

at

АДДИТИВНЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ


3D-ПРИНТЕР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

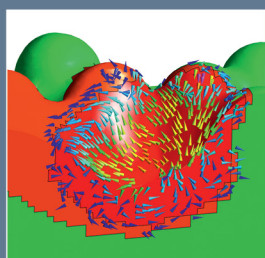
HERCULES G2

С УДАЛЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

imprinta.ru


**IMPRINTA**

- ▶ 100 см<sup>3</sup>/час — производительность
- ▶ 410°C — температура печати
- ▶ >40 видов материалов для печати, среди них композитные и высокотемпературные материалы
- ▶ 2 вида сопел: титановые и латунные с широким размерным рядом от 0,2 до 1,2 мм
- ▶ Система удаленного слайсинга и запуска на печать  DiaPrint



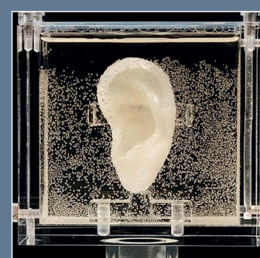
Микроуровневое моделирование теплофизического процесса селективного лазерного сплавления

17



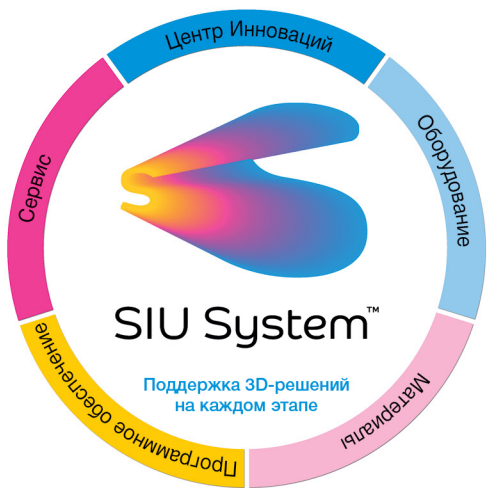
Отбор деталей ГТД для изготовления с помощью аддитивных технологий

20



Применение AM в биотехнологии: перспективы и ограничения (часть 3)

31



## 3D-принтеры



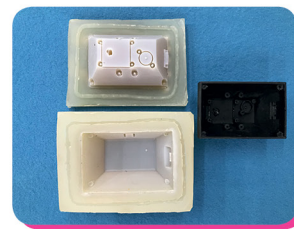
3D-принтер:  
**CERAMAKER 900 FLEX**

Материал:  
керамика



3D-принтер:  
**Zortrax Inkspire**

Материал:  
фотополимер



Литьё  
в силиконовые  
формы



3D-принтер:  
**ProJet 3500 HDMax**

Материал:  
фотополимер



3D-принтер:  
**ProJet 3510MP**

Материал:  
фотополимер



3D-принтер:  
**ProJet MJP 2500Plus**

Материал:  
фотополимер



3D-принтер:  
**ProJet MJP 2500W**

Материал:  
воск



3D-принтер:  
**Figure 4 Standalone**

Материал:  
фотополимер

# Центр Инноваций SIU System ООО «Аддитивный Инжиниринг»

+7 (495) 374-60-07    info@siusystem.ru    https://siusystem.ru

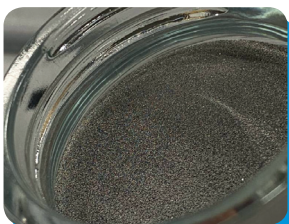
Подбор 3D-решений и реализация задач для промышленности  
Получите информацию во время визита в Центр Инноваций  
или на онлайн-экскурсии

## 3D-сканер



3D сканер:  
**ATOS Core**

Атомайзер:  
**ATO LAB**



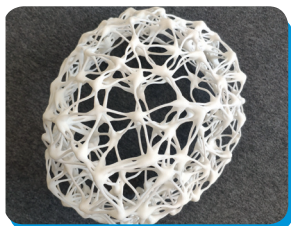
3D-принтер:  
**Nexa3D NXE400**

Материал:  
фотополимер



3D-принтер:  
**ProX DMP 320**

Материал: металл

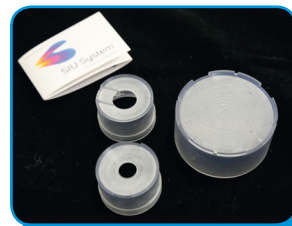


3D-принтер:  
**ProX SLS 6100**

Материал: полиамид



3D-принтеры: **ProX 800**



Материал: фотополимер



3D SYSTEMS

3DCERAM

nexa3D

voxeljet

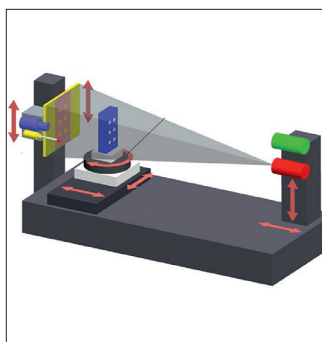
ATO LAB

zortrax

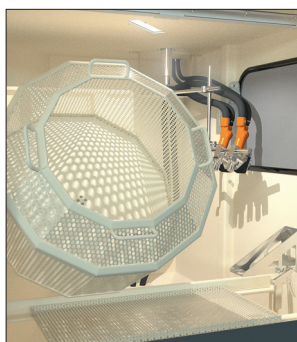
Партнёры SIU System по внедрению аддитивных технологий:



8



12



14

## СОДЕРЖАНИЕ

- 6** Экспансия аддитивных технологий в медицину
- 8** 3D-принтер нового поколения Hercules G2
- 12** OnTheFly-СТ
- 14** Больше надежности, производительности и чистоты при автоматизированном удалении остаточного порошка и струйной обработке деталей, изготовленных методом аддитивных технологий с использованием полимерных материалов
- 17** Микроуровневое моделирование теплофизического процесса селективного лазерного сплавления
- 20** Отбор деталей ГТД для изготовления с помощью аддитивных технологий
- 24** Моделирование 3D-печатных образцов из пластика для испытания на растяжение
- 31** Применение АМ в биотехнологии: перспективы и ограничения (часть 3)

Издатель ООО «ПРОМЕДИА»

директор О. Фалина

главный редактор  
М. Копытина

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

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

отдел рекламы  
т/ф (499) 55-9999-8

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

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

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

Главное событие отрасли  
в России и странах СНГ

# ФОТОНИКА

МИР  
ЛАЗЕРОВ  
И ОПТИКИ

30 марта – 2 апреля 2021

При поддержке Министерства  
промышленности и торговли РФ

Под патронатом ТПП РФ



Реклама 12+



15-я юбилейная международная  
специализированная выставка  
лазерной, оптической  
и оптоэлектронной техники

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»  
[www.photonics-expo.ru](http://www.photonics-expo.ru)



ЛАЗЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ



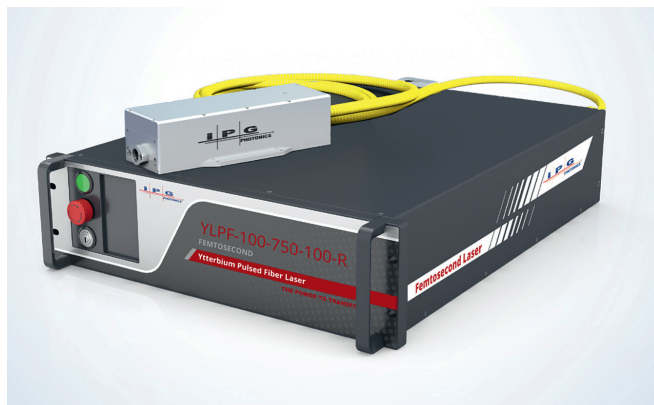
# Лазер с уникальными характеристиками

Новые пикосекундные лазеры с гибридным волокном YLPF и YLPP компании IPG Photonics обеспечивают высокую пиковую мощность до 200 МВт с масштабируемой средней выходной мощностью до 200 Вт и длительностью импульса по выбору заказчика в диапазоне от 750 фс до 5 пс при полном рабочем диапазоне частоты повторения 50–2000 кГц.

Конструкция волоконного световода компании превосходит самые современные разработки, что

позволяет получить невероятно компактный лазер, который по своей природе более энергоэффективен, надежен и прочен, чем обычные DPSS-лазеры на массивных стержнях или дисках, но по цене значительно ниже, чем у традиционных продуктов. Новая архитектура и гибкая управляющая электроника обеспечивают удобное короткое время прогрева и позволяют регулировать как энергию импульса, так и частоту повторения, не влияя на параметры выходного луча.

Лазерные импульсы длительностью всего несколько пикосекунд создают настолько высокие пики интенсивности, что имеет место нелинейное/многофотонное поглощение, что приводит к сверхточному «холодному» процессу с очень небольшим тепловым воздействием. Лазеры серии найдут широкое применение: для прецизионной микрообработки, микрообработки керамики, разметки сапфировых светодиодных пластин, микроструктурирования и текстурирования поверхности, тонкопленочной абляции, резки многослойной полимерной пленки, резки и сверления стекла/сапфира, резки тонкой металлической фольги и др.



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

## Пластиковая арматура для бетона

Бетон — второй по популярности материал на планете после воды и третий по величине промышленных выбросов CO<sub>2</sub> в мире. Помимо экологической опасности бетон еще не очень подходит для строительства: он хорош при сжатии, но плох при растяжении, изгибе или кручении. Именно поэтому часто требуется добавление стальной арматуры, изготовление и установка которой является трудозатратной и энергоемкой.

Но выход есть. Команда исследователей из Калифорнийского университета в Беркли работает над проектом, который заключается в использовании внутренних пластиковых конструкций вместо арматуры. Геометрия опоры

(например, решетка) производится с помощью 3D-печати и помещается в форму для заливки. Команда экспериментировала с полимерами ABS и PLA. Затем в форму заливается бетон со сверхвысокими характеристиками (UHPC), который покрывает пластиковую конструкцию, как арматурный стержень. Готовый продукт напоминает обычный блок/плиту из бетона, за исключением того, что сокращается трудозатрата на укладку арматуры, не говоря уже об экологических преимуществах полимеров перед арматурой.

Путем цифрового манипулирования геометрией решеток на этапах моделирования бетонные детали могут быть оптимизированы для обеспечения большей

устойчивости к сопротивлению во всех направлениях для создания более легких конструкций.



<http://3dmag.org>

# Эффективный двигатель

Индийский космический стартап Skyroot Aerospace представил полностью напечатанный на 3D-принтере криогенный двигатель, который предназначен для верхней ступени одной из принадлежащих компании ракет. Устройство, получившее название Dhawan-1, считается первой частной разработкой Индии, работающей на сжиженном природном газе и жидком кислороде.

Согласно ISRO, криогенный двигатель более эффективен и обеспечивает большую тягу на каждый килограмм топлива, которое он сжигает, по сравнению со ступенями твердо-

жидкотопливного, что дает ему существенное преимущество в полезной нагрузке. Кроме того, СПГ — это экологически чистое, дешевое, безопасное и многоазовое криогенное топливо, которое также идеально подходит для длительных миссий в дальний космос с участием людей.

На данный момент компания завершила испытания для проверки расхода топлива и структурной целостности двигателя и сейчас строит специальный испытательный центр для проведения испытаний Dhawan-I «горячим огнем».



<http://3dmag.org/>

## Совместная разработка

Учеными Кабардино-Балкарского государственного университета имени Х.М. Бербекова и Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого получены полимерные композиционные материалы, которые в два раза прочнее и в четыре с половиной раза легче стали и на порядок прочнее и в полтора раза легче алюминия. Важной составляющей этой работы является создание цифровых моделей композиционных материалов с различными свойствами. Термопластичные термостойкие композиты высоко востребованы в авиации, космосе, медицине, автомобилестроении и других важных отраслях. Разработчики считают, что подобные отечественные материалы позволят выйти на мировой уровень в области технологий 3D-печати.



<https://kbsu.ru/>

## Успешные испытания

12 ноября на территории АО НПО «ОКБ им. М.П. Симонова» завершен комплекс приемо-сдаточных испытаний двигателя МГТД-150Э №001. Двигатель разработан и изготовлен в рамках проекта Фонда перспективных исследований с применением аддитивных технологий и металлопорошковых композиций разработки ФГУП «ВИАМ».



В состав МГТД вошло 6 ответственных деталей, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления из металлопорошковых композиций ФГУП «ВИАМ». Это жаровая труба, фронтное устройство, реактивное сопло, корпус компрессора, корпус ВНА и сопловой аппарат. В ходе испытаний зафиксировано, что параметры двигателя превосходили требования по техническому заданию проекта. Максимальная тяга составила 151,6 кгс, что на 20% выше, чем у двигателя прототипа, при этом удельный расход топлива и температура газов за турбиной снижены на 10%, а масса двигателя не изменилась.

<https://viam.ru/>

Зинаида Сацкая

25 сентября состоялась давно запланированная, но перенесенная с весны на осень научно-практическая конференция «Аддитивные технологии в медицине: от 3D-планирования до биопечати», которую регулярно проводит Центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена. Конференция прошла в онлайн-формате, к которому принудила пандемия, но, думаю, организаторам и участникам еще предстоит оценить преимущества этого формата.

Сугубо медицинские аспекты операций с применением напечатанных изделий будут оценивать врачи, а мы сегодня уже имеем право сказать, что аддитивные технологии вносят изменения в принципы организации работы медицинских учреждений. Уже не в новинку создание рабочих групп специалистов, в которые теперь входят представители аддитивных производств. Оптимистично прозвучало утверждение, что и в медицинских целях можно работать — и работают! — с порошками российского производства. Очевидным стал тезис о том, что создание индивидуальной конструкции замещающего элемента не менее важно, чем сама операция. Новые возможности открываются для процесса обучения студентов в медицинских вузах, для которых стали печатать новые виды макетов внутренних органов, максимально соответствующих физическим параметрам костной ткани, макеты костей с мягкими тканями и др. В мире уже появились макеты из биогенных материалов, физические параметры которых соответствуют параметрам биологических аналогов, что повышает реалистичность как обучающего процесса, так и предоперационного планирования. В мире также появляются ортезы, напечатанные из различных материалов, каждый из которых привносит в ортез свои функции.

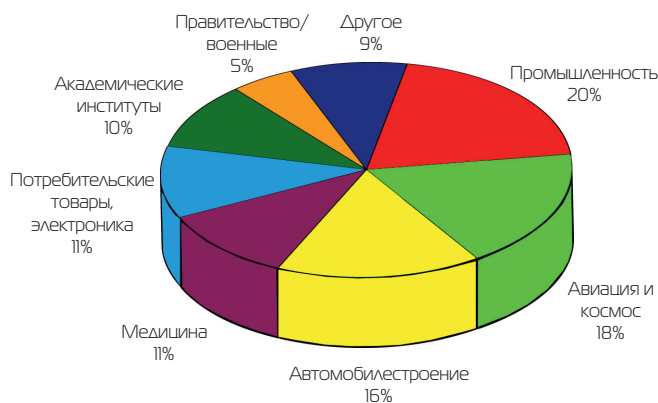
Участники конференции обращали внимание на разрыв между идеей имплантации изделий, созданных с помощью аддитивных технологий, и практикой их применения. Требования биосовместимости, биобезопасности, отсутствия канцерогенности и т.д. незыблемы, но регламенты применения и регистрации изделий, созданных по новым технологиям, неблагоприятны к усилиям практикующих врачей. Федеральные и региональные фонды, оплачивающие операции, должны прописывать эти услуги и создавать экономическую основу развития нового метода. Не будет оплаты — не будет ничего, кроме встреч с

обсуждением благих пожеланий, а не реального применения.

## Рынок 3D-печати растет

Обзор тенденций 3D-печати в травматологии и ортопедии дал в своем докладе Роман Горбатов, член правления ассоциации специалистов по 3D-печати в медицине, врач травматолог-ортопед. Ссылаясь на зарубежное маркетинговое исследование, докладчик привел интересную мировую статистику продаж 3D-печатных изделий по отраслям (рис. 1).

Рис. 1. Реализованные 3D-печатные изделия в мире [Wohlers Report, <https://temanufacturer.com/>]



В 2019 году было продано 3D-печатных изделий на \$13,7 млрд; к 2025 году этот показатель должен составить \$63,46 млрд. Изделий медицинского назначения было продано на \$1,481 млрд; на 2024 прогнозируется рост до \$5,595 млрд.

Интересны качественные изменения в медицинской отрасли. Если в 2018 году в мире больше всего изготавливалось зубных имплантатов, то в 2020 году по скорости роста продаж на первом месте уже находятся ортопедические имплантаты.

С 2016 по 2020 год в России увеличилось число центров с медицинской 3D-печатью, и уже сейчас в каждом российском городе с численностью более 300 тысяч человек есть возможность лечить пациентов с использованием аддитивных технологий.

## Правовое регулирование

Поскольку речь идет о здоровье и жизни человека, вопросы правового регулирования постоянно нахо-



дятся в поле зрения практикующих врачей. В России обязательной регистрации подлежит только материал, из которого изготавливаются индивидуальные 3D-печатные медицинские изделия.

В 2019 году в России была создана рабочая группа по разработке стандартных операционных процедур (СОП) и клинических рекомендаций, в которую вошли специалисты по аддитивным технологиям из разных городов страны. Большинство экспертов сошлось во мнениях, что индивидуальные изделия медицинского назначения следует разделить на три класса сертификации с учетом номенклатурной классификации: упрощенная, стандартная и расширенная.

Во время сертификации необходимо оценивать соблюдение требований на каждом этапе создания изделия — от получения данных обследования до постпечатной обработки и оценки качества и безопасности изделий. Обязательно надо контролировать материал, который используется в 3D-печати, и периодически обновлять перечень материалов для производства индивидуальных изделий медицинского назначения, создаваемых с помощью 3D-печати.

#### Материалы, оборудование, ПО

В России появилось сразу несколько фотополимерных материалов: фотополимерный силикон, рентгеноконтрастные фотополимеры. В мире акцент сделан на создании материалов для биопечати. Появился первый рекомбинантный человеческий коллаген для биопечати, также появился материал, который обладает антибактериальными свойствами, которые сохраняются даже после селективного лазерного спекания.

В России сделан большой шаг в области создания биоприпринтеров, появился первый отечественный биоприпринтер для печати высокотемпературными пластиками, в частности ультемом и РЕЕК (рис. 2). В настоящее время уже можно создавать индивидуальные эндопротезы всех крупных суставов человеческого скелета и все чаще используются имплантаты из материала РЕЕК. В мире появился высокоточный биоприпринтер (2 мкм) — рис. 3. Налицо прогресс в созда-

Рис. 2. Anyform 650-PRO компании TOTAL Z для печати высокотемпературными пластиками



нии оборудования для контроля качества материалов и изделий, используемых в аддитивном производстве. Появился томограф, который позволяет контролировать напечатанные медицинские изделия, и оптический анализатор, позволяющий контролировать материалы, из которых изделия печатаются.

В сфере программного обеспечения появился модуль для 4D-визуализации бельгийской компании Materialise. Пока только для кардиологии, но в перспективе для травматологии и ортопедии. Компания первой в мире получила также разрешение FDA на 3D-печать анатомических объектов для диагностических целей. Немецкая компания MediCAD впервые представила модуль, позволяющий не только визуализировать, но и создавать индивидуальные имплантаты.

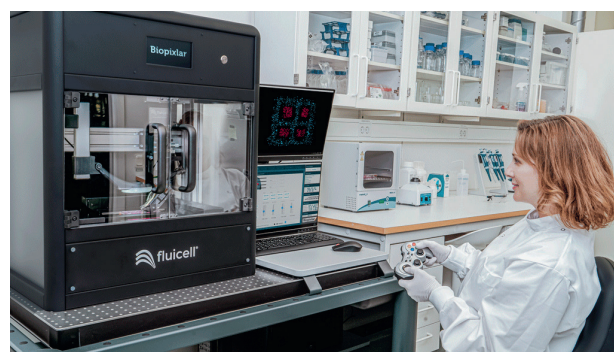
#### Биопечать и тканевая инженерия на службе кастомизации

В области биопечати акцент делается на создании магнитной и акустической левитации, над чем в России работают МГУ им. М. В. Ломоносова и компания 3D Bioprinting Solutions. За рубежом идут доклинические испытания биопечати кожи непосредственно на поверхности ожоговых ран. Этой же проблемой занимается отечественная компания 3D Bioprinting Solutions. Американский университет Wake Forest осваивает печать органных конструкторов — печень, почка, яичник, мочевого пузыря, анальный сфинктер, кровеносный сосуд. Первое в мире искусственное сердце напечатали ученые университета Тель-Авива, используя собственные клетки пациента и его биологические материалы.

#### Что дальше?

В перспективе разработка и усовершенствование индивидуальных бионических протезов, имплантатов, медицинского инструментария, 3D-печать на поверхности имплантатов. Биопечать васкуляризованных органов, нервной ткани и разработка технологий создания новых материалов для биопечати. ■

Рис. 3. Высокоточный (2 мкм) биоприпринтер Biopixlar компании Fluicell (Швеция) с Gammapad-управлением. Фото: <https://fluicell.com/>



# 3D-принтер нового поколения Hercules G2

История первого пользователя 3D-принтера Hercules G2 компании 3D Point — студии 3D-печати.

*«Мы приобрели Hercules G2 еще на этапе разработки. У нас есть другие модели 3D-принтеров от компании IMPRINTA, и качество и скорость этих принтеров нас устраивали. Были некоторые опасения касательно отсутствия SD-карты в новом принтере, системы удаленного запуска, touch-дисплея и заявленной производительности. Много нового и непривычного в принтере, и были сомнения, будет ли это стабильно работать.»*

*В итоге Hercules G2 нас порадовал. Регистрация принтера не вызвала никаких сложностей, процедура достаточно стандартная. А вот удаленный запуск на печать оказался очень удобной функцией. Не нужно вставать из-за рабочего места, чтобы запустить на печать. Отправляем файл на печать и по веб-камере смотрим, как идет процесс. Дисплей тактильно очень приятный, нет отставаний при нажатии.*

*По скорости печати Hercules G2 несомненно превосходит многие модели. У нас есть ряд изделий, которые мы продаем готовыми и постоянно печатаем, и на Hercules G2 их производство в два раза быстрее...».*

Подробный отзыв можно посмотреть на Youtube-канале «Аддитивная кухня».

