://messe-duesseldorf.ru)



**Messe  
Düsseldorf  
Moscow**

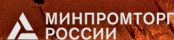


# Металл Экспо 2019

25 лет

25-я Международная  
промышленная выставка

При поддержке:



Организатор:  
**МЕТАЛЛ  
ЭКСПО**

**12-15 ноября 2019**

Москва, ВДНХ, пав. 75



Оборудование и технологии  
для металлургии  
и металлообработки  
**МеталлургМаш'2019**



Транспортные  
и логистические услуги  
для предприятий ГК  
**МеталлТрансЛогистик'2019**



Металлопродукция  
и металлоконструкции  
для строительной отрасли  
**МеталлСтройФорум'2019**



Ежегодный  
выставочный  
аудит с 2006 г.

Генеральный  
информационный партнер:

**МС** Металлоснабжение и сбыт

[www.metal-expo.ru](http://www.metal-expo.ru)



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



# РИТМ

МАШИНОСТРОЕНИЯ

[www.ritm-magazine.ru](http://www.ritm-magazine.ru)  
[ritm@gardesmash.com](mailto:ritm@gardesmash.com)

 [ritmmagazine](#)  
 [rhythm\\_of\\_machinery](#)