Российский производитель 3D-принтеров IMPRINTA выпустил новую модель принтера с уникальной для российского рынка системой удаленного слайсинга и запуска на печать. 3D-принтер получил название Hercules G2.

Hercules — название всей линейки 3D-принтеров, выпускаемой компанией IMPRINTA, а G2 обозначает второе поколение. И действительно, эта модель существенно отличается не только от своих предшественников, но и от 3D-принтеров других производителей.

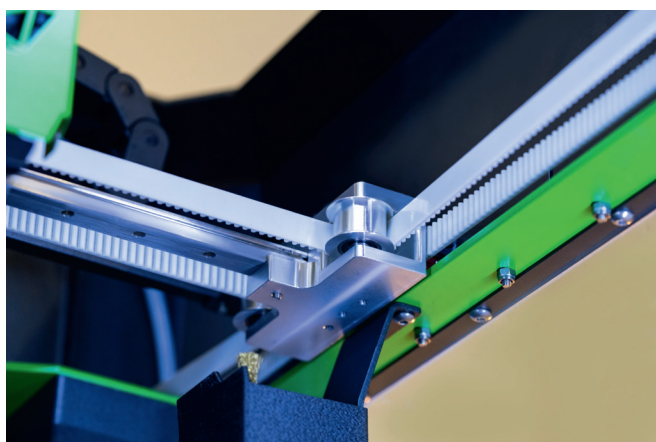
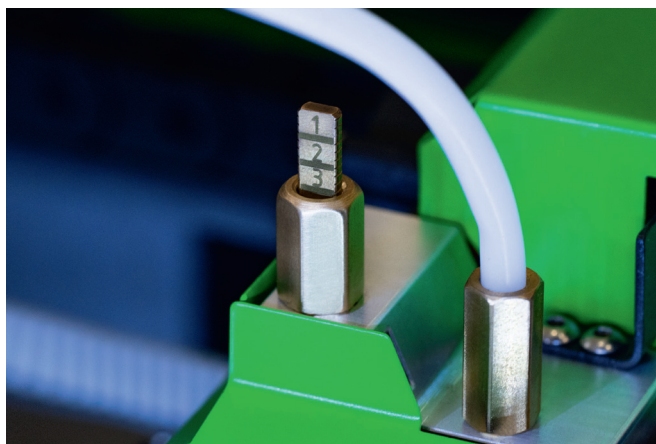
Одно из самых существенных отличий — полное отсутствие разъема под SD-карту или другие накопительные устройства и наличие системы Diaprint Cloud.

Diaprint Cloud — программа удаленного слайсинга и запуска на печать. Работает программа с любого устройства, подключенного к интернету. Diaprint Cloud имеет слайсинг, разработанный на движке Cura и имеет схожий интерфейс, понятный многим. Передача файлов на печать происходит по wi-fi или по локальной сети. Файл полностью загружается во внутреннюю память принтера, и только после этого запускается печать. У каждого пользователя свой личный кабинет, в котором отображаются все принтеры Hercules G2 пользователя и их статус, все загруженные файлы и история печати. В личный кабинет приходят все уведомления с принтера, и можно наблюдать за ходом печати по веб-камерам, установленным внутри принтера. Также можно делиться своим принтером с другими пользователями.

Если же есть ограничения для работы в облаке, например, закрытое предприятие, где невозможно обеспечить доступ в интернет, то разработана версия Diaprint PC с ограниченным функционалом.

Производительность Hercules G2 100 см<sup>3</sup>/час — это в два раза выше, чем у предыдущих моделей. Такая производительность достигается за счет серьезных комплектующих, таких как: двигатель Nema 23 для XY, армированный ремень, 16мм направляющие по оси Z и 12 мм рельсовые направляющие по осям X и Y и мощный обдув рабочей зоны.





Hercules G2 оснащен системами контроля наличия и подачи пластика Sensitive PROChek, системой контроля деформации при печати Solid Print PROChek, системой блокировки дисплея. Дисплей установлен цветной емкостный 7 дюймов, на котором можно просмотреть не только название файла, но и содержание.

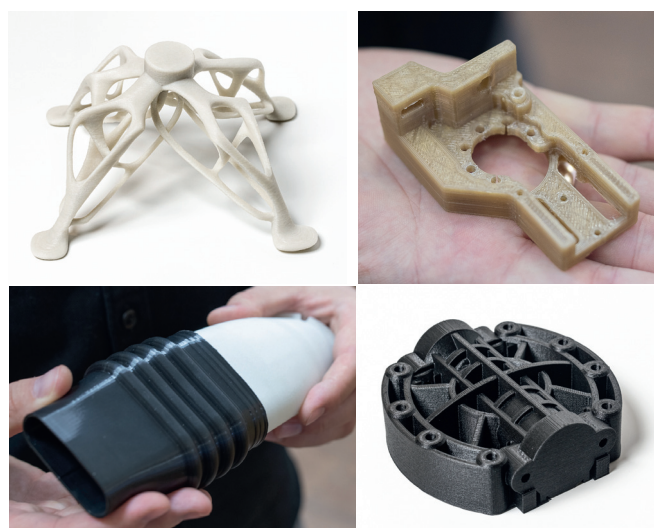


В новом 3D-принтере установлен и обновленный экструдер UniHot v3 с цельнометаллическим хотэндом и максимальной температурой печати 410°C. Для печати теперь доступны композитные и высокотемпературные, высокопрочные материалы. Сопла выполнены из стали для обычных пластиков и из титана для печати композитными материалами. У титановых



сопел износостойкость более чем в три раза выше, чем у латунных при печати композитными материалами.

Hercules G2 уже доступен для заказа. Для читателей журнала действует специальное предложение при покупке Hercules G2 до 31 декабря 2020 года по промокоду «АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» — сертификат на расходные материалы номиналом 30000 рублей. ■



Контакты:  
 +7 (800) 222-90-20, +7 (933) 332-90-20  
 sales@imprinta.ru  
 Москва, Большая Почтовая улица, 55/59с1, офис 327-329  
 Красноярск, Ястынская 15А, помещение 76

# БЕСПРЕЦЕДЕНТНОЕ КАЧЕСТВО СВАРКИ

# ОБНОВЛЁННАЯ СЕРИЯ ОПТИЧЕСКИХ ГОЛОВ FLW

Непревзойденная точность и  
широкий выбор опций

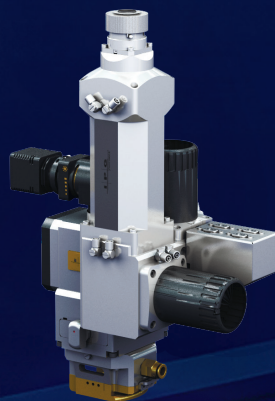
**FLW-D30-W**



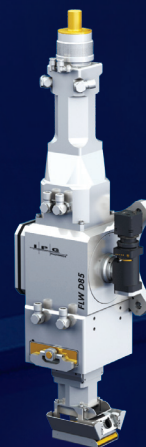
**FLW-D50**



**FLW-D50-W**



**FLW-D85**



## УВЕЛИЧЕННАЯ СКОРОСТЬ СВАРКИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ

### Подробнее о серии

Малый вес оптических голов позволяет добиться непревзойденной точности позиционирования. Благодаря широкому набору конфигураций, фокусных расстояний и дополнительного оборудования, пользователь может подобрать оптимальный набор для решения любых задач лазерной сварки. Различные системы защиты и контроля позволяют радикально повысить качество данной операции.

### РЕШЕНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

**NEW!**

**LDD-700**

Система  
мониторинга

Система мониторинга LDD-700 использует инфракрасный лазерный луч малой мощности, который проходит через выходную оптику сварочной головы соосно с рабочим излучением лазера. LDD-700 позволяет контролировать качество сварного шва, обеспечивать слежение за швом, измерять глубину проплава, высоту и ширину сварного валика, выявлять дефекты сварных швов (выбросы, недостаточное заполнение) и др.



# НАДЁЖНОСТЬ И ПРОСТОТА УПРАВЛЕНИЯ НОВЕЙШЕЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Обновленная линейка лазеров **YLS**, трехлучевые **YLS-BR** и лазеры с изменяемым диаметром пучка **AMB** – обеспечат максимальную эффективность решений и легкую интеграцию



## ВЫСОКАЯ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ



### Преимущества

КПД от розетки более 40%

Максимальная компактность

Отсутствие регламентных работ и простота эксплуатации

Расширенные режимы выходного излучения

Наибольший гарантийный срок и высочайшая надежность



Семейство чиллеров собственной разработки с оптимальными параметрами для лазеров и головок

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

+7 (496) 255 74 46; sales@ntoire-polus.ru

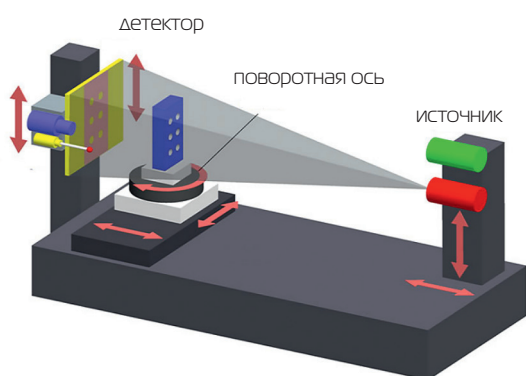
[www.ipgphotonics.com](http://www.ipgphotonics.com)



IRE-POLUS®

Компьютерная томография дает преимущества за счет воссоздания полной геометрии всей детали, включая ее внутреннюю структуру, а потому для производственного контроля томография является информативным инструментом, но **зачастую слишком медленным способом контроля.**

Для минимизации времени контроля деталей уже много лет на всех томографах компании **Werth** реализована процедура параллельного измерения и воссоздания геометрии измеряемой детали. Также для снижения скорости измерения оператор может изменять мощность тру-



Конструктивная схема томографа Werth



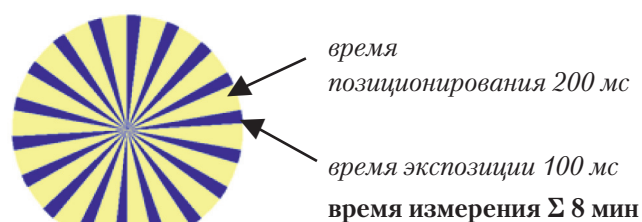
Сравнение времени измерения в разных режимах

ки и, увеличивая ее, снижать время измерения (в ущерб разрешению из-за увеличения размера фокального пятна). За счет уменьшения расстояния между трубкой и детектором также можно добиться снижения времени просвечивания (т.н. экспозиции) каждого сечения детали при прочих равных условиях.

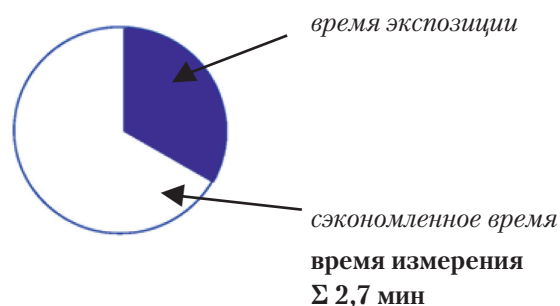
Время измерения также можно сократить за счет одновременного измерения нескольких деталей и последующего их автоматического разделения при помощи программного обеспечения, что, в свою очередь, накладывает определенные ограничения на увеличение и разрешение единичной детали.

**Уникальным решением, позволяющим снизить время измерения, стала новая функция OnTheFly-CT (заявлен патент).**

В классическом режиме измерения старт-стоп вращение поворотной оси непостоянное. В нем можно выделить две фазы: время на позиционирование детали (вращение оси от проекции к проекции) и последующая остановка оси для просвечивания проекции и регистрации информации детектором.



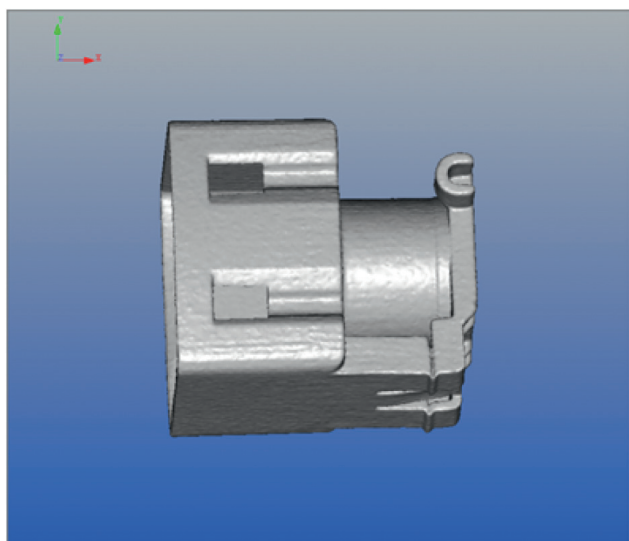
Цикл измерения в режиме старт-стоп



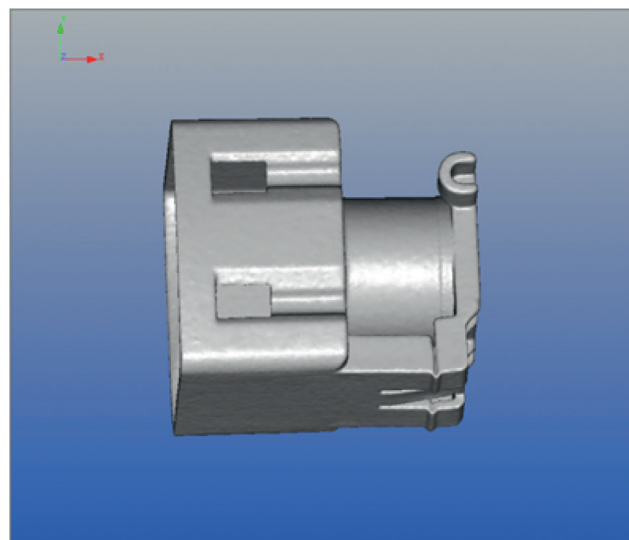
Время измерения в режиме OnTheFly-CT

Функция **OnTheFly-СТ** за счет непрерывного вращения поворотной оси во время сканирования детали и отсутствия потери времени на позиционирование детали позволяет значительно сократить время измерения. Реальная экономия времени — до 66% в зависимости от разрешения детектора (наилучший результат — для «быстрого» детектора с высоким разрешением).

В режиме **OnTheFly-СТ за счет оптимизации движения оси**, использования особого алгоритма обработки и специальных аппаратных средств обеспечивается непрерывное вращение поворотной оси, тем самым полностью исключается время позиционирования, что **обеспечивает существенную экономию времени**.



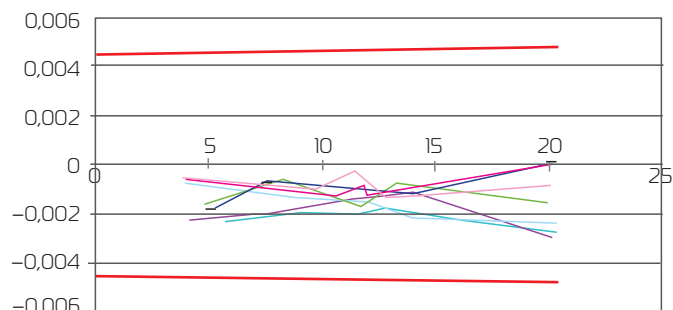
*Облако точек, полученное в результате измерения в режиме **старт-стоп***



*Облако точек, полученное в результате измерения в режиме **OnTheFLY-СТ***

Как видно из результатов, представленных выше, снижение времени измерения не влияет на качество получаемых данных, что также подтверждается протоколами измерений, полученных в разных режимах измерения.

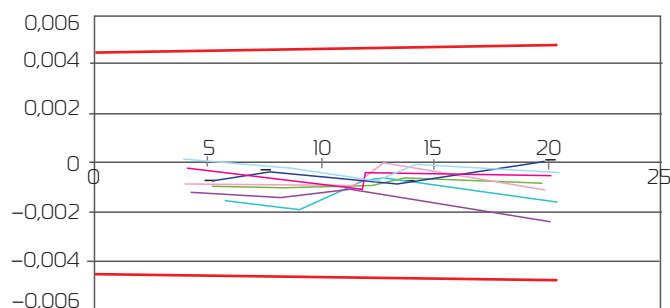
**Режим старт-стоп — время измерения 21 мин**



Погрешность, в мм      Длина, в мм

*Протокол калибровки в режиме **старт-стоп***

**OnTheFly — время измерения 2 мин**



Погрешность, в мм      Длина, в мм

*Протокол калибровки в режиме **OnTheFly-СТ***

Протоколы калибровки подтверждают одинаковую погрешность в разных режимах измерения.

Посмотреть видео по данной теме можно, отсканировав QR-код:



ЗАО НПФ «Уран»,  
г. Санкт-Петербург  
Тел.: +7 (812) 335-09-75,  
моб.: +7 (921) 310-17-12,  
<http://www.uran-spb.ru>

# Больше надежности, производительности и чистоты при автоматизированном удалении остаточного порошка и струйной обработке деталей, изготовленных методом аддитивных технологий с использованием полимерных материалов

*Новое поколение установок S1, разработанное подразделением AM Solutions – 3D post processing technology, задает новые стандарты в сфере удаления остаточного порошка и струйной обработки деталей, изготовленных методом аддитивных технологий с использованием полимерных материалов. Это касается не только элементов оснащения установки, таких как поворотная корзина, обеспечивающая эргономичную и безвредную для окружающей среды загрузку и выгрузку обрабатываемых деталей, поворотных сопел, которые предотвращают реконтаминацию, а также оснащения, соответствующего требованиям директив ЕС-ATEX к оборудованию и работе в потенциально взрывоопасной среде.*

Главными особенностями установки S1 нового поколения являются бережная и одновременно эффективная обработка, надежная подготовка абразива к повторному использованию, а также простое переключение между автоматическим и ручным режимом работы, обеспечивающее при промышленном использовании высокоэффективную и безопасную работу с неизменно высоким качеством.

Удаление остаточного порошка и подготовка поверхности для последующих технологических процессов, к примеру нанесения лака или покрытия, являются неотъемлемым этапом в цепочке производства

*Новая установка S1 для автоматизированного удаления остаточного порошка и струйной обработки небольших и средних партий деталей, изготовленных методом аддитивных технологий с использованием полимерных материалов. Оснащение установки позволяет проводить последующую обработку быстрее, эффективнее и с наилучшими воспроизводимыми результатами по сравнению с имеющимися уже в отрасли решениями.*





деталей, изготовленных с использованием порошкообразного полимера. Разрабатывая новое поколение установок S1, подразделение AM Solutions — 3D post processing technology группы компании Rösler, занимающееся поиском решений для последующей обработки деталей, изготовленных методом аддитивного производства, создала экономичную установку, которая работает по принципу Plug-and-Play — «подключи и работай» для удаления остаточного порошка в автоматизированном режиме и последующей струйной обработки небольших и средних партий деталей.

Кроме того, новая установка оснащена функцией переключения с автоматического режима на ручной для обработки крупных деталей без необходимости проведения каких-либо работ по перенастройке или переоборудованию, требующих, как правило, значительных затрат времени. Перемещая поворотную корзину в заднюю часть струйной кабины, ранее разблокировав ее нажатием кнопки, оператор делает держатели корзины и рабочие поверхности доступными для ручной обработки. Продуманная концепция предотвращает контакт оператора с движущимися деталями, что не требует дополнительного устройства и средства защиты от механического травмирования.

Автоматизированное удаление остаточного порошка — быстрый, стабильный и надежный в эксплуатации процесс

Встроенная поворотная корзина предназначена для автоматической обработки деталей партиями и рассчитана на объем до 25 л. Максимальный вес одной загрузки не должен превышать 50 кг. Специальное конструктивное исполнение корзины обеспечивает оптимальное распределение и переворачивание деталей, находящихся в ней во время струйной обработки. Обработка в поворотной корзине в сочетании с вращающимися струйными соплами гарантирует эффективную и одновременно бережную обработку деталей за относительно короткое время. В зависимости от технического задания для струйной обработки могут использоваться как стеклянные шарики, так и специально подобранные технологические средства для обработки деталей, изготовленных методом аддитивных технологий с использованием полимерных материалов. Струйные сопла установки S1, в отличие от обычных установок, не перемещаются вверх, а полностью и автоматически поворачиваются от зоны обработки. Такая техника предотвращает попадание порошка из держателя струйного сопла на обработанные детали и исключает их повторное загрязнение.

Для загрузки и выгрузки поворотная корзина поворачивается к дверному проему, находящемуся на передней панели установки, оставаясь при этом пол-

*Особенности новой установки S1 заключаются еще и в том, что, как и сама установка, так и поворотная корзина оснащены антистатическим полиуретановым покрытием. Специально подобранное число твердости по Шору для покрытия, использованного для поворотной корзины, предотвращает окрашивание деталей.*

*Кроме того, специальное конструктивное исполнение корзины обеспечивает оптимальное распределение и переворачивание деталей, находящихся в ней во время струйной обработки. Обработка в поворотной корзине в сочетании с вращающимися струйными соплами гарантирует эффективную и одновременно бережную обработку деталей за относительно короткое время.*



ностью внутри кабины S1. Благодаря этому обеспечена эргономичная загрузка и выгрузка поворотной корзины, исключая при этом попадание порошка на поверхности возле установки.

ПЛК-управление установки S1 позволяет сохранять различные программы струйной обработки, содержащие параметры рабочего давления струи и частоты вращения корзины для отдельно взятых деталей. Мониторинг заданных параметров во время обработки осуществляется автоматически. При этом параметры могут быть сохранены или перенесены в программную систему более высокого уровня. При возникновении отклонений от заданного значения система оповещения установки подает звуковой сигнал.

Комплексная охрана здоровья и труда, а также бережная обработка деталей

Особенности новой установки S1 заключаются еще и в том, что как и сама установка, так и поворотная корзина оснащены антистатическим полиуретановым покрытием. Специально подобранное число твердо-

сти по Шору для покрытия, использованного для поворотной корзины, предотвращает окрашивание деталей. Так как в процессе обработки остаточный порошок поднимается внутри установки, может возникнуть взрывоопасная среда. Данную проблему чаще всего производители установок возлагают на пользователя оборудования, рекомендуя при этом подачу в установку только определенного количества порошка. AM Solutions – 3D post processing technology решила данную проблему, встраивая в установку все важнейшие компоненты, такие как двигатели и клапаны, произведенные в соответствии с требованиями директив ЕС-ATEX к оборудованию и работе в потенциально взрывоопасной среде.

Благодаря сравнительно низкому уровню шума (менее 80 дБ (А) при давлении 3 бар во время процесса струйной обработки, а также благодаря герметичному затвору установки во время работы операторы могут работать без специальных очков и средств защиты органов слуха.

**Эффективная подготовка абразивного материала к повторному использованию для достижения хороших результатов**

Оснащение компактной установки для последующей обработки насчитывает не только шкаф и систему управления, блок фильтрации и сменный контейнер для абразивного материала, а также и встроенное устройство подготовки абразивного материала к повторному использованию. Встроенные в устройство центробежный пылесос и вибрационное сито удаляют пыль и изношенный абразивный материал из рабочего оборота, обеспечивая тем самым неизменно высокое качество абразивного материала и результатов струйной обработки.

К дополнительному оснащению установки относятся два смотровых окна (автоматическая и ручная струйная обработка), в которых воздушная завеса предотвращает попадание абразивного материала на стекла.

Новая установка S1 соответствует не только самым высоким требованиям к технологической безопасности и эффективности благодаря универсальности и продуманной концепции, но и обеспечивает необходимую защиту в сфере охраны труда и здоровья.

*Компания Rösler Oberflächentechnik GmbH, управляемая частным собственником, уже более 80 лет занимается производством оборудования и технологических средств для обработки поверхностей. Наша компания – лидер международного рынка – предлагает широкий ассортимент оборудования, технологических средств и услуг в области техники галтовки и дробеструйной/дробеметной техники для различ-*

*Для загрузки и выгрузки корзина поворачивается к дверному проему, находящемуся на передней панели установки, оставаясь при этом полностью внутри S1. Благодаря этому обеспечена эргономичная загрузка и выгрузка поворотной корзины, избегая при этом попадания порошка на поверхности возле установки.*



*ных отраслей промышленности. Номенклатура технологических средств, насчитывающая около 15000 видов, разрабатывается с учетом специфических требований клиентов специально в наших испытательных центрах и лабораториях по всему миру. AM Solutions, бренд группы Rösler, предлагает различные решения и широкий спектр комплексных услуг в сфере 3D-печати/аддитивного производства. Центральный учебный центр Rösler Академия проводит семинары, ориентированные на практику по технике галтовки и дробеструйной/дробеметной технике, бережливому менеджменту и аддитивному производству. Помимо немецких заводов, расположенных в Унтермерцбах/Меммельсдорф и Бад-Штаффельштайн/Хаузен, группа компаний Rösler имеет 15 филиалов и около 150 дополнительных представительств по всему миру. ■*

Подробная информация по ссылке: [www.rosler.com](http://www.rosler.com)

Фото: Rösler Oberflächentechnik GmbH

ООО «Реслер Руссланд»  
РФ, 111020, г. Москва,  
ул. Боровая, д. 7, стр. 4  
Тел.: +7 (495) 247-55-80  
E-mail: [rosler-ru@rosler.com](mailto:rosler-ru@rosler.com)  
[www.rosler.com](http://www.rosler.com)

Rösler Oberflächentechnik GmbH  
3D post processing technology  
Vorstadt 1  
DE - 96190 Untermmerzbach  
Tel.: +49 9533 / 924-0  
[marketing@rosler.com](mailto:marketing@rosler.com)  
[www.rosler.com](http://www.rosler.com)

# Микроуровневое моделирование теплофизического процесса селективного лазерного сплавления

А.С. Борейшо<sup>1,2</sup>, д.т.н.; Г.Т. Джгамадзе<sup>2</sup>; А. А. Мусеев<sup>1</sup>; А. В. Савин<sup>1,2</sup>, д.т.н.; П.Г. Смирнов<sup>1</sup>; С.С. Смоленцев<sup>2</sup>; П.С. Третьяк<sup>2</sup>  
dgvancat96@mail.ru, terminalmashine@gmail.com, izooandrey@inbox.ru

<sup>1</sup> Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

<sup>2</sup> Акционерное общество «Лазерные системы».

На сегодняшний день селективное лазерное сплавление является одним из перспективных направлений развития аддитивных технологий. Распространенным способом подбора необходимых режимов сплавления является многоуровневое моделирование.

В данной работе рассматривается микроуровневое моделирование, которое позволяет подробно изучить процессы сплавления металлического порошка. При математическом моделировании двойного прохода лазерного излучения были обнаружены краевые эффекты, которые подробно описаны в статье.

Использование численного моделирования позволяет снизить трудозатраты, исследовать влияние режимов обработки на качество получаемого материала, определить оптимальные параметры и оценить границы области допустимых режимов.

## Введение

Одним из перспективных направлений аддитивных технологий является технология селективного лазерного сплавления (СЛС) — технология послойного изготовления трехмерных изделий путем сплавления частиц металлического

порошка с использованием в качестве источника тепла лазерного излучения [1].

Одной из проблем технологии СЛС является проблема контроля микроструктуры и свойств готового изделия. Если параметры процесса выбраны неправильно, могут возникать дефекты в готовом изделии, такие, как поры несплавления и поры кипения, трещины и т.п. Стабильность процесса СЛС определяется теплофизическими эффектами, возникающими во время выращивания изделия. Выявление и понимание этих эффектов и их взаимодействий важно

для получения качественного изделия. Основные эффекты — это кондуктивная теплопроводность, конвекция в газовой и металлической фазах, излучение, фазовые переходы, силы тяжести и плавучести, поверхностное натяжение, реактивная отдача паров металла, эффект Марангони.

Экспериментальный поиск технологических режимов, обеспечивающих удовлетворительные по качеству микроструктуры для каждого конкретного металла или сплава, крайне трудоемок. Численное моделирование СЛС-процессов снижает трудозатраты на

Рис. 1. Структура методологии многоуровневого моделирования СЛС-процессов



подбор режимов для удовлетворительного по качеству и времени сплавления порошков [2].

Анализ работ по численному моделированию процесса СЛС [1, 3–5] показал, что для решения задачи моделирования используют подход расщепления сложной задачи на задачи различных уровней, решения которых согласуются по специально установленной процедуре. Можно выделить три уровня численного моделирования процесса СЛС — микромасштабный, мезомасштабный и макромасштабный (рис. 1).

В рамках представленной работы рассматривается микроуровень.

### Микроуровневая модель

Обобщенная микроуровневая математическая модель, понимание которой сложилось в литературе к настоящему времени [6–8], представляет собой систему уравнений гидродинамики многофазной среды со свободной поверхностью, дополненную описанием фазовых переходов и лучистого теплообмена.

### Численная реализация

Микроуровневая математическая модель процесса СЛС может быть реализована в рамках пакетов, предназначенных для моделирования гидродинамики, с дополнениями, описывающими переменные свойства среды. В рассматриваемой работе математическая модель реализована на базе пакета ANSYS Fluent с ис-

пользованием аппарата пользовательских функций.

Для описания границы раздела фаз применяется модель многофазной жидкости Volume of Fluid (VOF). В модели VOF для жидкостей совместно используют один набор уравнения импульсов, а объемная доля каждой из жидкостей в каждой вычислительной ячейке отслеживается по всей области.

Для построения сетки с адаптивным сгущением проводится декомпозиция расчетной области на подобласти, в каждой из которых построение и сгущение сетки управляется отдельно (рис. 2).

Поскольку геометрия задачи с течением времени трансформируется, изменяется форма и положение границы раздела фаз, сетка трансформируется вслед за ней. Динамическая сетка позволяет моделировать произвольное сложное перемещение межфазной поверхности.

### Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты моделирования двух параллельных проходов лазерного пятна по слою металлического порошка. Случайная структура, сформированная частицами, получена предварительно методом механической аналогии [9]. Смоделирована полидисперсная засыпка частицами размером в диапазоне от 33 до 57 мкм. Размеры расчетной области выбраны таким образом, что после адаптации вычислительной сетки

размер наименьшей ячейки был приблизительно 1/10 диаметра наименьшей частицы.

Вычислительная модель является универсальной с точки зрения выбора материала порошка. Для демонстрации работоспособности модели и ее результатов выбран материал — нержавеющая сталь AISI 316 [10, 11].

Основные параметры лазерной обработки порошка выбраны следующим образом: мощность излучения 130 Вт, скорость сканирования 600 мм/с, диаметр лазерного пятна 70 мкм, траектория сканирования — зигзагообразная. Вычисления выполнены для двух параллельных проходов лазерного пятна, находящихся на расстоянии 110 мкм друг от друга.

На рис. 3 показана полученная форма поверхности и поле температуры.

Частицы порошка вблизи лазерного пятна нагреваются и полностью расплавляются. Сила поверхностного натяжения вызывает слияние расплавленных частиц [12]. Подложка, находящаяся под слоем порошка, также расплавляется. Под воздействием поверхностного натяжения соседние расплавленные частицы стекают к подложке, этот процесс известен как эффект смачивания, в результате которого расплавленный металл равномерно распреде-

Рис. 2. Процесс адаптации сетки: слева — первая стадия, справа — третья стадия

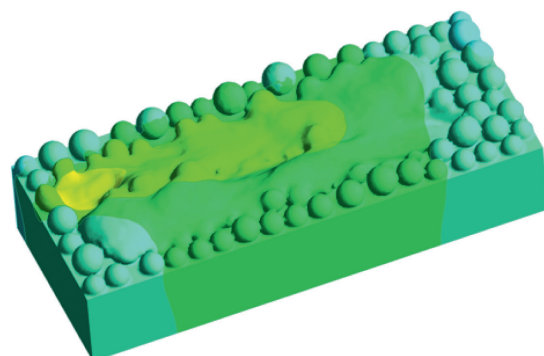
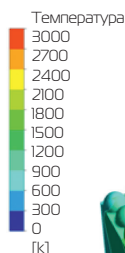
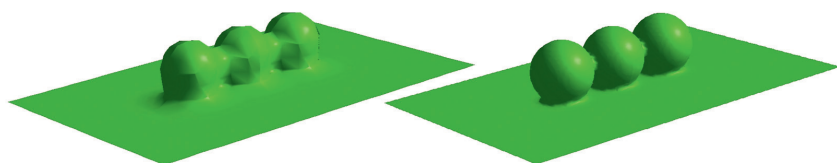
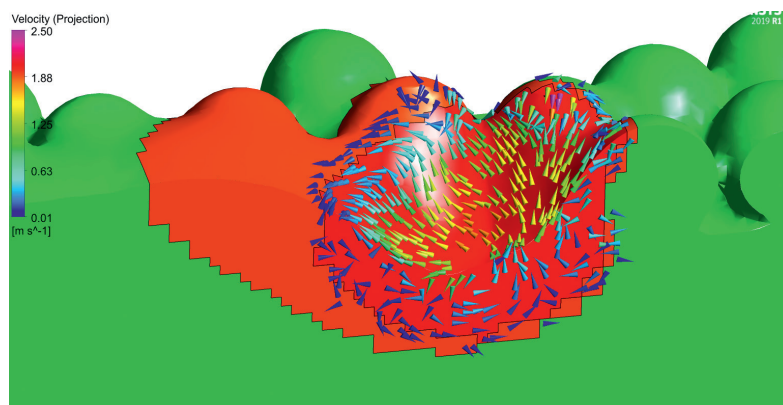


Рис. 3. Форма поверхности материала, полученной после двух параллельных проходов лазерного пятна. Цветом показана температура поверхности.

ляется по поверхности подложки, что приводит к хорошей связи между вновь расплавленным слоем и подложкой [13].

Большая часть энергии лазерного излучения поглощается в центре лазерного пятна. Плотность энергии лазерного излучения достаточно велика для того, чтобы часть металла испарялась и пары создавали силу реактивной отдачи. Возникает мощная циркуляция жидкого металла, управляемая силами поверхностного натяжения, эффектом Марангони (возникновение потоков жидкости из-за неравномерности коэффициента поверхностного натяжения), силами Архимеда, силой тяжести и реактивной силой отдачи испаряющегося металла (рис. 4). В центре лазерного пятна возникает давление отдачи, которое толкает центральную область металла, находящуюся в лазерном пятне, вниз. Испарение может привести к быстрому охлаждению поверхности ванны расплава и появлению теплового градиента, а впоследствии — к развитию эффекта Марангони.

Рис. 4. Микрогеометрия слоя сферических частиц порошка на подложке и направление потоков конвекции расплава



Моделирование показывает, что возникают два краевых эффекта: в начале прохода образуется утолщение; в конце прохода образуется углубление, вызванное действием реактивной силы отдачи паров металла. Во время второго прохода частицы, находящиеся между треками, постепенно расплавляются, образуется единая расплавленная зона без остаточных пор. Во время второго прохода частицы, находящиеся между треками, постепенно расплавляются, на некоторых участках наблюдается недоплав.

Возникший дефект можно устранить путем изменения параметров лазерного излучения.

### Заключение

Результаты вычислений показывают, что микроуровневое моделирование является полезным инструментом, позволяющим исследовать влияние режимов обработки на качество получаемого материала, определить оптимальные параметры и оценить границы области допустимых режимов. ■

### Литература

- Гордеев Г. А., Кривилев М. Д., Анкудинов В. Е. Компьютерное моделирование селективного лазерного плавления // Вычислительная механика сплошных сред. 2017. Т. 10. № 3. С. 293–312.
- Богданович В. И., Гиорбелидзе М. Г., Сотов А. В., Смелов В. Г., Агаповичев А. В. Математическое моделирование процессов плавления порошка в технологии селективного лазерного сплавления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 4. С. 2–3.
- Nicholas P. L., Brown G. R., Sienz J., Cherry J., Belblidia F. A review of Computational Modelling of Additive Laser Manufacturing — multi-scale and multi-physics. SDM-14 Pre-Proceedings, 2014. Т. 14. 668–690 pp.
- Кривлев М. Д. Двухуровневое математическое моделирование процессов переноса и структурообразования в металлургии мезоскопических объемов. Дис. д. физ.-мат. наук. Ижевск. УдГУ. 2018. 316 с.
- Кривлев М. Д., Гордеев Г. А., Анкудинов В. Е., Харанжевский Е. В. Двухуровневое моделирование селективного лазерного сплавления импульсным лазером // Аддитивные технологии. 2020. Т. 10. № 3. С. 293–312.
- Zhang Y., Zhang J. Modeling of solidification microstructure evolution in laser powder bed fusion fabricated 316L stainless steel using combined computational fluid dynamics and cellular automata // Journal Additive Manufacturing. 2019. № 28. 750–765 pp.
- Chunlei Qiu, Chinnapat Panwisawas, Mark Ward, Hector C. Basoalto, Jeffery W. Brooks, Moataz M. Attallah. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting // Journal Additive Manufacturing. 2015. № 96. 72–79 pp.
- Tang C., Tan J. L., Wonga C. H. A numerical investigation on the physical mechanisms of single track defects in selective laser melting. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Т. 126. 957–968 pp.
- Савин А. В., Моисеев А. А. Моделирование плотных случайных упаковок эллипсоидальных тел методом механической аналогии // Матем. моделирование. 2016. Т. 28. № 10. С. 87–96.
- Choong S. Kim. Thermophysical Properties of Stainless Steels. Chemical Engineering Division, 1975.
- Su Y., Li Z., Mills K. C. Equation to estimate the surface tensions of stainless steels // Journal of materials science. 2005. Т. 40. 2201–2205 pp.
- Khairallah S. A., Anderson A. Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder // J. Mater. Process. Technol.. 2014. Т. 214. № 11. 2627–2636 pp.
- Li R. D., Liu J. H., Shi Y. S., Wang L., Jiang W. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2012. Т. 59. № 9. 1025–1035 pp.

# Отбор деталей ГТД для изготовления с помощью аддитивных технологий

Д.В. Федосеев, П.Ю. Козляков, А.В. Попарецкий, П.А. Стариков  
АО «ОДК», ПАО «ОДК-Сатурн», ОКБ им. А. Льюльки – филиал ПАО «ОДК-УМПО»

По мере совершенствования технологий аддитивного производства растет потребность в рациональных и эффективных методиках для определения деталей, пригодных для производства с помощью аддитивных технологий, а также для получения представления о том, какие преимущества для конкретной детали открывает применение этих технологий. Скрининг деталей для изготовления газотурбинных двигателей (ГТД) с применением аддитивных технологий проводится с учетом возможности обеспечения подготовки производства, предусматри-

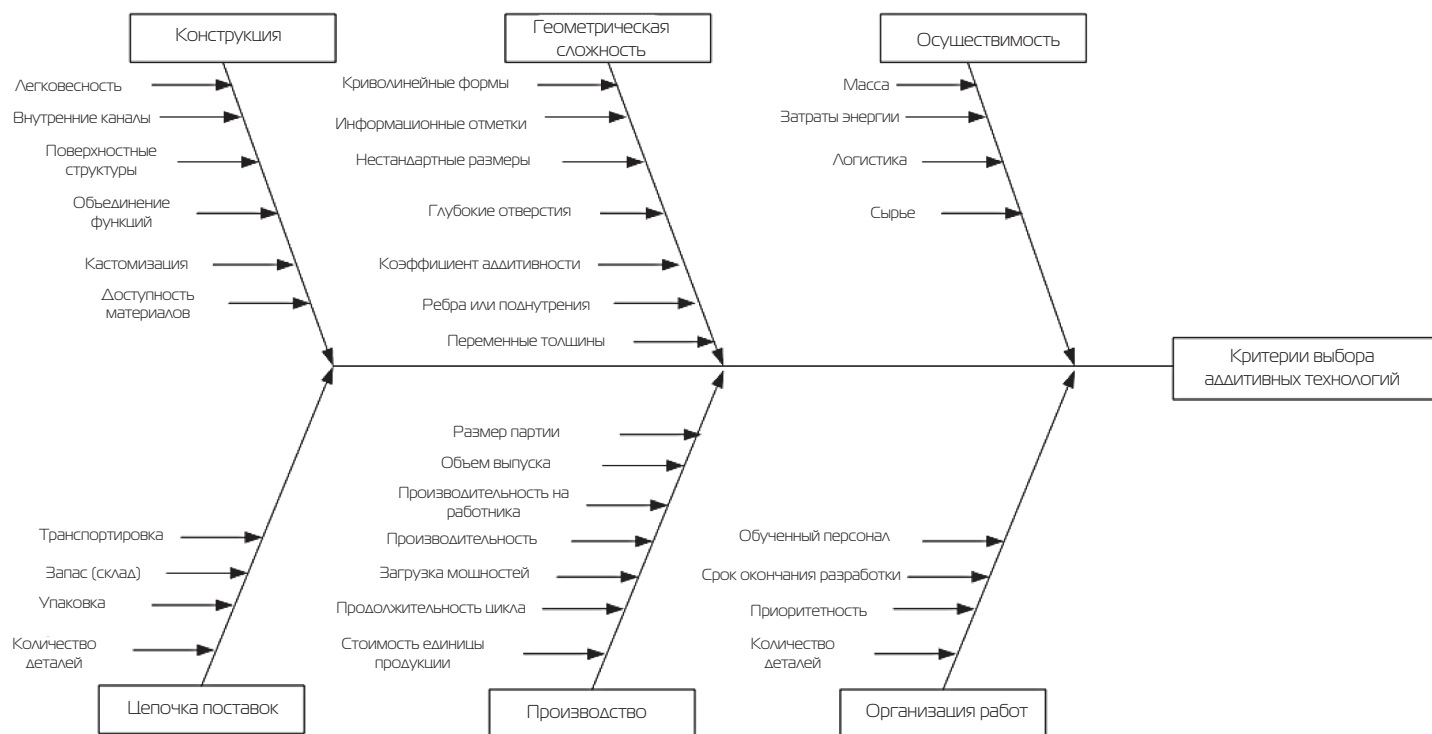
вающей взаимосвязанное решение конструкторских и технологических задач, направленных на снижение стоимости и сроков изготовления деталей, возможности обеспечения добавленных ценностей при их перепроектировании под аддитивное производство (например, снижение массы или агрегация нескольких смежных деталей в одну).

## Введение

До настоящего времени методика отбора деталей для аддитивного производства в основном

зависела от уровня компетенций пользователя, что значительно ограничивало ее повсеместное использование. Для интеграции процедуры скрининга в автоматизированные процессы разработки необходима апробированная методика, основанная на многокритериальной модели принятия решений, минимально зависящей от компетентности конкретного специалиста в части аддитивных технологий. Потенциал применения аддитивных технологий основывается на рассмотрении рациональных преимуществ, стимулирующих применение адди-

Рис. 1. Общая схема, отображающая основные критерии выбора аддитивных технологий [1]



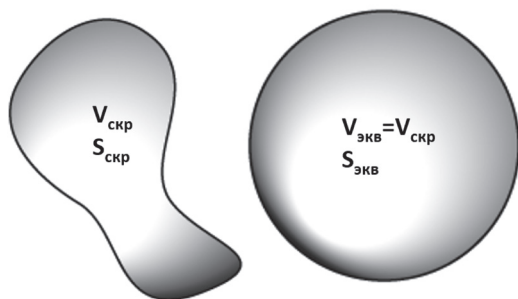
тивного подхода по сравнению с традиционными методами производства. Несмотря на то, что существует множество технологических барьеров аддитивного производства, они в основном не рассматриваются при первичном отборе деталей. Такой подход может быть выигрышным для повышения эффективности процесса отбора и определения деталей, имеющих большие перспективы перепроектирования под аддитивное производство.

На рис. 1 представлена классификация критериев отбора деталей для аддитивного производства. В целом они подразделяются на несколько основных групп: конструкция, геометрическая сложность, трудозатраты, экономические преимущества.

Группы критериев, связанных с конструктивной и геометрической сложностью, главным образом подразумевают улучшение функциональных и рабочих характеристик, а также расширение технологических возможностей благодаря применению аддитивных технологий. Критерии, связанные со снижением стоимости и экономии времени, распределены по различным категориям, относящимся как к производству, так и к цепочке поставок.

Но для принятия финального решения по рассмотрению кандидата для производства с помощью аддитивных технологий необходимо использовать более точные методы оценки, а именно — оценить перспективность детали с

Рис. 2. Эквивалентные площади



использованием количественных критериев.

### Измерение коэффициента аддитивности методом эквивалентных площадей

Введение маркера, позволяющего оценить «аддитивность» (целесообразность аддитивного изготовления) детали, основываясь на ее геометрии, кажется наиболее целесообразным решением.

Сравнение деталей путем оценки отношения площади тела к его объему будет являться неправильным критерием, т.к. изменение площади тела будет изменяться пропорционально квадрату размера, определяющего его объем (например, площадь сферы растет пропорционально квадрату радиуса). В этом случае коэффициент, описывающий сложность геометрии, будет меняться с изменением масштаба тела.

По этой причине оценку сложности тел, коэффициента аддитивности, будет объективнее выполнять, проводя сравнение их площадей ( $S_{скр}$ ) к эквивалентной площади сферы ( $S_{экр}$ ), объем которой равен объему исследуемого тела ( $V_{скр} = V_{экр}$ ).

Исходя из того, что объем сферы равен

$$V_{экр} = \frac{4\pi r^3}{3},$$

определим ее площадь, выразив через объем исследуемого тела:

$$S_{экр} = 4\pi r^2, \text{ где } r \text{ будет равно:}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V_{скр}}{4\pi}} = 0,6203 \cdot \sqrt[3]{V_{скр}}; \quad (1)$$

$$S_{экр} = 4\pi \cdot (0,6203 \cdot \sqrt[3]{V_{скр}})^2 = 4,836 \cdot V_{скр}^{2/3}; \quad (2)$$

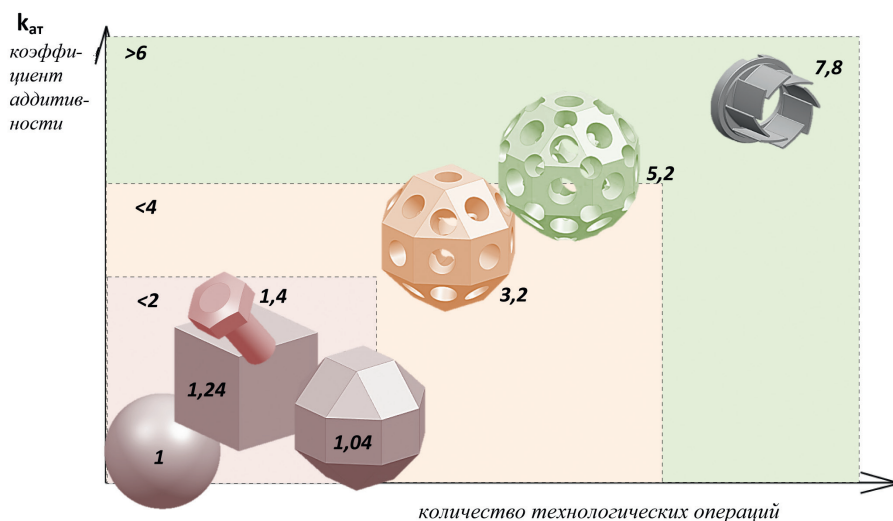
тогда коэффициент аддитивности вычисляется по формуле:

$$k_{ат} = \frac{S_{скр}}{S_{экр}} = \frac{S_{скр}}{4,836 \cdot (V_{скр})^{2/3}} = 0,207 \cdot S_{скр} \cdot V_{скр}^{-2/3}. \quad (3)$$

При сравнении площадей по вышеописанной методике получаем следующие распределения (рис. 2) деталей и критериев целесообразности их рассмотрения с целью внедрения в АП (интервалы выведены опытным путем, после проведения некоторого объема анализа деталей):

$k_{ат} < 2$ : детали, имеющие простую форму, получаемые по традиционной технологии за минимальное количество технологических операций. Изготовление таких деталей целесообразно только с точки зрения сокращения сроков производства. В процессе про-

Рис. 3. Градация топологической сложности некоторых деталей и критерии выбора



ведения скрининга такие детали предлагается не учитывать.

$2 < k_{ar} < 4$ : детали, которые стоит рассматривать, но вероятность получения положительного эффекта от их изготовления с применением АТ мала. Детали, требующие доработки и/или объединения сборочных единиц.

$k_{ar} > 4$ : детали с таким уровнем сложности зачастую имеют сложную геометрию и большое количество технологических операций в производственном цикле. Рекомендуются к обязательному рассмотрению для внедрения.

В итоге методику проведения отбора ДСЕ (деталей и сборочных единиц) для аддитивного производства (рис. 4) можно сформулировать следующим образом:

Отсортировать ДСЕ по габаритам. Исключить ДСЕ, габаритные размеры которых превышают размеры рабочей зоны оборудования аддитивного производства. Обратить внимание на возможность разделения ДСЕ на части с последующим разъемным или неразъемным соединением полученных заготовок в сборочную единицу. Рассмотреть объединение нескольких соседних ДСЕ в одну деталь, подходящую по габаритам.

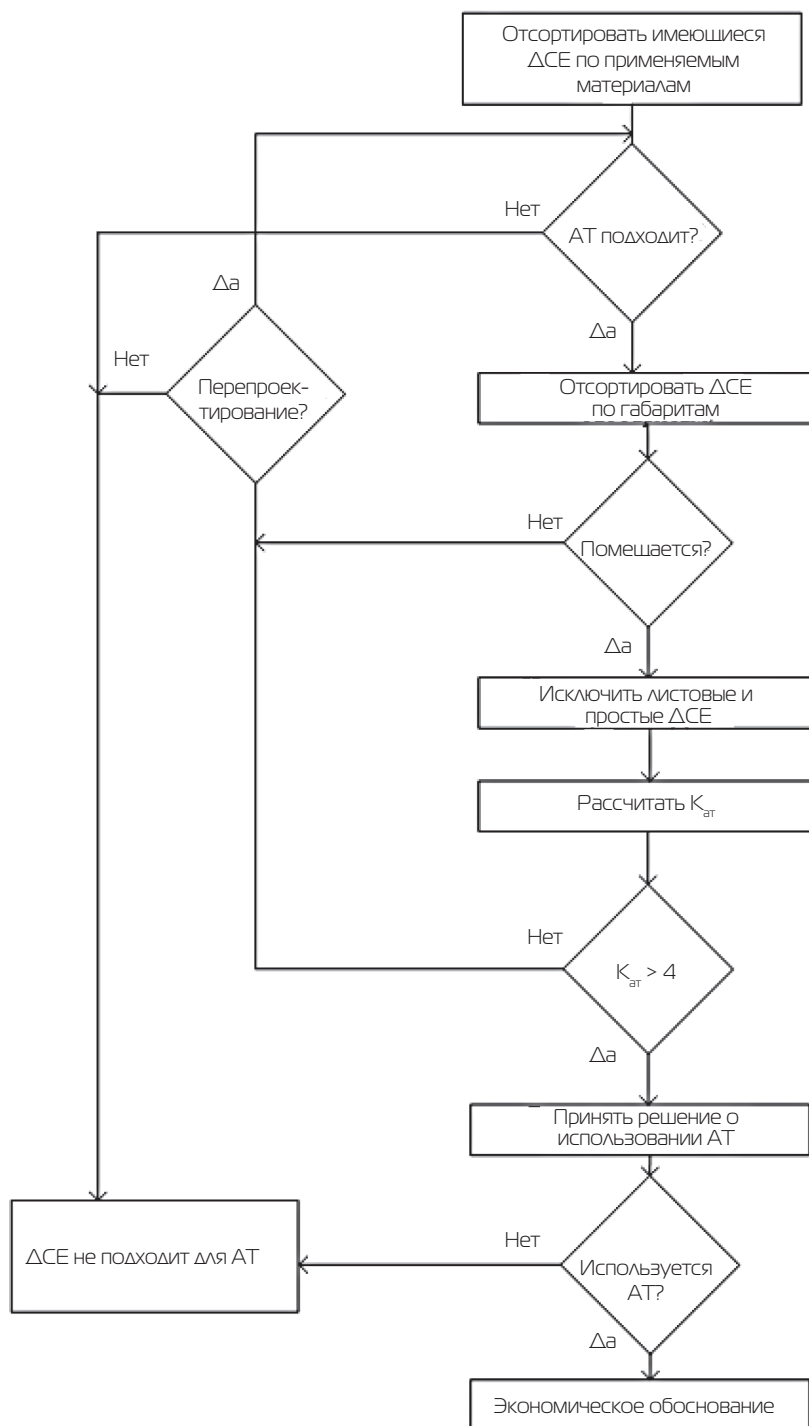
Отсортировать имеющиеся ДСЕ по применяемым материалам. Исключить ДСЕ, материалы которых не могут быть заменены на доступные (применяемые), имеющиеся в аддитивном производстве.

Исключить из списка детали из листового металла (плоские и незначительно деформированные листы, а также ДСЕ простой геометрической формы типа цилиндра, конуса и т.д.).

Произвести расчет коэффициента аддитивности.

5) Принять решение о технической целесообразности аддитивного производства детали и необходимости проведения перепроектирования.

Рис. 4. Блок-схема методики отбора ДСЕ для АТ



6) Провести экономическое обоснование полного цикла изготовления в традиционном и аддитивном производстве (с учетом постобработки).

#### Практический пример

В качестве примера рассмотрим деталь, изготавливаемую по

классической технологии (механическая обработка), и деталь с топологической оптимизацией с учетом прилагаемых нагрузок.

Согласно методике отбора была выбрана деталь кронштейна (рис. 5), которая удовлетворяет основным первичным критериям отбора (материал подходит, раз-



мер детали меньше размеров рабочей области построения аддитивной машины).

Затем был произведен расчет коэффициента аддитивности, который позволил принять предварительное решение о необходимости перепроектировать деталь с использованием топологической оптимизации. После завершения процесса оптимизация была получена вторая версия кронштейна (рис. 6).

Мы можем видеть, что значение коэффициента аддитивности увеличилось значительно по сравнению с неоптимизированной версией детали. Далее, учитывая сниженную массу кронштейна, мы принимаем решение о целесообразности применения аддитивных технологий для производства данной детали.

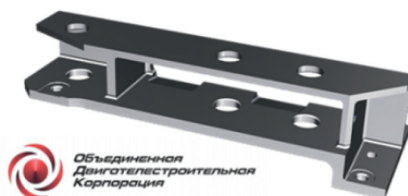
В качестве второго примера была взята детали завихрителя газотурбинного двигателя. Исходное изделие состоит из трех частей и обладает довольно низкой технологичностью при сборке. Коэффициенты аддитивности отдельных частей (рис. 7) позволяют сделать вывод о том, что в использовании аддитивных технологий нет необходимости. Но в рамках использования методики на этапе перепроектирования возможно рассмотрение агрегации деталей в единое изделие. Соответственно были проведены работы по перепроектированию завихрителя.

В рамках данных работ три отдельных детали завихрителя были объединены в одну, что позволило в итоге получить высокий коэффициент аддитивности (рис. 8), а также значительно сократить цикл изготовления и повысить качество получаемого изделия.

## Вывод

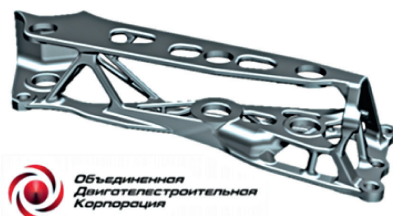
Определение деталей-кандидатов для изготовления с помощью аддитивных технологий — это одна из проблем, стоящих на пути

Рис. 5. Кронштейн, разработанный для производства с помощью классических технологий



Площадь поверхности детали	482,0 см <sup>2</sup>
Объем детали	129,5 см <sup>3</sup>
Площадь эквивалентная	123,7 см <sup>2</sup>
$K_{ат}$	<b>3,9</b>
Масса	<b>0,57 кг</b>

Рис. 6. Кронштейн, оптимизированный под аддитивное производство



Площадь поверхности детали	424,5 см <sup>2</sup>
Объем детали	58,8 см <sup>3</sup>
Площадь эквивалентная	73,2 см <sup>2</sup>
$K_{ат}$	<b>5,8</b>
Масса	<b>0,26 кг</b>

Рис. 7. Составные части завихрителя, разработанного для производства с помощью классических технологий



Площадь поверхности детали	52,0 см <sup>2</sup>	19,6 см <sup>2</sup>	61,3 см <sup>2</sup>
Объем детали	4,5 см <sup>3</sup>	1,4 см <sup>3</sup>	5,9 см <sup>3</sup>
Площадь эквивалентная	13,2 см <sup>2</sup>	6,1 см <sup>2</sup>	15,0 см <sup>2</sup>
$K_{ат}$	<b>3,9</b>	<b>3,1</b>	<b>3,8</b>

Рис. 8. Консолидированный завихритель



Площадь поверхности детали	116,9 см <sup>2</sup>
Объем детали	11,9 см <sup>3</sup>
Площадь эквивалентная	25,0 см <sup>2</sup>
$K_{ат}$	<b>4,65</b>

более широкого распространения аддитивного производства в промышленности. Существующие методы показывают свою несостоятельность, поскольку являются либо слишком сложными и зависимыми от компетенций пользователя, либо являются слишком простыми, чтобы дать пользователю достаточно адекватное понимание предмета. Основной целью рассматриваемой работы является разработка одного из элементов эффективного автоматизи-

рованного решения, внедряемого на предприятиях АО «ОДК» для анализа и отбора деталей под аддитивное производство. ■

## Литература

1. Шенг Янг, Томас Пейдж, Йинг Чжан, Яоюя Фиона Чжао. Разработка автоматизированной системы поддержки принятия решений при определении деталей-кандидатов, пригодных для производства с помощью аддитивных технологий // Springer Nature. 6 февраля 2020 г. — Springer. 2015.

# Моделирование 3D-печатных образцов из пластика для испытания на растяжение

А.В. Маренкова<sup>1</sup>, Р.А. Молчанов<sup>2</sup>, П.А. Петров<sup>1</sup>, Б.Ю. Сапрыкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский политехнический университет, кафедра «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», omd.at@mospolYTECH.ru

<sup>2</sup>Компания «Филаментарно!», info@filamentarno.ru

В настоящее время нет общепринятых нормативных документов, устанавливающих нормы проведения испытаний на растяжение образцов, изготовленных аддитивным методом; они только разрабатываются, поэтому приходится использовать общие стандарты, имеющие недостатки для испытания таких образцов. Основными российскими стандартами, регламентирующими проведение испытаний на растяжение, являются ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88) «Металлы. Метод испытания на растяжение» и ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы» с определяющим размеры и формы образцов ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753:2008) «Пластмассы. Образцы для испытания».

Область применения ГОСТа 1497-84 устанавливает методы статических испытаний на растяжение черных и цветных металлов и изделий из них. В данном стандарте хорошо проработаны форма и размеры образца; отсутствуют четкие требования к установке образца в зажимах испытательной машины; не учитываются структурные свойства материала и, следовательно, предполагается, что сам по себе образец изотропен. Для исследования анизотропии механических свойств материала образца предполагается вырезка плоских образцов из металлопроката под разными углами к направлению прокатки и последующее проведение испытаний на растяжение полученных изотропных образцов.

ГОСТ 11262-2017 применим для жестких и полужестких термопластичных материалов для литья, экструзии и прессования, включая композиции, наполненные и армированные рублеными волокнами, матами или гранулами, за исключением текстильных волокон, жестких и полужестких терморективных формовочных материалов, включая наполненные и армированные композиции, кроме композиций, армированных текстильными волокнами, а также термотропных жидкокристаллических полимеров. Он не распространяется на жесткие и эластичные ячеистые пластмассы, а также многослойные структуры, содержащие ячеистый материал.

Исходя из того, что структура образцов, напечатанных методом FFF и FDM, близка к многослойной, использование ГОСТ 11262-2017 сомнительно, но необходимо отметить его преимущества по сравнению с ГОСТом 1497-84.

1. Учитывается анизотропия свойств. Как было отмечено выше, в ГОСТе 1497-84 анизотропия свойств учитывается косвенным образом. При вырезке из проката плоских образцов их вырезают под разными углами (0°, 45°, 90°). Далее по результатам их испытаний на растяжение определяют коэффициент анизотропии, относящийся к исходному прокату, из которого изготавливались образцы. Плоские образцы, вырезанные под разными углами, принимаются изотропными.

2. Установлены требования к закреплению образца в испытательной машине: «Образец для испытания растягивают вдоль его главной продольной оси с постоянной скоростью» [1].

3. Установлены требования к зажимам испытательной машины: «Зажимы для закрепления образца должны быть присоединены к испытательной машине так, чтобы продольная ось образца совпадала с направлением растяжения» [1].

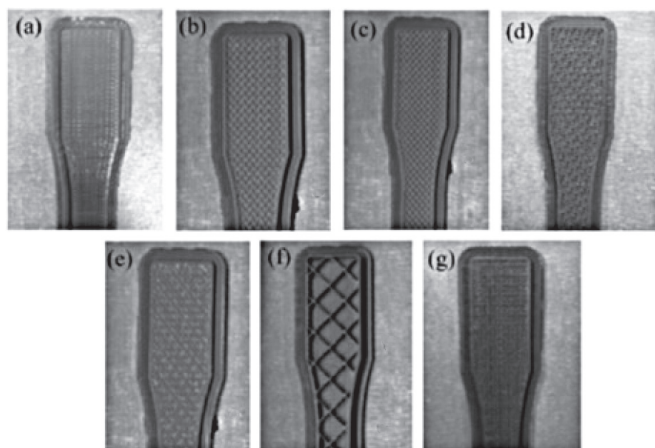
ГОСТ 1497-84 является более универсальным по своей структуре и содержанию; имеется вся необходимая информация как о методике проведения испытаний на растяжение, так и о последующей обработке результатов эксперимента, типах образцов и их размерах, а также выборе масштабного коэффициента для масштабирования образца. ГОСТ 11262-2017 должен использоваться совместно с ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753:2008), т.к. типы образцов и их размеры представлены в ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753:2008).

Образец материала, полученный методом 3D-печати по технологии FDM/FFF, имеет иную структуру, отличную от образцов, полученных с применением методов обработки, описанных в ГОСТ, — набор слоев одного и того же материала, каждый из которых плотно связан друг с другом. Сцепление слоев друг с другом обеспечивается за счет когезии материала образца. Использование вышеперечисленных ГОСТов

возможно только при принятии допущения об изотропности материала в пределах одного слоя образца, изготовленного по технологии FDM/FFF.

В работе [2] были проведены испытания с разными значениями параметра 3D-печати «стиль заполнения» (linear, hexagonal, moroccosanstar, catfill, sharkfill, diamond, Hilbert) (рис. 1), а также «плотность заполнения» (25%, 30%, 40%, 50%, 70%, 90%, 100%) и «скорость печати» (70 мм/с, 80 мм/с, 90 мм/с, 100 мм/с, 110 мм/с).

Рис. 1. Образцы с разным стилем заполнения: (a) Linear, (b) Hexagonal, (c) Moroccanstar, (d) Catfill, (e) Sharkfill, (f) Diamond и (g) Hilbert [2]



При изменении стиля заполнения [2] при фиксированном значении плотности заполнения достигается не только максимальное (при стиле заполнения Hilbert) или минимальное (при стиле заполнения hexagonal) значение массы образца, но и максимальное значение модуля упругости при растяжении (наблюдалось для стиля заполнения linear) [2]. Результаты, представленные в работе [2], являются характерными для изучения поведения образца материала, изготовленного по технологии FFF/FDM. Следует также обратить внимание и на то, что не во всех случаях результаты растяжения 3D-печатных образцов можно относить к исследованию механических свойств материала образца. В частности, изменение стиля заполнения либо плотности заполнения оказывает влияние не на механические свойства материала образца, а на прочность его конструкции. Таким образом, при изменении указанных параметров изучается влияние геометрии образца на его прочность в условиях заданных эксплуатационных нагрузок. Действие вышеупомянутых ГОСТов распространяется на определение механических свойств материала образца. Далее на примерах будет проиллюстрировано, как работает материал 3D-печатных образцов при растяжении.

В другой работе [3] проведено исследование влияния параметров процесса 3D-печати на разрушение и деформационное поведение образцов, изготовленных

по технологии FDM, при их растяжении. Для виртуальных испытаний применен метод конечных элементов в сочетании с инверсионным методом (методом постановки обратной задачи). На основе натуральных экспериментов и применения при виртуальном эксперименте модели Гурсона, описывающей разрушение пористого материала, произведена оценка влияния параметров процесса на разрушение образца.

Подробное исследование особенностей растяжения плоских многофункциональных образцов (рис. 2) по стандарту ISO 527-2:2012 (русский аналог стандарта ГОСТ 11262-2017), напечатанных по технологии FFF/FDM из пластика ПЛА для семи различных углов расположения при 3D-печати (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) и трех значений толщины слоя (0,1 мм, 0,2 мм, 0,3 мм), представлено в работе [4]. В данной работе огромное практическое значение представляет теоретическое обоснование выбора положения образца при 3D-печати, обеспечивающее исследование механических свойств его материала при проведении испытания на растяжение. Поэтому результаты работы [4] имеют большое влияние на постановку задачи в рамках данной статьи.

Авторами работы [6] выполнено подробное исследование особенностей растяжения плоских образцов по стандарту ASTM D638-14 и ASTM D3039/3039M-14 [5], напечатанных по технологии FFF/FDM из полимерного материала, армированного углеродным волокном. При проведении испытаний на растяжение рассмотрено поведение образцов двух типов: плоский образец с утолщениями на концах для зажима в захватах испытательной машины (по стандарту ASTM D638-14; dumbbell shape specimen) и прямоугольный двухсторонний образец (по стандарту ASTM D3039/3039M-14; rectangular specimens with paper end tabs). Прямоугольный двухсторонний образец представлен на рис. 3; его особенность в том, что в пределах рабочей длины образец имеет прямоугольное сечение.

В работе [6] высказано сомнение в эффективности плоского образца с утолщениями (по стандарту ASTM D638-14; dumbbell shape specimen), напеча-

Рис. 2. Расположение образца при 3D-печати [4]

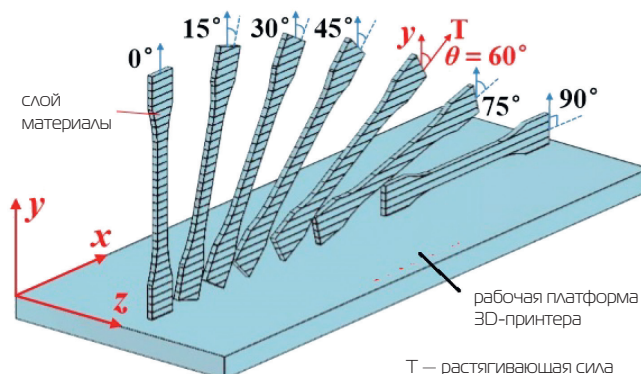
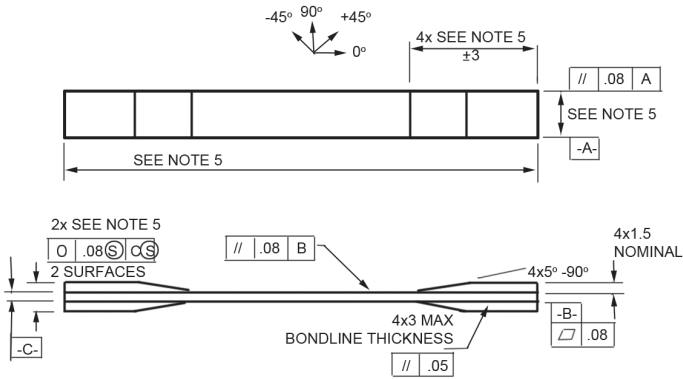


Рис. 3. Прямоугольный плоский образец по стандарту ASTM D3039/D3039M-14 [5]



танного на 3D-принтере по технологии FFF/FDM, в части надежности утолщений, времени и стоимости изготовления образца. Более надежным в работе [6] рассматривается прямоугольный двухсторонний образец, внешний вид которого представлен на рис. 3.

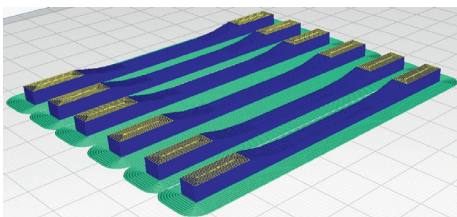
И наконец, интересные результаты представлены авторами работы [7]. Они связаны с выбором типа заполнения сечения образца – concentric и isotropic – при формировании образца из композиционного многослойного материала методом 3D-печати по технологии FFF. Так, выявлено, что при стиле concentric увеличение в сечении образца количества нитей, эквидистантно расположенных друг к другу, приводит к увеличению усталостной прочности; при выборе стиля isotropic наблюдается обратная картина.

В зависимости от ориентации изготавливаемого образца во время 3D-печати при испытании на растяжение оцениваются механические свойства либо непо-

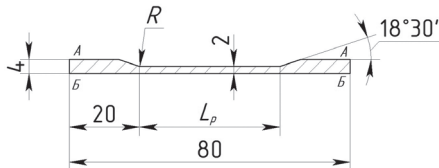
а) внутренняя структура образца для испытания (стиль concentric)



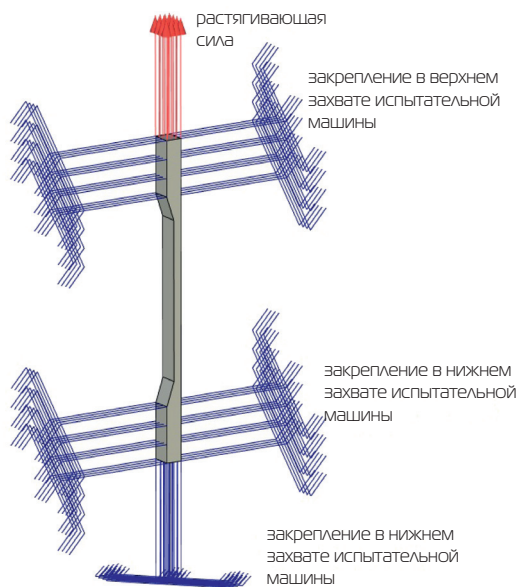
б) образец, изготовленный по технологии FFF



в) эскиз образца с прямоугольным сечением 4x5 мм



г) расчетная схема в программе T-Flex Анализ



д) установка образца в захватах испытательной машины

средственно самого материала образца, либо свойства конструкции образца и, соответственно, соединения по границе двух слоев. В связи с этим для постановки испытания по методу растяжения важным вопросом является выбор формы образца пластика, полученного методом 3D-печати по технологии FDM/FFF, угол его расположения относительно рабочей платформы (рис. 2), а также расположение образца в захватах испытательной машины.

Основываясь на вышепредставленных результатах, можно сформулировать цель данной работы: изучение возможности применения CAE-моделирования для выбора геометрических размеров 3D-печатного образца (формы образца) для проведения испытания на растяжение. Далее будем рассматривать только образцы, изготовленные по технологии FFF, для оценки механических свойств материала образца, т.е. образцы, расположенные при 3D-печати под углом 90° (рис. 2) либо в плоскости рабочей платформы и имеющие 100% заполнение стилем concentric.

При этом будем рассматривать образец, подобный образцу, представленному на рис. 3. В отличие от образца-аналога, исследуемый образец имеет прямоугольную форму с односторонне расположенными утолщениями и при проведении испытания на растяжение зажимается по плоскости А и Б (рис. 4).

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: 1) проведение испытания на растяжение в программе «T-Flex Анализ» (модуль «Экспресс-анализ») с применением разных схем закрепления образца в захватах виртуальной испытательной машины; 2) выполнение сравнительного анализа

Рис. 4. Прямоугольный односторонний образец для испытаний на растяжение

результатов виртуального эксперимента и формирование рекомендаций по постановке натурального испытания. Программа «Т-Flex Анализ» [8] основана на методе конечных элементов (МКЭ).

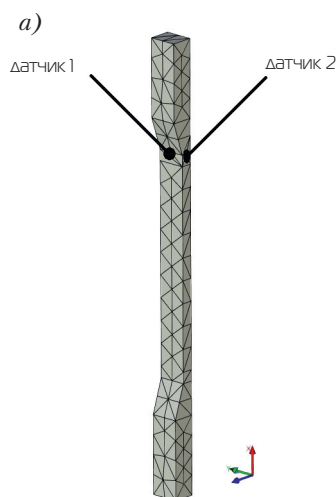
Таблица 1. Свойства ПЛА-пластика

Параметр	Значение
Относительное удлинение при разрыве	3,8 %
Предел текучести	62,0 МПа
Прочность на разрыв	57,8 МПа

Постановка виртуального испытания на растяжение выполняется в предположении, что напряженное состояние на рабочей длине  $L_p$  (рис. 4а) образца сохраняется линейным при нагружении осевой (растягивающей) силой. Величина силы принята во всех расчетах равной 10 кН (1 тс). Также на рис. 4 показаны размеры базового образца. Принимаем, что образец (рис. 4) изготавливается методом 3D-печати по технологии FDM/FFF: плотность заполнения внутреннего сечения образца — 100%; диаметр выходного отверстия сопла — 0,4 мм; стиль заполнения внутреннего сечения образца при 3D-печати — concentric; образец изготавливается на 3D-принтере Wanhao Duplicator i3 mini или Anycubic i3 Mega S; материал образца — пластик PLA. Основные механические свойства ПЛА-пластика представлены в таблице 1 [9]; далее будет показано сравнение механических свойств, определяемых по результатам испытаний на растяжение с применением образцов различной формы.

План проведения виртуального эксперимента включает в себя выполнение расчетов при следующих исходных параметрах образца для испытания:

- схема 1: осесимметричное расположение образца в захватах испытательной машины (идеальная схема установки образца, в которой отсутствуют отклонения образца от его продольной оси в плоскости YX и ZX декартовой системы координат XYZ); радиус  $R$  (см. рис. 6в) скругления галтели образца принимается равным 0 мм;
- схема 2: осесимметричное расположение образца в захватах испытательной машины; радиус  $R$  скругления галтели образца принимает значения в диапазоне от 0 мм до 45 мм;
- схема 3: несимметричное расположение образца в захватах испытательной машины — схема установки образца, в которой образец имеет отклонение от его



продольной оси в плоскости YX декартовой системы координат XYZ.

### Виртуальный эксперимент

На основе схемы 1 — идеальной схемы нагружения, где отсутствуют скругления и отклонения при растяжении, была определена чувствительность конечно-элементной модели к изменению размера исходной конечно-элементной сетки и ее влияние на результаты расчетов — значение коэффициента запаса прочности (КЗП) и относительную (эквивалентную) деформацию. Полагаем, что если дальнейшее уменьшение размера конечного элемента (КЭ) не приводит к изменению результатов при прочих равных исходных данных расчета, то этот размер КЭ принимается за минимально допустимый и используется во всех последующих расчетах для данного объекта моделирования.

Начиная с количества КЭ в сетке, равного 347, результаты расчета, например, модуль перемещения (рис. 5), практически не изменяются. В программе «Т-FLEX Анализ» указанное количество КЭ соответствует настройке плотности сетки — «точнее».

В расчетной модели введены условные элементы — датчики (рис. 5а); датчики установлены в КЭ модели для измерения значения параметра «модуль перемещения». Результаты расчетов, представленные на рис. 5б, наглядно иллюстрируют вышеописанную гипотезу о чувствительности КЭ модели к плотности сетки.

В таблице 2 представлены значения радиуса  $R$  и угла наклона образца  $\alpha$ , для которых выполнены расчеты при анализе схемы 2 и 3. На рис. 6 представлены

Рис. 5. Оценка чувствительности расчетной модели к изменению плотности конечно-элементной сетки  
б) изменение модуля перемещения

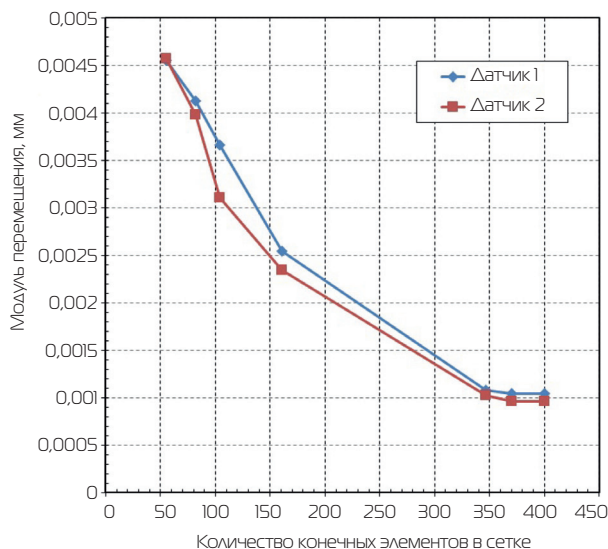
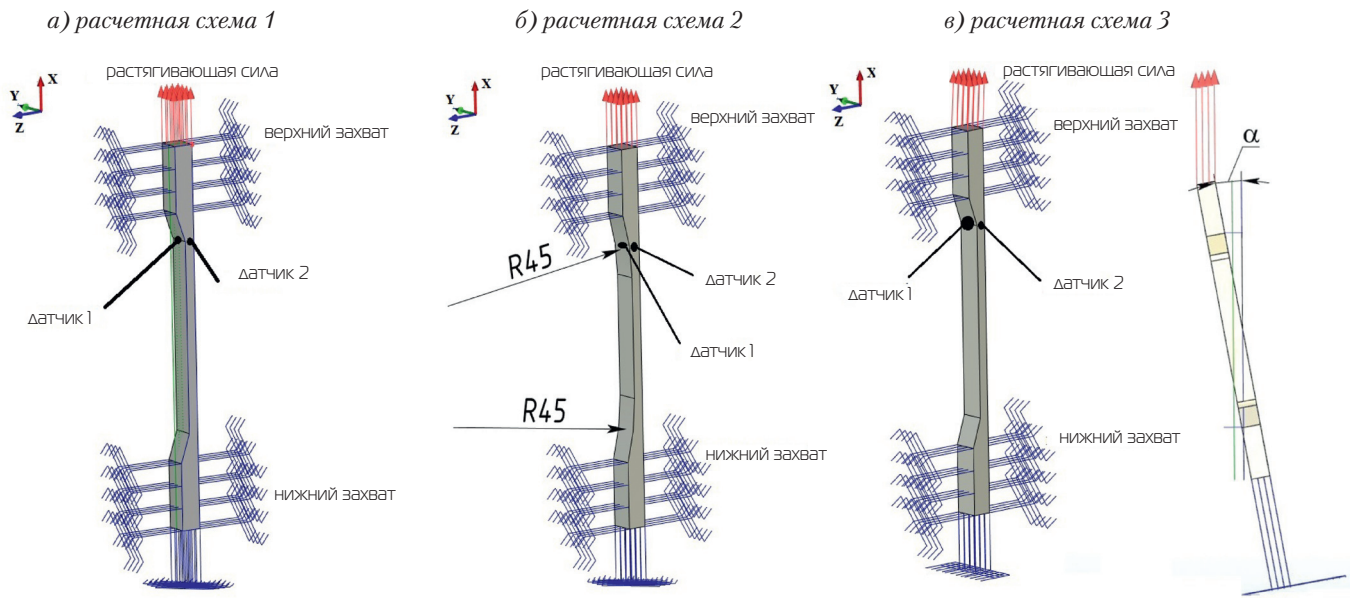


Рис. 6. Расчетные схемы виртуального эксперимента



расчетные модели для каждой из трех вышеописанных расчетных схем.

На виртуальных образцах (рис. 5 и рис. 6) было установлено два датчика в месте перехода от рабочей части длиной  $L_p$  к утолщению. Датчики расположены на двух взаимно перпендикулярных плоскостях образца.

#### Результаты виртуального эксперимента

По результатам расчетов получены следующие данные для рассматриваемых схем закрепления образца (рис. 6):

- 1) зависимость «Коэффициент запаса – радиус  $R$  скругления галтели образца» (для схемы 1 и 2, рис. 7);
- 2) зависимость «Относительная деформация – радиус  $R$  скругления галтели образца» (для схемы 1 и 2, рис. 7);
- 3) зависимость «Коэффициент запаса – угол  $\alpha$  наклона образца» (для схемы 3, рис. 8);
- 4) зависимость «Относительная деформация – угол  $\alpha$  наклона образца» (для схемы 3, рис. 8).

Схема 1 и схема 2 предполагают, что образец устанавливается в захватах испытательной машины строго вдоль вертикальной оси; отклонения от оси не

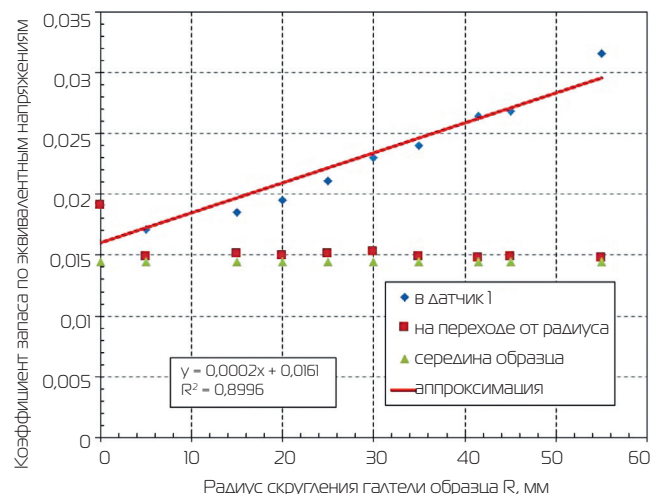
Таблица 2. Параметры, варьируемые при выполнении расчетов

Параметр	Значение
<b>схема 2</b> (угол наклона образца $\alpha = 0^\circ$ )	
радиус $R$ скругления галтели образца, мм	5; 15; 20; 25; 30; 35; 41,1; 45
<b>схема 3</b> (радиус $R$ скругления галтели образца 0 мм)	
угол наклона образца $\alpha$ , °	30'; 1°; 2°; 2°20'; 2°30'; 2°40'; 2°50'; 3°; 3°20'; 4°; 3°40'; 4°; 4°20'; 4°40'; 5°; 5°20'; 5°40'; 6°30'; 7°; 7°30'; 9°; 11°

допускаются. При таком положении предполагается, что разрушение материала при растяжении будет возникать в центральной части образца, ограниченной размером  $L_p$  (рис. 4в). Данное предположение основано на результатах виртуальных испытаний (рис. 7, маркеры, соответствующие середине образца для различных значений радиуса  $R$ ) – минимальном коэффициенте запаса прочности в пределах рабочей длины. Радиус  $R$  является управляющим параметром, позволяющим локализовать разрушение образца в пределах длины  $L_p$  при фиксированной длине образца и утолщения для захвата. Увеличение  $R$  приводит к уменьшению рабочей длины и в то же время увеличению коэффициента запаса прочности (рис. 7).

Схема 3 предполагает, что образец (рис. 4в) устанавливается в зажимах испытательной машины под углом  $\alpha$  (рис. 6в) к вертикальной оси образца. При

Рис. 7. Результат расчета схемы 1 и 2: зависимость коэффициента запаса от радиуса  $R$



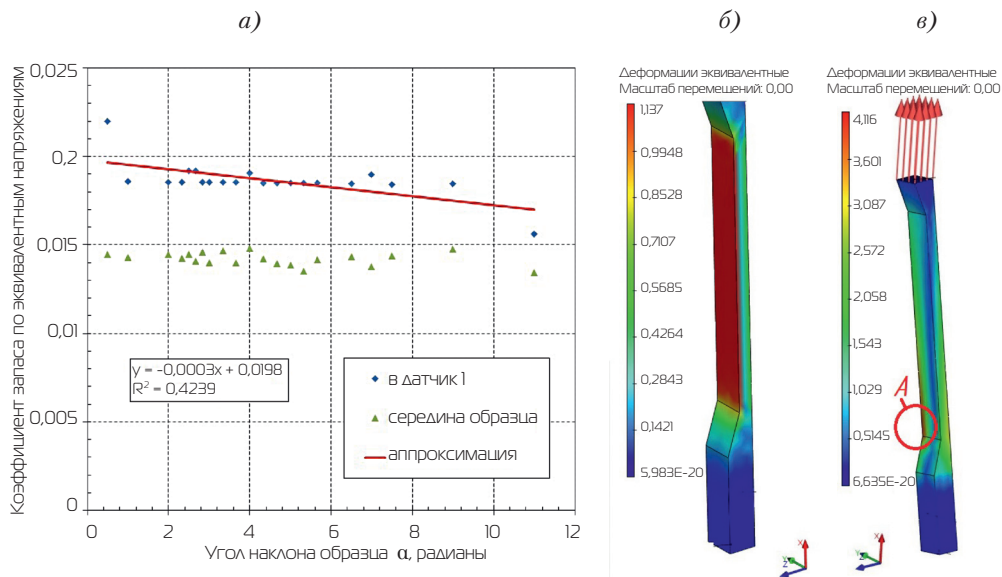
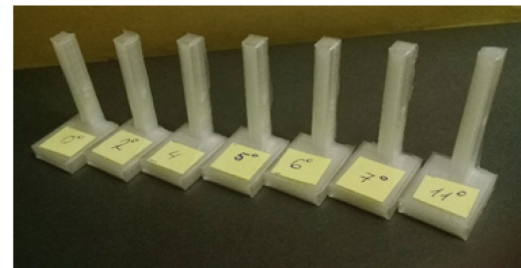


Рис. 8. Результат схемы 3:  
 а) зависимость коэффициента запаса от радиуса  $R$ ;  
 б) распределение коэффициента запаса при угле  $\alpha = 0^\circ$ ;  
 в) распределение коэффициента запаса при угле  $\alpha = 11^\circ$ ;  
 г) шаблоны для установки образца



проведении натурального испытания для точного выбора положения образца в зажимах испытательной машины использовали специально спроектированные шаблоны (рис. 8б), обеспечивающие установку образца под заданным углом  $\alpha$  (рис. 8в).

Анализ результатов виртуального эксперимента показывает, что отклонение исходного образца от его вертикальной оси приводит к снижению коэффициента запаса из-за смены вида напряженного состояния — линейное напряженное состояние, как выше отмечалось, желательное при проведении испытаний на растяжение, меняется на объемное напряженное состояние. При этом область предполагаемого разрушения смещается к месту расположения на образце радиуса  $R$  (рис. 4в) — область «А» (рис. 8в).

#### Сравнение результатов моделирования с результатами натурального эксперимента

В завершение проведем сравнение результатов натуральных испытаний на растяжение образцов разной формы из пластика ПЛА, напечатанных на 3D-принтере при 100% заполнении стилем concentric. Типы образцов представлены на рис. 9.

Образец плоский имеет непропорционально уменьшенные размеры в сравнении с рекомендациями

ГОСТ 33693-2015 для многоцелевого образца тип А. Размеры непропорционально уменьшенного образца выбирались с учетом хорошо формализованных рекомендаций к размерам образца, представленным в ГОСТ 1497-87. При 3D-печати плоский образец и образец A12 располагали под углом  $0^\circ$  и  $90^\circ$  к плоскости рабочей платформы 3D-принтера (рис. 9в). Размеры всех применяемых в данной работе образцов представлены в таблице 3.

Размеры образца с прямоугольным сечением были представлены ранее (рис. 4). Натурные эксперименты проводились на универсальной испытательной установке Tinius Olsen 50ST двухколонного типа с максимальной нагрузкой 50 кН (5000 кгс).

В таблице 4 представлены данные о пределе прочности на разрыв для всех типов образцов.

Образец с прямоугольным сечением показывает механические свойства, сопоставимые со свойствами, определенными по стандартному образцу A12. Стоит отметить, что вне зависимости от расположения на рабочей платформе 3D-принтера образец A12 показывает практически одинаковые свойства как при угле расположения  $0^\circ$ , так и при угле  $90^\circ$ .

Преимущество образца с прямоугольным сечением перед образцом A12 либо плоским образцом заключа-

Рис. 9. Образцы для натуральных экспериментов: а) образец плоский по ГОСТ 1497-87; б) образец A12 по ГОСТ 33693-2015; в) образцы, изготовленные 3D-печатью

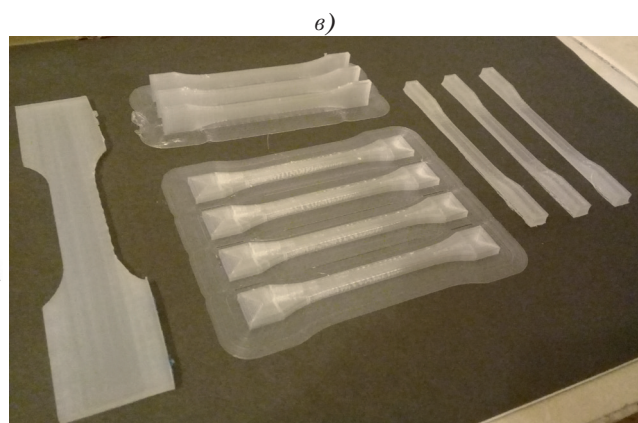
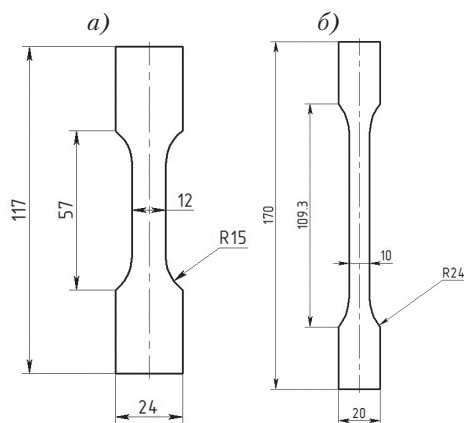


Таблица 3. Размеры образцов (рис. 9)

Размер, мм	Образец 1	Образец тип A12
Общая длина $L$ , мм	117,0	75,0
Расстояние между широкими частями с параллельными сторонами $L_p$ , мм	57,0	58,0
Ширина головки $b_p$ , мм	24,0	10,0
Ширина узкой (рабочей) части $b_r$ , мм	12,0	5,0
Толщина $h$ , мм	2,4	2,4
Радиус закругления $r$ , мм	15,0	30,0

ется в том, что нет необходимости ориентировать его при 3D-печати под различным углом на рабочей платформе 3D-принтера; геометрическая форма образца не предполагает его различное расположение при изготовлении. Образец с прямоугольным сечением разрушается в пределах рабочей длины  $L_p$ . Наличие нежелательного наклона образца под углом  $\alpha$  (рис. 6в, схема 3) относительно его вертикальной оси приводит к смещению области разрушения к радиусу  $R$  закругления образца (рис. 6в), что соответствует результатам виртуального эксперимента.

#### Выводы и рекомендации

Выполненный анализ литературы, проведенные виртуальные и натурные эксперименты позволяют сделать выводы и сформулировать рекомендации по выбору размеров для испытаний на растяжение образцов, изготовленных методом 3D-печати в том числе.

1. КЭ-модель для постановки виртуального эксперимента чувствительна к количеству конечных элементов, включенных в КЭ-сетку. Наши виртуальные эксперименты показали, что устойчивое решение в части определения коэффициента запаса получается при количестве конечных элементов 347.

2. Образец с прямоугольным сечением имеет радиус закругления  $R$  (рис. 4в), являющийся управляющим параметром, позволяющим локализовывать разрушение образца в пределах длины  $L_p$  при фиксированной длине образца и утолщения для захвата. Увеличение  $R$  приводит к уменьшению рабочей длины и в то же время увеличению коэффициента запаса прочности (рис. 9а). По полученным результатам виртуальных экспериментов рекомендуемое максимальное значение радиуса  $R$  равно 55 мм.

3. В случае установки образца с прямоугольным сечением в захваты испытательной машины с перекосом, т.е. под углом  $\alpha$  (рис. 8г), в результате проведения натурального испытания будет наблюдаться смещение области разрушения к радиусу  $R$  закругления.

4. Геометрическая форма образца с прямоугольным сечением не предполагает его различное расположение при 3D-печати; в случае применения образца A12 для оценки механических свойств требуется изготовление, как минимум, двух типов образцов – образцы расположенные при 3D-печати под углом  $0^\circ$  и под углом  $90^\circ$  к рабочей платформе 3D-принтера.

5. 3D-печать образцов с прямоугольным сечением, как, впрочем, и других типов образцов, для испытания на растяжение должна обеспечивать 100% заполнение с применением стиля concentric. ■

#### Литература

- ГОСТ 11262–2017 (ISO 527–2:2012) «Пластмассы».
- Chamil Abeykoon, Pimpisit Sri-Amphorn, Anura Fernando. Optimization of fused de-position modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, In press, corrected proof Available online 30 March 2020.
- Tomas Webbe Kerekes, Hyoungjun Lim, Woong Yeol Joe, Gun Jin Yun Characterization of process–deformation/damage property relationship of fused deposition modeling (FDM) 3D-printed specimens. Additive Manufacturing, Volume 25, January 2019, pp. 532–544.
- Tianyun Yao, Juan Ye, Zichen Deng, Kai Zhang, Yongbin Ma, Huajiang Ouyang, Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. Composites Part B: Engineering Volume 188, 1 May 2020, 107894.
- ASTM D3039 / D3039M-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.
- Lincy Pyl, Kalliopi-Artemi Kalteremidou, Danny Van Hemelrijck. Exploration of specimen geometry and tab configuration for tensile testing exploiting the potential of 3D printing freeform shape continuous carbon fibre-reinforced nylon matrix composites. Polymer Testing, Volume 71, October 2018, pp. 318–328.
- Astrit Imeri, Ismail Fidan, Michael Allen, Garrett Perry. Effect of Fiber Orientation in Fatigue Properties of FRAM Components. Procedia Manufacturing, Volume 26, 2018, pp. 892–899.
- Свидетельство № 2011618726 о государственной регистрации программы для ЭВМ. «Т-Flex Анализ» — система конечно-элементного анализа изделий. Правообладатель: ЗАО «Топ Системы».
- <https://ru.wikipedia.org/wiki/Полилактид>.

Таблица 4. Механические свойства по результатам натуральных экспериментов

Размер, мм	Образец плоский $0^\circ$	Образец плоский $90^\circ$	Образец A12 $0^\circ$	Образец A12 $90^\circ$	Образец с прямоугольным сечением (см. рис. 6)
Прочность на разрыв, МПа	<b>29,2</b>	60,6	59,6	58,9	65,3
Удлинение при разрыве образца, %	<b>1,12</b>	3,77	1,69	1,48	1,07



# Применение АМ в биотехнологии: перспективы и ограничения (часть 3)

Николай Михайлович Максимов



В продолжение опубликованных в журнале «Аддитивные технологии» № 2 2020 и № 3 2020 первых частей данной статьи остановимся на дополнительных возможностях биопечати для медицины и создания продуктов питания, путях развития новых синтетических материалов, определяющих новые применения, а также на многочисленных аспектах внедрения биопроизводства, кардинально меняющего привычные устои жизнедеятельности человека.

## Биопечать костей

Костная ткань состоит из двух различных структур — пористой внутренней и прочной наружной, которые находятся в процессе изменений и роста и могут поддерживать циклы ремоделирования и регенерации за счет взаимодействия между остеобластами,

остеоцитами и клетками остеокластов. Однако возможности самовосстановления и восстановления при крупномасштабных костных дефектах ограничены. Наиболее перспективной процедурой лечения таких дефектов является 3D-печать каркасов благодаря ее способности изготавливать индивидуальные каркасы с заданной геометрией, контролируемые химическими и механическими характеристиками.

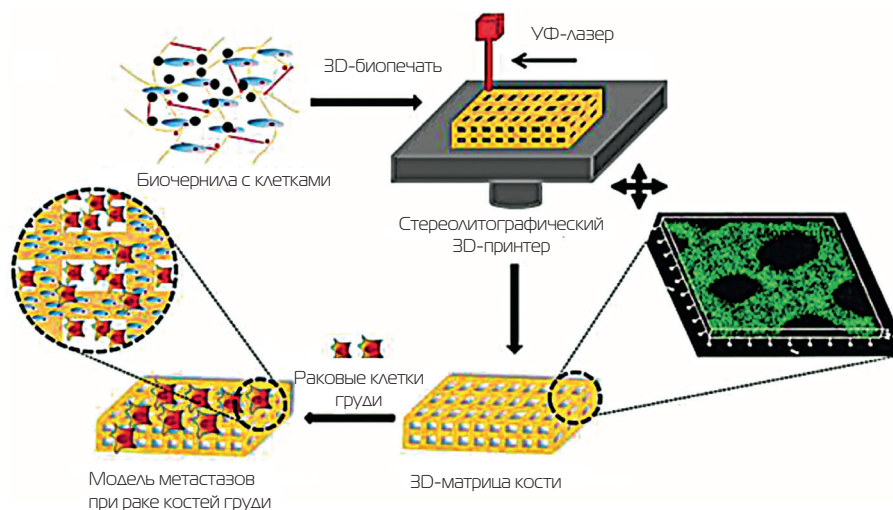
Для выращивания костных тканей используют прочные синтетические полимеры типа Polycaprolactone (PCL) и природные минералы, такие как гидроксиапатит (НАр) [1, 2, 3]. Они показывают хорошую биосовместимость, высокие механические свойства,

регулируемую биодеградацию и легко адаптируются к 3D-печати. В частности, гидроксиапатит (НАр) успешно используется при печати протезов суставов и зубных имплантатов в силу их высокой биоактивности, что обеспечивает успешную остеоинтеграцию. Чернила из керамики для печати можно условно разделить на три группы:

- на основе фосфатов кальция,
- на основе силикатов кальция,
- на основе биоактивного стекла (например, боросиликатное стекло).

Каркасы из биоактивной керамики могут стимулировать дифференциацию и развитие стромальных клеток костного мозга, что улучшает процесс выращива-

Рис. 1. Схема для изучения взаимодействия раковых клеток груди с костными стромальными клетками



ния новой костной ткани. В ряде работ показано позитивное влияние легирующих добавок металлов в керамические чернила, таких как Zn, Sr, Mn, Mg [4].

Биочернила на основе синтетических полимеров используются для выращивания каркасов для регенерации костных тканей за счет их заполнения клетками фибробластов костной ткани. В сочетании с металлическими порошками композитные полимерные чернила позволяют выращивать недеградирующие каркасы и имплантаты для конкретного пациента. Достоинства композитных чернил в том, что они адаптированы для печати каркасов на биопринтерах, придают каркасам более высокие механические и биотехнологические характеристики. Примером такого рода чернил служит композитный материал, состоящий из 60% НАр и 40% в-ТСП (НАр-ТСП: Hydroxyapatite and tricalcium phosphate) с антибактериальным покрытием из пероксида кальция [5].

В работе [6] авторы показали пример изучения раковых заболеваний кости на матрице костной ткани (рис. 1).

#### Лечение повреждений суставов

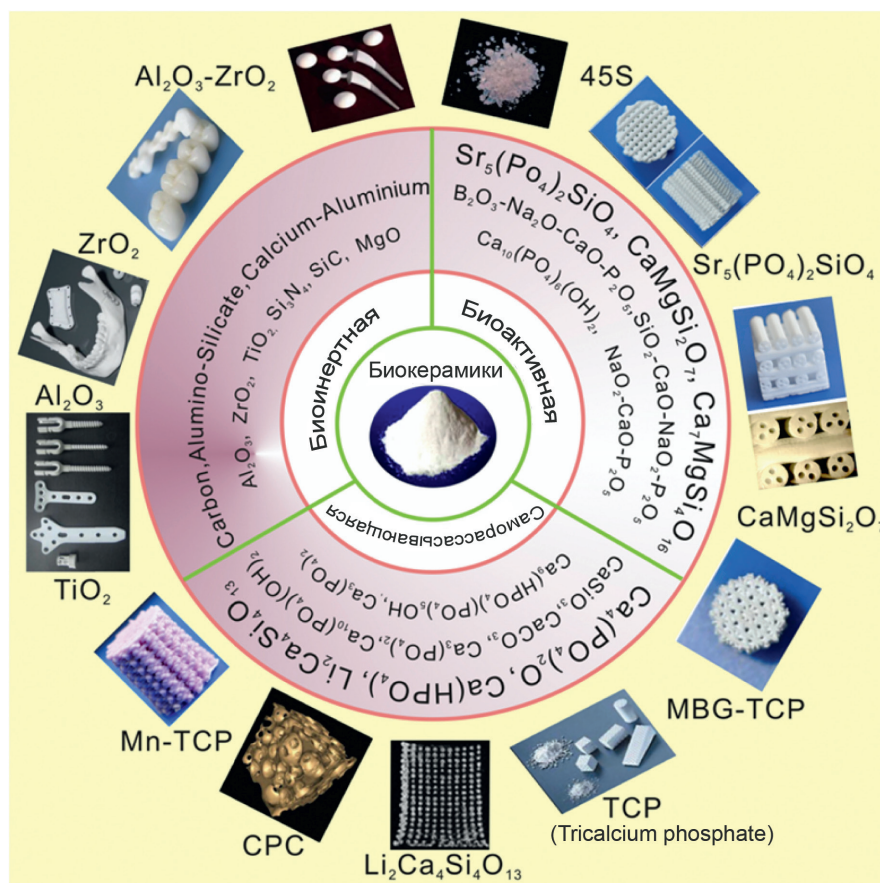
Повреждения суставов, вызванные травмами и спортом, всегда перерастают в остеоартроз (ОА); таким образом, ОА является основной причиной остеохондрального дефекта [7]. К 2030 году около 67 миллионов американцев будут страдать от ОА. В естественных структурах остеохондральной ткани суставной хрящ хорошо интегрирован с субхондральной костью, и дефекты хряща всегда глубоко проникают в субхондральную кость и в дальнейшем развиваются в остеохондральные дефекты. Ранее регенерация остеохондральных дефектов была в основном сосредоточена на хря-

щевом слое. В настоящее время для лечения остеохондрального дефекта доступны хирургические вмешательства, такие как микро-разрушение, аутоотрансплантация и замена сустава. Хотя эти методы лечения могут уменьшить боль и улучшить качество жизни пациентов, не существует хирургической терапии, которая могла бы способствовать полному заживлению остеохондральных дефектов, особенно для полной регенерации хряща. Для решения этой проблемы было предложено несколько материалов для выращивания биоактивных каркасов для регенерации как хряща, так и субхондральной кости.

Большинство материалов, предназначенных для регенерации хрящевого слоя, представляют собой органические вещества, включая полимеры и материалы на основе ЕСМ. Полимеры, используемые в хрящевом слое,

можно разделить на природные полимеры (желатин, хитозан, гиалуроновая кислота, коллаген, альгинат, гликозаминогликан, крахмал и бактериальные полимеры) и синтетические полимеры (Поли-(D, L-молочно-гликолевая кислота), поликапролактон, полиэтиленгликоль и полигликолевая кислота). Природные полимеры обладают низкой жесткостью и слабой биомеханикой, синтетические полимеры имеют контролируемую кинетику разложения и регулируемые механические свойства. С учетом требований механики к субхондральной кости обычно применяются материалы с достаточной прочностью на сжатие, такие как металлические материалы (титан и его сплавы, сплав кобальт-хром и нержавеющая сталь), биостекло и биокерамика, показывающие в т.ч. высокую интеграцию с костной тканью. Это может быть биоинертная керами-

Рис. 2. Биокерамика для печати



ка, такая как фарфор и диоксид циркония; биоактивная керамика, которая обладает разумной вязкостью разрушения и химической коррозионной стойкостью или износостойкостью после имплантации, и биodeградируемая керамика [8], которая содержит фосфаты кальция, карбонаты кальция, силикаты кальция (рис. 2). Кроме того, натуральные и синтетические полимеры, имеющие подходящую несущую способность, могут сочетаться с металлическими материалами и биокерамикой или использоваться отдельно для разработки субхондральной костной ткани.

3D-печать может использоваться для подготовки каркасов с однородными порами для регенерации хрящей и субхондральных костей. Напечатанные каркасы могут иметь любую форму и обеспечивают взаимосвязанную макро- и микропористость, а также гетерогенность и анизотропию, чтобы удовлетворить требованиям механических параметров для инженерии остеохондральной ткани. Идеальные биоактивные каркасы, подготовленные для облегчения и усиления регенерации остеохондры, должны обладать способностью воспроизводить естественную архитектуру и физиологические свойства суставного хряща и тканей субхондральной кости. Чтобы имитировать иерархические структуры остеохондральной ткани, были изготовлены двухфазные и многослойные каркасы. Однако биологически имитировать первоначальные структуры остеохондральной ткани трудно, и применение двухфазных и многослойных каркасов в клиниках ограничено неоднородными механическими реакциями и низкой адгезионной прочностью между двумя соседними слоями.

В настоящее время большинство материалов, используемых в хрящевом слое, представ-

Рис. 3. Биопротезы конечностей компании Ottobock ([www.ottobock.com/en/](http://www.ottobock.com/en/)): руки, управляемой командами головного мозга, которые считываются датчиками на руке с протезом и приводят в движение соответствующие приводы кисти и пальцев (а), ноги с управлением опциями (б)



ляют собой полимеры и ЕСМ, а материалы, применяемые в субхондральном слое кости, представляют собой металлические материалы, биокерамику и биостекла.

Основной проблемой является разработка биоактивных каркасов или передовых стратегий, которые могли бы полностью копировать природную архитектуру и функцию остеохондральной ткани и создать интерфейс, который структурно и физиологически имитирует хрящ и субхондральную кость.

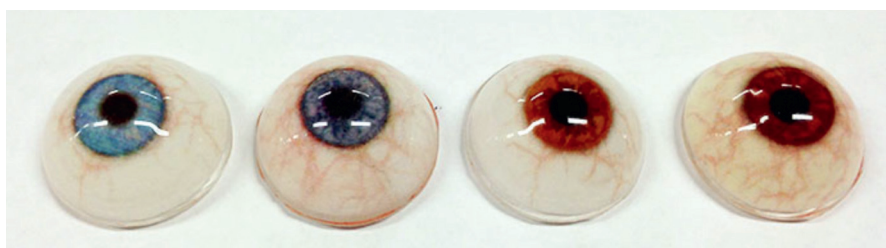
### Протезы

Протез — это прибор, созданный для замены отсутствующей части тела или для улучшения

функциональности других частей тела. Наиболее известны протезы рук, кистей рук, ног (рис. 3), суставов, глаз, а также зубов и отдельных частей челюстей. Использование 3D-печати для создания протезов предпочтительно по сравнению с традиционными технологиями из-за того, что протез любой сложности конструируется под конкретного пациента, он легкий и его стоимость невысока. Например, протезы ног с использованием АМ успешно изготавливаются несколькими компаниями: BionX Medical Technologies, Inc. (Массачусетс, США); Echo-Prosthetic Leg (Калифорния, США); Andiamo (Лондон, Великобритания).

Протез глаза с 3D-печатью (рис. 4) разрабатывается компа-

Рис. 4. Напечатанный протез глаза



нией Fripp Design and Research (Лондон, Великобритания). Выгоды очевидны: существенное сокращение времени изготовления (с 4–8 ч на один протез глаза до 150 глазных протезов в час), снижение стоимости на 97% (от 3000 до 100 фунтов стерлингов).

3D-протезы лица также являются еще одним приложением, где пациенту устанавливают отпечатанные части взамен утраченных в результате травмы или заболевания.

Еще одно успешное применение — для лечения гипертрофических рубцов на лице после глубоких ожогов использовалась прозрачная маска для лица, изготовленная с использованием 3D-принтера OBJET MED610 (Stratasys, USA) и облицованная двумя слоями прозрачного медицинского силиконового геля для выравнивания давления на лицо со стороны маски [9]. Маску необходимо было носить не менее 20 часов в сутки, при этом позитивные результаты проявились уже через месяц, и через полгода стало очевидно, что 3D-печатная маска для лица является эффективным методом лечения с уменьшением средней толщины рубца после ожогов и уменьшением количества клинических процедур, что облегчает лечение и сокращает время, затрачиваемое на эти процессы [10].

По оценкам экспертов, количество людей с утраченными конечностями к 2050 г. увеличится с 1,6 млн человек до 3,6 млн только в США. Поэтому спрос на протезы, как и на обучение пациентов, как ими пользоваться, только возрастает. Особенно это важно для детей в период их роста и проявления интереса к использованию различных инструментов, занятий спортом и т.д. Спроектированные и отпечатанные протезы должны быть доступны, изготавливаться для конкретного пациента, легко ремонтироваться и обслуживать-

ся и настраиваться под разные виды деятельности.

Пока прямое взаимодействие протеза с головным мозгом невозможно, но исследования в этом направлении активно продолжают (см. проект И. Маска Neuralink, [www.neuralink.com](http://www.neuralink.com)). Появление технологии 3D-биопечати открывает новые возможности в создании клеточных протезов, включенных в единую коммуникационную систему: мозг — компьютер — протез.

Другая сложность имплантации тканей и органов для детей связана с ростом организма, соответственно, и имплантат должен расти и развиваться. В противном случае будет необходимо периодически заменять его, что достаточно сложно и несет с собой дополнительные риски. И здесь решение может быть найдено в области 4D-печати: напечатанные объекты в 3D со временем могут менять свою форму под действием различных факторов (температуры, pH среды и т.п.). Такие материалы для печати уже созданы [11], например, в компании Antleron (Бельгия), в которую компания 3D Systems (США) инвестировала свои 3D-технологии: 3D-принтеры, специальные про-

граммы для печати биоматериалами 3D Sprint и 3DXpert, а также более 20 биосовместимых материалов, в основном на основе коллагена с клетками.

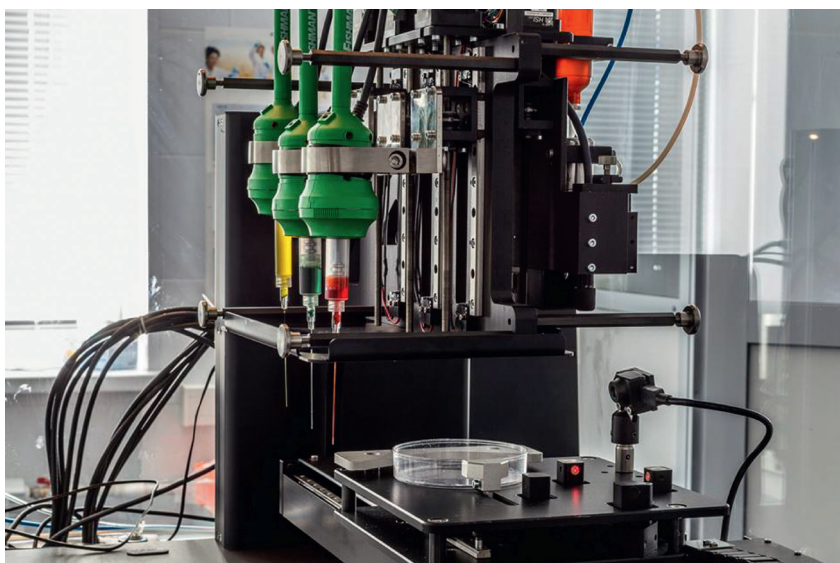
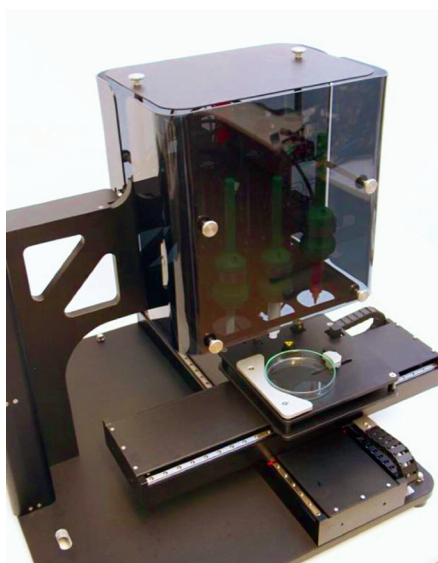
Пока 4D-технологии находятся на ранней стадии в исследовательских центрах, но уже понятно, что они смогут обеспечить хирургов и медиков новыми инструментами от создания кожи для замены до объектов, изменяющихся под воздействием окружения. По оценкам, рынок 4D-печати для охраны здоровья вырастет со скромных \$9 млн в 2021 до \$32 млн в 2026 году. Материалы с изменяющейся формой могут применяться при создании миниатюрных имплантируемых медицинских приборов.

#### Биопечать в России

3D Bioprinting Solutions — лаборатория биотехнологических исследований, основанная крупнейшей частной медицинской компанией в России INVITRO. Деятельность лаборатории — разработка и производство биопринтеров и материалов в области трехмерной биопечати, разработка новых технологий в биопроизводстве и лекарственных препара-

Рис. 5. Научный руководитель лаборатории 3D Bioprinting Solutions В.А. Муронов





ратов [12]. Научным руководителем лаборатории стал один из признанных пионеров роботизированного биопроизводства, профессор инженерной школы Департамента химико-биологической инженерии государственного университета штата Вирджиния (США) Владимир Миронов (рис. 5).

В 2014 году в компании 3D Bioprinting Solutions был создан первый российский биопринтер FABION собственной оригинальной конструкции и дизайна (рис. 6). В 2015 году там же был напечатан и успешно трансплан-

тирован органный конструкт щитовидной железы мыши.

Год спустя был создан обновленный вариант биопринтера FABION, который имеет новый интерфейс, новое программное обеспечение, головку для двухкомпонентной печати и многое другое. Следующий принципиально новый биопринтер, который использует технологию магнитной левитации и позволяет производить самосборку микро-тканей и микроорганов из тканевых сфероидов, был представлен в Сколково 12 апреля 2016 г. на симпозиуме «Биофабрикация в

космосе». По соглашению с госкорпорацией «Роскосмос» о проведении космического эксперимента по биофабрикации на борту российского сегмента МКС был разработан биопринтер «Орган.Авт» (рис. 7). Сам эксперимент под названием «Магнитный биопринтер» на Международной космической станции космонавт Олег Кононенко провел в декабре 2018 года. Его результатами стали органные модели хряща и щитовидной железы.

#### Революционные направления в биопроизводстве

Применение биотехнологии в следующих направлениях приведет к кардинальному изменению индустрии питания и ряда других приложений:

- искусственное производство кожи (производство одежды, обуви, парфюмерия, экспериментальная медицина);
- производство мяса (дешевое, \$5/кг, более здоровое, с улучшенным вкусом и питательными свойствами, из мышечных клеток практически любых животных);
- не нужны в огромных количествах животные для лабораторных опытов.

Рис. 7. Биопринтер «Орган.Авт»



Ресурсоэффективные биотехнологии приведут к сокращению производства скота, который занимает до 30% земной поверхности и генерирует до 24% глобальных выбросов парниковых газов.

В этом случае инновационный процесс может быть классифицирован как радикальный, поскольку создание будущих предлагаемых продуктов включает в себя высокий уровень новой технической компетенции, не похож на что-либо еще, в настоящее время существующее на рынке, и может оказать преобразующее влияние на современные методы производства.

Технологии биопечати эволюционировали от существующих технологий 3D-печати путем модификации используемых материалов и механизмов их нанесения и потому являются рутинными. А вот производство кожи и мяса, которое, несмотря на использование традиционных биотехнологий, направлено на нетрадиционные применения, является революционным. Также инновационный фактор добавляется компаниями, осуществляющими 3D-биопечать, за счет кастомизации. Это можно считать ранним типом бизнес-модели системы «продукт-сервис», в которой клиенту предлагается интегрированное решение, включающее как конечный продукт (персонализированный имплантат), так и услугу персонализации, необходимую для создания продукта. Все остальные бизнес-модели, используемые компаниями, связанными с биотехнологиями, в основном сосредоточены либо на предоставлении оборудования для биопечати — как и любого другого лабораторного оборудования, либо на предоставлении услуг в области НИОКР.

В соответствии с системой классификации (Utterback и Abernathy) [13], биопроизводство можно рассматривать как все еще

проходящую начальную и/или переходную стадию инноваций.

Индивидуальные биоразлагаемые имплантаты, разрабатываемые в течение нескольких десятилетий в тандеме со стандартизованными металлическими имплантатами для персонального применения, являются единственными продуктами, которые можно считать близкими к стандартизации. Кроме того, нормативные ограничения вынуждают эти продукты плотно вписывать в существующие стандарты, ускоряя коммерциализацию в медицинских целях. Помимо бизнеса биопринтеров, который находится на ранней переходной стадии из-за относительной простоты своих продуктов, все другие виды биотехнологического бизнеса переживают период развития. Такие продукты и услуги по-прежнему сильно различаются и постоянно изменяются на ранней стадии развития, часто между лабораторией и рынком.

В статье [14] обсуждаются вопросы коммерциализации биопроизводства в таких областях, как здоровье, питание, производство тканей (текстиль).

#### Биопроизводство продуктов питания

Бизнес-модель биотехнологического производства продуктов питания для потребления человеком требует нормативного контроля, который является неопределенным и часто задерживает коммерциализацию новых биотехнологических продуктов. Однако некоторые прецеденты дают основания для оптимизма, например, мясо, полученное из клонированных животных, которое, несмотря на его новизну, было одобрено FDA и Министерством сельского хозяйства США. Будучи менее регламентированным продуктом, биопроизведенная ко-

жа будет легче продвигаться на рынок, спрос будет зависеть от потребительских качеств и цены.

По оценкам специалистов потребности населения в мясе к 2050 году вырастут на 73% к сегодняшнему уровню. Покрыть их планируется не только за счет совершенствования фермерского традиционного производства, но и в основном за счет производства культивированного мяса [15].

Одно из определений: культивированное мясо — это искусственные мышечные протеины (cultured meat — «artificial muscle proteins»). Его можно рассматривать не как окончательный продукт, а как ингредиент для конечного продукта из мяса.

Наиболее важно понять состояние с производством культивированного мяса. Патент на производство тканей мяса для питания человека был получен J. Vein (США) в 1998 г. А первый бургер с культивированным мясом был представлен в 2013 году Maastricht University в Нидерландах. Тема выращивания культивированных продуктов стала очень популярной, и к 2019 году появилось более двух десятков стартапов, занимающихся этой проблемой. Одна из компаний Memphis Meats из Калифорнии объявила о производстве мясных шариков из культивированной говядины, а позже из мяса курицы и утки. При этом цена с 40000 USD/кг при появлении продукта снизилась до 5000 USD/кг через два года и к 2021 цена станет сопоставима с рыночной ценой на традиционное мясо. Несколько компаний в Израиле работают по теме культивированного мяса: компания Super Meats (в кооперации с Hebrew University of Jerusalem), Future Meat Technologies, Meat the Future — вместе они получили на разработку этой проблемы \$300

Рис. 8. Культивированное мясо



миллионов по соглашению между Китаем и Израилем [16].

В ЕС мясо определяется как «скелетные мышцы с естественным включением жира и соединительной ткани». Структурно мясо может быть образовано из различных тканей, включая скелетные мышцы, кости, соединительные ткани, кровеносные сосуды и нервы (рис. 8).

Преимущественно используют скелетные мышцы с соединительной тканью, которая состоит из коллагена. Существуют три пути формирования скелетных мышц: эмбриональный миогенез, миогенез взрослых и регенерация мышц после травмы. При создании скелетной мышечной ткани используют имитацию регенерации мышц после травмы и/или эмбрионального миогенеза. Хотя тип клеток и пути созревания могут различаться, конечной целью является получение терминально дифференцированной клетки, способной пролиферировать и дифференцироваться в мышечные волокна. Как только мышца созрела, эти мышечные стволовые клетки (сателлитные клетки), превращаются в миоциты, строительные блоки новой взрослой мышцы. При травме восстановление и регенерация мышц происходит в три этапа: воспалительный ответ; активация, пролиферация, дифференцировка и слияние сателлитных клеток; созревание и

ремоделирование новых мышечных волокон.

Исходные клетки можно получать разными путями:

- первичные клетки, выделенные из исходной ткани;
- генная инженерия или химический способ с программированием клеток на бесконечное размножение;
- отбор спонтанных мутаций клеток;
- преобразование соматических клеток в плюрипотентные стволовые клетки (iPSC);
- культуры тканей человека (здесь имеется масса этических, медицинских и регулирующих проблем).

Как правило, рассматривается выращивание миоцитов (мышечных клеток) путем регенерации. Тонкие выращенные трехмерные структуры могут использоваться для формирования изделий из обработанного мяса (бургеры, колбасы). Для производства мяса туш и, соответственно, для получения стейка, требуется сложная система с несколькими типами клеток, с оптимизацией выращенных толстых структур с сосудистой системой для обеспечения питательными веществами и кислородом и удалением отходов деятельности клеток. Это долгосрочная программа. Для производства толстых тканей мяса необходимо печатать каркасы из деградирующего материала (например, коллагена), чтобы создать сосудистую систему для поддержания культуры в течение срока роста ткани. Другая проблема — создание крупных биореакторов (объемом более 5000 л) для выращивания больших количеств мышечных тканей для превращения культивируемого мяса в товар. Теоретически в подходящих условиях, к примеру, всего десять мышечных клеток свиньи могут произвести 50000 тонн мяса за два месяца.

Существует два способа производства продукта — один на

основе выращивания клеточных тканей и другой на основе процесса ферментации с участием бактерий, водорослей и дрожжей с использованием генной модификации. Полученные органические молекулы затем используются для биопроизводства животных продуктов — биологических эквивалентов (желатина для мяса, казеина для молока, коллагена для кожи). Этот способ предполагает промышленное производство продуктов в больших объемах.

С учетом того, что культивированное мясо является продуктом питания, а не медицинским продуктом, хотя в обоих случаях применяются одинаковые биотехнологии, требования по сертификации продуктов питания будут не такими жесткими, как для медицинского применения.

Культивированное мясо производится без использования искусственных гормонов, антибиотиков, стероидов, ГМО и других, которые обычно применяются в традиционных технологиях производства мяса и рыбы. Чтобы потребитель принял культивированные продукты, нужно убедить его в том, что они отвечают требованиям безопасности, здорового питания, имеют необходимый набор ингредиентов, обладают правильным вкусом и имеют приемлемые цены.

Религиозные моменты: является ли культивированное мясо кошерным? Однозначно да, если клетки взяты от кошерного животного, а в случае, если использованы клетки некошерного животного, например, свиньи или от живого животного, нет единого мнения. По рекомендации Islamic Fiqh Academy (Саудовская Аравия) культивированное мясо может рассматриваться как вегетарианский продукт типа йогурта или ферментированных сыра и пива.

Другие биопечатные продукты питания можно распределить на три категории:

Рис. 9. Новые синтетические материалы



1) продукты, которые легко напечатать, такие как глазурь для пирога и поре;

2) традиционные продукты, как рис, фрукты и мясо, включая обработанные продукты, такие как макароны;

3) альтернативные продукты, такие как экстракты насекомых, грибов и водорослей.

В перспективе биотехнологии открывают путь к домашней еде с помощью биопринтеров, которые позволяют потребителям печатать свои блюда, выбирая цвет, форму, вкус и текстуру, которые они предпочитают. Пищевые принтеры могут преодолевать границу между медицинскими и немедицинскими приложениями, реагируя на медицинские потребности от профилей питания до рецептов лекарств.

Напечатанная еда меняет идеологию производства и распределения, снижая затраты на транспорт, упаковку, материалы. Для печати продуктов питания используют 4 типа 3D-печати: экструзионную, лазерное спекание (SLS), печать со связующим, струйную.

Необходимо различать 3D-печать готовых продуктов из исходных компонентов, где принтер играет роль агрегатора, и биопечать, в которой конечный продукт получается из напечатанной ткани, выращенной затем в биореакторе.

Применение напечатанной еды: в армии и в космосе, еда для пожилых людей, сладкие продукты, жевательная резинка.

**Новые синтетические биоматериалы — новые возможности**

Новые синтетические биоматериалы — это материалы нового поколения с новыми и расширенными функциональными свойствами [17] (рис. 9).

Слияние синтетической биологии и синтетической химии в

сочетании с современными производственными платформами, такими как АМ (3D-печать), определяет новую эру в исследовании новых материалов.

Инженерная биология синтетических биологических материалов открывает новые возможности:

1) быстрое увеличение разнообразия материалов,

2) иерархическая сборка новых многокомпонентных, многофункциональных материалов (например, путем объединения платформ синтетической биологии и изготовления материалов, включая производство добавок, пряжение, технологии нанесения покрытий),

3) доступные/устойчивые пути производства (например, ферментация на отходах),

4) снижение воздействия на окружающую среду при производстве материалов следующего поколения.

Синтетические биологические материалы могут маркироваться путем записи ДНК и использоваться затем для сборки этих биологических «частей» с другими (например, небиологическими) компонентами, давая возможность собирать новые сложные структуры.

Возможны следующие применения синтетических биологических материалов нового поколения.



В области биоэлектроники могут быть представлены новые конструкции, генетически закодированные в форме окислительно-восстановительных полимеров (белков) или нанопроводов, где преобразование сигнала является встроенной функцией. Они найдут применение в здравоохранении для раннего обнаружения/мониторинга, быстрого анализа *in vivo*, в виде интеллектуальных микробиоэлектронных систем (например, затраты на диагностику рака и диабета II типа в США составляют 200 миллиардов долларов на прямые медицинские расходы, а болезнь сердца поражает 22 миллиона граждан США и требует затрат на сумму 172 миллиарда долларов).

Новые материалы в форме покрытий или пористых материалов с улучшенными проводящими свойствами можно применять в разработке аккумуляторных электродов для увеличения емкости и скорости заряда/разряда или аккумуляторных батарей для мобильных электронных устройств. Синтетическая биология может быть использована для создания устройств связи между электронными приборами и биологическими системами [18]. В электронной промышленности изготовление нанопроводников с использованием пептидных каркасов позволит создавать шаблоны для металлизации [19].

Внеклеточные пути переноса электронов, с помощью которых бактерии электрически связываются между своими внутриклеточными запасами химической энергии и внеклеточными твердыми веществами, также представляют потенциальные возможности применения в биокомпьютерах, биоэнергетике и биосенсорах [20]. Синтетические биологические материалы для оптики, способные управлять распространением света (например, структурный цвет, антиотражение, фокусировка све-

та и т.д.) [21], являются основой для проектирования новых микроструктур для интеллектуальных оптических устройств, для оптических датчиков, для преобразования световой энергии.

В природе присутствует огромный спектр материалов с нужными нам свойствами прочности, гибкости, адгезии, прозрачности, отражательной способности, проводимости и т.д. Задача исследователей — обеспечить разработку новых материалов с улучшенной функциональностью на основе понимания взаимодействия между неорганическими фазами (соли или оксиды) и биомолекулами (белками, липидами, углеводами или полиамидами). Примером разработки композитного материала с заданными свойствами является искусственный перламутр, в котором крошечные арагонитовые плитки удерживаются вместе за счет синтетических структур, которые имитируют структурные и механические характеристики их естественных аналогов и были созданы с помощью предварительно разработанной матрично-направленной минерализации [22].

Существует растущий интерес к разработке интеллектуальных материалов (например, многофазных систем или мембран) с интегрированными биологическими функциями и к существующим материалам, которым нужно придать необходимую функциональность. Последняя обладает возможностью «умных» материалов, способных самостоятельно собираться, самовосстанавливаться или развиваться. Эти материалы найдут применение в здравоохранении (например, персонализированные лекарства).

Другой пример — это использование генетически изменяемых микробных клеток для создания многофункциональных чувствительных интерфейсов (например, к влаге), где добавляются новые

функциональные возможности (типа свечения, цвета или запаха).

Самовосстанавливающиеся материалы имеют встроенную способность автоматически восстанавливать появляющиеся повреждения без внешней диагностики проблем или вмешательства человека. Задача состоит в том, чтобы создать автономные адаптивные структуры (термопластики) или самовосстанавливающиеся полимерные материалы, которые используют ион-дипольные взаимодействия. Так, полученные материалы могут растягиваться в 50 раз по сравнению с их обычными размерами и после разрыва на две части могут самостоятельно восстанавливаться в течение одного дня. Электропроводные самовосстанавливающиеся материалы найдут применение в сенсорных экранах.

Синтетические биологические материалы открывают новые возможности для разработки микромеханических устройств. Например, биоинженерия для биомолекулярного управления (с использованием ДНК, РНК и других биомолекул для движения) при создании чувствительных структур и поведенческих материалов с функциями расширения или движения для биомолекулярных программируемых роботов. Искусственные мышцы для исполнительных элементов роботов можно создать на основе спиральных катушек из ориентированных полимерных волокон, которые генерируют большие обратимые изменения длины в результате теплового расширения при геометрическом ограничении (наматывание/разматывание спиральных конструкций) [23]. Это обеспечивает движение посредством процессов, связанных с внутренними изменениями в составляющих материалах, и может стать альтернативой существующим механическим приводам современных роботов.

Для тканевой инженерии чувствительные полимеры позволяют строить каркасы, чувствительные к различным физиологическим стимулам (например, рН, температуре и концентрации соли). Синтетическая биология также предлагает технологию включения стабильных изотопов (например, дейтерия), которые в твердых материалах могут привести к улучшению физических и функциональных свойств. Одно из направлений синтетической биологии — создание библиотек молекулярных мономеров для получения строительных блоков разного назначения, в основном для построения полимерных каркасов. Другое направление — биополимерные строительные блоки для биоэлектроники и разработки оптических свойств. Это будут белковые модули, разработанные для взаимодействия с другими компонентами (каркасами, поверхностями и другими сделанными на заказ молекулами), которые, например, передают электрические, оптические, флуоресцентные сигналы.

Создание материалов более высокого порядка с новыми свойствами потребует дальнейшей разработки инструментальных платформ, таких как технологии прядения и сопряжения с 2D/3D-печатью, сборка слоистых материалов с помощью аддитивного производства и самостоятельная сборка новых и разнообразных компонентов. Также необходимо иметь измерительные системы для оценки физических свойств биоматериалов, таких как: реология, испытания на растяжение, узконаправленное или широкоугольное рентгеновское рассеяние, рассеяние света, тепловые характеристики и структурный анализ с помощью набора методов визуализации и спектроскопии. Широкое применение синтетических биоматериалов потребует создания производственной базы,

рассчитанной на выпуск больших объемов недорогих материалов.

Создание бинарных (или более высокого порядка) материалов, где нужные свойства появляются только при смешивании или сборке компонентов, является важным фактором для быстрого проектирования новых материалов. Это потребует использования всех синтетических методологий, включая химический, биологический и нанотехнологический подходы, а также использования аддитивного производства — области, охватывающей проектирование, изготовление, сборку и измерение биоэлементов для доставки конструкций, устройств и систем и их последующего использования *in vivo* или *in vitro* в более масштабных структурах.

Огромное разнообразие новых синтетических биоматериалов с широким спектром характеристик потребует диверсификации за счет генетического кодирования неканонических аминокислот на платформах синтетической биологии. Метки могут быть сохранены, расщеплены и даже размещены в различных точках кодирующей последовательности ДНК и будут легко считываться.

К характеристикам новых биоматериалов следует отнести структурные (размер, прочность, гибкость, форма и т.д.), функциональные (проводимость, программируемость, чувствительность к свету, вязкость, эластичность и т.д.), биологическая и химическая стабильность, способность к самосборке, анизотропия поведения, биосовместимость, токсичность. Потребуется мощное программное оснащение с соответствующими базами данных, позволяющее быстро находить и анализировать имеющиеся отдельные строительные блоки биоматериалов, возможность их использования для получения материалов высокого уровня с заданными свойствами.

Инновации в области синтетических биологических материалов должны охватывать весь цикл от открытия, разработки, тестирования и изготовления новых современных материалов до индустриализации и коммерциализации. Необходимо использовать доступные инструменты и инфраструктуру, имеющиеся сегодня в смежных областях синтетической биологии (например, в производстве биохимических веществ).

Социальные, этические, культурные, экономические и экологические аспекты биопроизводства [24]

3D-биопечать приводит к децентрализации производства с акцентом в сторону малых предприятий в силу ряда привлекательных опций: невысокой стоимости, кастомизации, быстрого производства, расположения рядом с потребителем. Возможные социальные направления применения:

— косметическая хирургия для улучшения тела, объемное представление постоперационного тела, боди-арт (художник Diemut Strebe): напечатанное ухо V. van Gogh [25] с использованием живых клеток потомка художника, Lieuwe van Gogh имеет 1/16 часть набора генов своего знаменитого предка. Произведение было представлено в ZKM Media Museum в Германии. Ухо построено из живых клеток и может оставаться биологически «живым», пока его поддерживает биораствор, в котором оно находится. «Вы можете поговорить с ухом» (рис. 10 а, б).

Другой пример — выращенное на биопринтере из хряща клиента — современного художника ухо, пересаженное на его руку (рис. 11).

Децентрализация производства с 3D-печатью позволит пациентам получать выгоду от более персонализированного лечения с

а)



б)



меньшим количеством посещений больницы и сокращением времени ожидания, поскольку медицинские продукты и услуги могут оказываться в рамках существующей лабораторной инфраструктуры.

3D-печать также ассоциируется с «демократизацией» производства, т.е. возможно появление так называемых «3D-биохаков», то есть биологов-самоучек, использующих 3D-принтеры для экспериментов вне обычных научных, медицинских и коммерческих учреждений.

Другая угроза в использовании АМ в производстве наркотиков и гастрономии.

### Культурные аспекты

Рассматриваются три возможных сценария развития АМ в биологии и соответствующего влияния на человечество:

1. Ящик Пандоры — 3D-биопечать непреднамеренно создает серьезные угрозы для общества.

2. Рог изобилия — представляет его как поставщика практически неограниченных ценных ресурсов.

3. Волшебный мешок — изображает технологию как таинственный элемент, который преподносится как подарок или награда, но

обладает способностью скрывать или обманывать.

Понимание этих сценариев может стимулировать осторожный подход к развитию технологий и, в частности, задуматься о наших взаимоотношениях с собственными телами, поскольку границы между естественными и изготовленными частями тела могут быть размыты.

### Социальные аспекты

Ключевым аспектом для медицинских изделий является обеспечение доступности новых методов лечения для граждан. Нужно

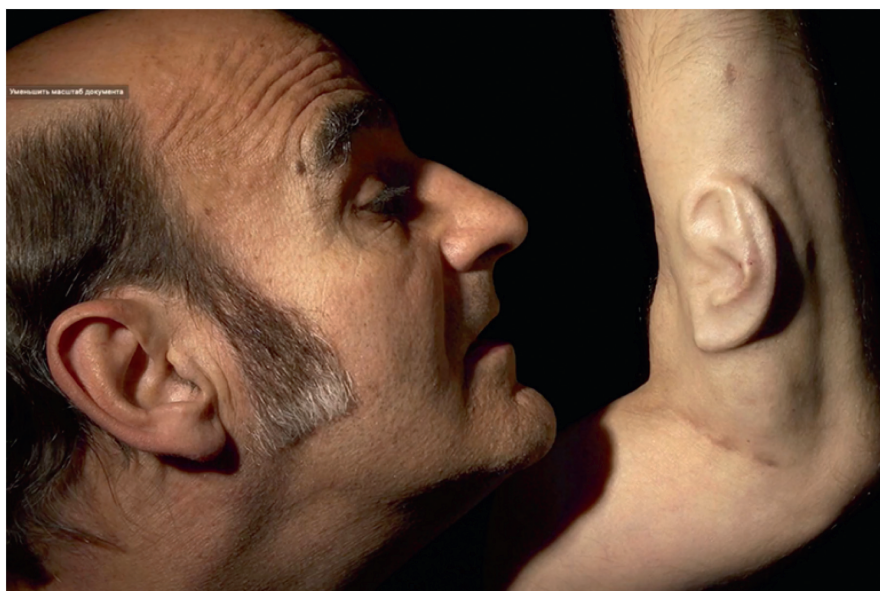
гарантировать, что развивающиеся страны смогут воспользоваться новейшими разработками в области 3D-биопечати для пациентов с ограниченными возможностями.

Другим важным аспектом является влияние биотехнологий на занятость. В случае 3D-биопечати использование инфраструктуры 3D-печати в медицинском секторе может повлиять на инфраструктуру и деятельность лаборантов.

### Этические аспекты

К ним относятся вопросы безопасности, охраны, донорства органов, защиты данных и прав ин-

Рис. 11. Напечатанное и пересаженное на руку клиента ухо



теллектуальной собственности. С безопасностью в первую очередь связаны возможные использования для создания биологического оружия и других видов биологической опасности, в частности, в случае геной инженерии «своими руками» или производства опасных материалов вне контролируемой среды.

Одна интересная будущая возможность заключается в снижении потребности в экспериментах на животных, поскольку соответствующие биоматериалы могут быть изготовлены в лаборатории. Однако эксперименты на животных будут необходимы в медицинских исследованиях.

### **Экономические и экологические аспекты**

Оценки потенциальных экономических последствий 3D-печати в целом положительные, но значительно различаются.

Проблемы и варианты:

1. Нормативная база (нормативные последствия классификации продуктов (например, как медицинских или терапевтических, как биологических или неббиологических); защита данных, интеллектуальной собственности и конфиденциальности; вопросы безопасности и информированного согласия; стандартов).

2. Справедливое распределение выгод.

3. Роль граждан в формировании развития.

### **Проблемы и варианты, связанные с нормативными подходами**

Первая нормативная проблема заключается в определении и классификации процессов и продуктов, связанных с 3D-биопечатью. Некоторые 3D-биопечатные изделия будут сочетать биологические и неббиологические компоненты и могут не соответствовать определению, например, медицинские устройства или передо-

вые методы лечения. Различные правила применяются к биологическим и неббиологическим материалам (например, для каждого из которых требуется отдельная лицензия), что приводит к осложнениям для комбинированных продуктов, таких как 3D-печатные каркасы, на которых выращиваются живые клетки. Точно так же, хотя медицинские приборы имеют более строгие стандарты и более высокие барьеры для одобрения на рынке, чем немедицинские устройства, стандарты и барьеры для передовых методов лечения еще сильнее и выше. Разработчики и инноваторы в этой области должны получить четкое руководство по определению и классификации своей продукции, чтобы понимать, какие правила, стандарты и процедуры к ним применяются.

Вторая нормативная проблема заключается в защите данных, интеллектуальной собственности и конфиденциальности. Например, децентрализованная сеть служб трехмерной визуализации и биопечати, которые предоставляют специализированные медицинские устройства, может иметь доступ к конфиденциальным медицинским данным и другой личной информации. Достижения в области 3D-биопечати могут привести к возникновению вопросов о владении устройствами и биоматериалами, имплантированными в тела пациента, а также о патентоспособности новых биологических материалов, которые существенно отличаются от «натуральных» биоматериалов.

Третья нормативная проблема связана с безопасностью, в частности, с рисками выполнения процедур и осуществления производства продукции вне профессиональной среды, с соблюдением этических стандартов, таких как информированное согласие. Также эти проблемы безопасности должны быть сбалансированы с

потенциальными выгодами демократизации технологий. Например, 3D-биопечать своими руками может способствовать инновациям с хорошими социальными результатами и может привлечь новое поколение граждан, стремящихся узнать о науке, технике, производстве и медицине.

Четвертая нормативная проблема заключается в тестировании и стандартах на продукцию. Там, где это разрешено оптимизацией результатов и безопасности пациентов, тестирование и стандарты могут фокусироваться на процессе 3D-биопечати и широких параметрах ее продуктов, а не на конкретных продуктах.

Решение этих проблем требует баланса в подходе к регулированию, например, для обеспечения высоких стандартов для медицинских продуктов без блокирования выгодных инноваций на рынке.

### **Проблемы и варианты, связанные с распределением выгод**

Социальная справедливость и распределение выгод могут быть сформулированы как проблема регулирования среди различных социальных групп: стоимость и доступность для граждан.

В ходе исследования были определены два широких варианта: ориентированная на миссию и открытая политика в области инноваций.

Ориентированная на миссию политика направлена на достижение конкретных результатов и может способствовать разработке 3D-биопечати для решения конкретных медицинских проблем.

Политика открытых инноваций направлена на создание условий, в целом благоприятных для новых разработок в широком спектре областей. Такая политика может быть направлена на поощрение более широкого круга участников — включая универси-

теты, компании и сообщества — работать вместе и обмениваться данными, результатами и решениями.

### **Заключительные замечания**

Три ключевые тенденции: децентрализация, индивидуальная деятельность и массовая кастомизация тесно связаны с 3D-печатью и биопечатью и могут оказать существенное разрушительное влияние на общество.

Основные узлы, обеспечивающие широкую сеть пользователей, могут постепенно заменяться большим количеством собственных производств и услуг. Это достигается за счет снижения накладных расходов и снижения требований к экспертным знаниям, а также благодаря требованию получать больше товаров и услуг по индивидуальному заказу. Однако для медицинских применений эта тенденция может быть менее выраженной, поскольку более высокие стандарты для медицинских изделий и устройств требуют жестко контролируемых инфраструктур производства и тестирования, что предполагает более высокие накладные расходы и большую зависимость от опыта специалистов. Таким образом, хотя возможна некоторая степень децентрализации, центральная структура вряд ли полностью исчезнет.

Направление, связанное с 3D-печатью, приводит к появлению частных и сообществ «мастеров по оказанию услуг», то есть к выходу за рамки профессиональной лабораторной среды. Эта деятельность может осуществляться в немедицинских целях, возможно, по коммерческим, художественным или эстетическим причинам или просто как хобби.

Переход к «массовой кастомизации» — полуавтоматизированному производству персонализированных изделий в больших масштабах — это одно из ключевых преимуществ АМ, потому

что она может позволить более дешевое, более автоматизированное производство сделанных на заказ продуктов, которые действительно предназначены для тела отдельных пациентов. И здесь нужно будет найти альтернативные способы поддержания таких же высоких стандартов качества в рамках парадигмы массового производства, например, смещая фокус испытаний с самих продуктов на процессы и материалы, которые используются для их изготовления.

### **Неоднозначная граница между выздоровлением и улучшением состояния человека**

Разработка однозначной границы между медицинскими и немедицинскими процедурами требует четкого определения нормальности. Достижение этой точки для компенсации какой-либо инвалидности или болезни будет рассматриваться как выздоровление, а выход за пределы этого для дальнейшего улучшения способностей будет улучшением. Однако такие понятия, как нормальность и инвалидность, являются относительными, гибкими и чувствительными к контексту. Как таковые некоторые вмешательства могут рассматриваться как медицинские в одном контексте и как косметические — в другом контексте. Эта граница, вероятно, будет оставаться неоднозначной в течение некоторого времени, но может иметь важные юридические и социальные последствия, важно постоянно контролировать эту границу.

### **Ответственные исследования и инновации**

Планируется, что в рамках европейского текущего проекта SMART-Map, финансируемого Horizon2020, будут разработаны конкретные дорожные карты для ответственного развития техноло-

гий 3D-печати и услуг в области биомедицины.

Ответственные исследования и инновации (RRI) — это плюралистический подход к управлению инновациями, который все больше интегрируется в инициативы ЕС в области исследований и инноваций. Он часто используется в качестве основы для разработки значимых мероприятий по взаимодействию с общественностью и заинтересованными сторонами.

Степень неопределенности и ширококомасштабные воздействия 3D-биопечати оправдывают серьезные коллективные размышления о направлении ее развития, и RRI может помочь структурировать дискуссию.

### **Управление ожиданиями**

Технологии являются социальными, и социальные ценности меняются со временем. Этические, социальные и культурные силы могут влиять на будущее направление развития 3D-биопечати так же, как и на технические разработки. Они также могут привести к изменениям в нашем понимании и ожиданиях технологии. Поэтому важно постоянно размышлять о границах приемлемости различных приложений.

Хотя возможно активное изменение социальных установок, гораздо сложнее убедить людей принять непопулярные технологии, чем найти пути обеспечения того, чтобы технологии развивались так, чтобы это было приемлемо для людей. В этом отношении могут помочь выводы из социальных исследований науки и техники, включая ответственные исследования и инновации.

### **Заключение**

Бизнес в области моделирования моделей тканей/органов можно рассматривать как многоступенчатый процесс. Учитывая,

что эти модели в настоящее время предназначены главным образом для исследовательских целей, они не обязаны проходить высокий уровень сертификации и/или нормативного контроля. В конечном счете, однако, ожидается, что эта технология станет важным инструментом в диагностической и персонализированной медицине, а также в качестве надежных платформ для скрининга лекарственных средств (в качестве альтернативы испытаниям на животных), где регуляторный контроль

является чрезвычайно требовательным. Многие модели тканей/органов на основе биопроизводства в настоящее время разрабатываются различными организациями (академическими и неакадемическими), что отражает высокий спрос на исследования.

Производство культивированного мяса в глобальном масштабе способно привести к изменению климата на Земле из-за перестройки структуры сельского хозяйства. Понятно, что на это потребуются десятки лет, и даже появление на

рынке культивированного мяса в виде переработанных продуктов (бургеров и колбас) не произойдет в ближайшие несколько лет.

В целом биотехнология находится на правильном пути к коммерциализации, но все еще на довольно ранней стадии. Ожидается, что в ближайшие несколько лет ее развитие ускорится, что приведет к увеличению доступности продуктов на основе биотехнологий на рынке. ■

#### Литература

- Chimene, D.; Lennox, K.K.; Kaunas, R.R.; Gaharwar, A. K. Advanced bioinks for 3D printing: A materials science perspective. *Ann. Biomed. Eng.* 2016, 44, 2090.
- Bose, S.; Vahabzadeh, S.; Bandyopadhyay, A. Bone tissue engineering using 3D printing. *Mater. Today* 2013, 16, 496–504.
- Sun, J.; Vijayavenkataraman, S.; Liu, H. An overview of scaffold design and fabrication technology for engineered knee meniscus. *Materials* 2017, 10, 29.
- Qi X, Wang H, Zhang Y et al. Mesoporous bioactive glass-coated 3D printed borosilicate bioactive glass scaffolds for improving repair of bone defects. *Int. J. Biol. Sci.* 14 (4), 471 (2018).
- Touri M, Moztarzadeh F, Osman NaA, Dehghan MM, Mozafari M. Optimisation and biological activities of bio-ceramic robocast scaffolds provided with an oxygen-releasing coating for bone tissue engineering applications. *Ceram. Int.* 45 (1), 805–816 (2019).
- Zhou X, Zhu W, Nowicki M et al. 3D bioprinting a cell-laden bone matrix for breast cancer metastasis study. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 8, 30017–30026 (2016).
- Bioactive scaffolds for osteochondral regeneration. Cuijun Deng, Jiang Chang, Chengtie Wu. *Journal of Orthopaedic Translation* Volume 17, April 2019, Pages 15–25.
- C. Deng, Q. Yang, X. Sun, L. Chen, C. Feng, J. Chang, et al. Bioactive scaffolds with Li and Si ions-synergistic effects for osteochondral defects regeneration. *Appl Mater Today*, 10 (2018), pp. 203–216.
- Wei, Y.; Li-Tsang, C.W.; Liu, J.; Xie, L.; Yue, S. 3D-printed transparent facemasks in the treatment of facial hypertrophic scars of young children with burns. *Burns* 2017, 43, e19–e26.
- The application of 3D-printed transparent facemask for facial scar management and its biomechanical rationale. Wei Y, Wang Y, Zhang M, Yan G, Wu S, Liu W, Ji G, Li-Tsang CWP. [www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29032976](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29032976)
- John Kosowatz Biotechnology Anticipates 4D Printing, *ASME*, Apr 1, 2020
- [www.bioprinting.ru](http://www.bioprinting.ru)
- J. M. Utterback, W. J. Abernathy A dynamic model of process and product innovation. *Omega*, 3 (1975), pp. 639–656.
- Translating Biofabrication to the Market. Pedro F. Cost Trends in Biotechnology. Volume 37, Issue 10, October 2019, Pages 1032–1036
- Consumer acceptance of cultured meat: A systematic review Christopher Bryant\*, Julie Barnett. *Meat Science* 143 (2018) 8–17.
- Bringing cultured meat to market: Technical, socio-political, and regulatory challenges in cellular agriculture. Neil Stephens, Lucy Di Silvio, Illtud Dunsford, Marianne Ellis, Abigail Glencross, Alexandra Sexton. *Trends in Food Science & Technology* Volume 78, August 2018, Pages 155–166.
- A living foundry for Synthetic Biological Materials: A synthetic biology roadmap to new advanced materials Rosalind A. Le Feuvre, Nigel S. Scrutton. *Synthetic and Systems Biotechnology* Volume 3, Issue 2, June 2018, Pages 105–112.
- T. Tschirhart, E. Kim, R. McKay, H. Ueda, H. C. Wu, A. E. Pottash, A. Zargar, A. Negrete, J. Shiloach, G. F. Payne, W. E. Bentley Electronic control of gene expression and cell behaviour in *Escherichia coli* through redox signaling. *Nat Commun*, 8 (2017), p. 14030.
- L. Wu, J. He, W. Shang, T. Deng, J. Gu, H. Su, Q. Liu, W. Zhang, D. Zhang. Optical functional materials inspired by biology. *Adv. Optical Mater*, 4 (2016), pp. 195–224.
- M.A. TerAvest, C.M. Ajo-Franklin Transforming exoelectrogens for biotechnology using synthetic biology. *Biotechnol Bioeng*, 4 (2015), pp. 687–697.
- K.H. Chan, W. H. Lee, S. Zhuo, M. Ni Harnessing supramolecular peptide nanotechnology in biomedical applications. *Int J Nanomed*, 12 (2017), pp. 1171–1182.
- L. — B. Mao, H. — L. Gao, H. — B. Yao, H. Cölfen, G. Liu, S. — M. Chen, S. — K. Li, et al. Synthetic nacre by pre-designed matrix-directed mineralization. *Science*, 354 (2016), pp. 107–110
- C. S. Haines, N. Li, G. M. Spinks, A. E. Aliev, J. Di, R. H. Baughman New twist on artificial muscles. *Proc Natl Acad Sci*, 113 (2016), pp. 11709–11716.
- Philip Boucher, July 2018 Scientific Foresight Unit (STOA) PE 614.571.
- <https://3dprint.com/5165/vincent-van-gogh-3d-printed-ear/>

24-28 | 05 | 2021

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»  
[www.metobr-expo.ru](http://www.metobr-expo.ru)



# 2021

21-я международная  
специализированная  
выставка

# МЕТАЛЛООБРАБОТКА

«Оборудование, приборы  
и инструменты  
для металлообрабатывающей  
промышленности»

При поддержке:



Реклама 12+



Организатор:



# ПОДПИСНОЙ КУПОН НА ЖУРНАЛЫ



## РИТМ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Вы можете оформить подписку на журнал «РИТМ машиностроения» с любого месяца. Стоимость одного номера — **250** рублей, стоимость годовой подписки (10 номеров) — **2500** рублей.

Для выставления счета направьте заполненный купон по адресу: [ritm@gardesmash.com](mailto:ritm@gardesmash.com)

### 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 журнал «РИТМ машиностроения»:  номер  год

Подписка на журнал «Аддитивные технологии»:  номер  год



Вы можете оформить подписку на журнал «Аддитивные технологии» с любого месяца. Стоимость одного номера — **250** рублей, стоимость годовой подписки (4 номера) — **1000** рублей.

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



101000, Москва, Милютинский пер., 18А, оф. 36с, пом. 1, т/ф (499) 55-9999-8,  
e-mail: [ritm@gardesmash.com](mailto:ritm@gardesmash.com), [www.ritm-magazine.ru](http://www.ritm-magazine.ru)  
e-mail: [info@additiv-tech.ru](mailto:info@additiv-tech.ru), [www.additiv-tech.ru](http://www.additiv-tech.ru)