

# at

аддитивные  
технологии

2 / 2020



Кинематические системы перемещения печатающей головки 3D-принтера 8



Микроразмерная аддитивная наплавка металлических порошков импульсным лазерным излучением 20



Применение AM в биотехнологии: термины, методы, материалы (часть 1) 31

10–14 | 08 | 2020

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



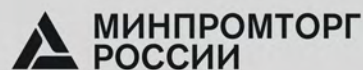
2020

21-я международная  
специализированная  
выставка

# МЕТАЛЛООБРАБОТКА

«Оборудование, приборы  
и инструменты  
для металлообрабатывающей  
промышленности»

При поддержке:



Реклама 12+



Организатор:

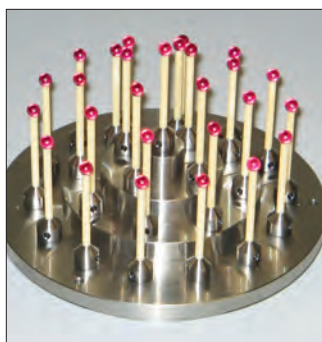


# at

аддитивные  
технологии



11



18



24

Издатель ООО «ПРОМЕДИА»

директор О. Фалина

главный редактор  
М. Копытина

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

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.

## СОДЕРЖАНИЕ

- 2** Аддитивные технологии в развитии
- 4** Алюминий и аддитивные технологии: в одной упряжке
- 8** Кинематические системы перемещения печатающей головки 3D-принтера
- 11** Оборудование для аддитивного производства
- 18** Уникальные особенности и преимущества томографов Werth
- 20** Микроразмерная аддитивная наплавка металлических порошков импульсным лазерным излучением
- 24** Финишная обработка изделий из полиамида после 3D-печати
- 28** 3D-принтер или станок?  
Сравниваем методы прототипирования в автопроме
- 31** Применение АМ в биотехнологии: термины, методы, материалы (часть 1)



# АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАЗВИТИИ

Татьяна Карпова

28–31 января в московском ЦВК «Экспоцентр» уже в четвертый раз в рамках специализированной выставки пластмасс и каучука «Интерпластика–2020» состоялась международная конференция по аддитивным технологиям (АТ) в промышленности 3D fab + print Russia, дополненная тематической экспозицией. Организованное «Мессе Дюссельдорф Москва» и ООО «Современное оборудование» мероприятие традиционно стало центром притяжения ведущих компаний отрасли, работающих в России, и вузов, имеющих необходимое оборудование и включивших тему АТ как в образовательный, так и в научный процесс.

В докладах участников были затронуты все аспекты развития отечественного рынка аддитивных технологий: решения для печати металлами, пластиками, керамикой, воском, композитами; возможности программного обеспечения для печати и моделирования; внедрение новых материалов; актуальные методики контроля; исследование процессов, подготовка кадров, а также возможности, преимущества и эффективные применения АТ в авиастроении, медицине, обувном производстве и др. И, конечно, красной линией во многих выступлениях проходили такие вопросы, как цели, пути, особенности внедрения АТ на предприятиях, грамотный подход к выбору технологии и оборудования, выбор целевого сегмента рынка, организация бизнеса и др., которые помогут пользователям понять, готовы ли они использовать АТ у себя.

Кроме того, хочется в очередной раз отметить, что такой формат, как батл «Лучшие против лучших», предложенный организаторами, неизменно привлекает внимание участников актуальностью обсуждаемых тем и живостью общения. В этом году в поединках встретились и отвечали на вопросы специалисты ООО «Титан-Авангард» и SLM Solution (тема: «Выборочное лазерное сплавление – стандарт металлической 3D-печати»), а также ООО «Эксклюзивные ре-

шения» (3D SLA) и IMPRINTA (тема: «3D-принтеры: взгляд изнутри»).

Дмитрий Трубашевский – бессменный ведущий конференции, подводя итоги прошедшего года, в т.ч. и на основании состоявшихся выступлений, на своей странице в Facebook в качестве тенденций российского рынка АТ отметил следующее:

- дальнейшую работу лидеров отрасли над совершенствованием своих технологий и разработок, включая прорывные решения с большим потенциалом;
- популярность у отечественных пользователей технологий SLM/PBF/LBM, FDM/FFF, SLA, SLS и растущую моду на Binder Jetting;
- в плане материалов – огромный выбор полимерного нитевидного филамента, включая высокотемпературные пластики, которые из-за более высокой цены по сравнению с PLA, PETG, SBS, ABS пока слабо востребованы пользователями, а также новый тренд в использовании пластмассовых гранул;
- недостаточное предложение по отечественным программным продуктам, хотя есть интересные разработки и попытки завоевания зарубежного рынка;
- ожидание роста количества отечественных прорывных комплексных проектов, уровня западных внедрений;
- продолжение работы над стандартами и дорожной картой отрасли;
- насыщенность делового пространства мероприятиями по АТ, где, конечно, он видит место для 3D fab + print Russia, что и было подтверждено в положительных комментариях участников. Редакция журнала «Аддитивные технологии» также считает, что данная конференция как площадка для демонстрации возможностей, новых решений, обмена опытом очень комфортная и эффективная, отличается прекрасной организацией, интересными темами и форматами, высоким уровнем подготовки выступлений. ■

## 4D-напечатанные МИКРОИГЛЫ

Команда инженеров из Университета Рутгерса в Нью-Брансуике разрабатывает иглы для изготовления четырехмерной печатью. Используя 3D-печать и интеллектуальные материалы, которые меняют форму после печати, команда создала безболезненный и менее инвазивный способ введения подкожных инъекций, чем существующие сейчас.

В разработке инновационных микроигл ученые были вдохновлены миром природы, и исследовательская группа опиралась на особенности строения органов некоторых существ, таких как хоботок паразитов, жало медоносной пчелы и иглы дикобраза. На основании этого была разработана микроигла, которая при введении соединяется с тканью кожи.

Микроиглы были протестированы на образце мышечной ткани курицы и показали многообещающие результаты.

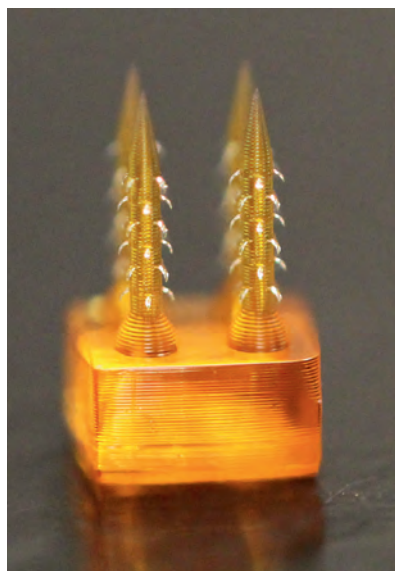


Фото: НИТУ «МИСиС»/Sergey Gnuskov

## Новый материал для имплантов

Большинство современных имплантатов изготавливаются из титана — он прочен, биоинертен и не подвержен коррозии. Однако титан не обладает биоактивными и антибактериальными свойствами, поэтому ученые активно работают над созданием покрытий, устраняющих эти недостатки.

Коллектив научно-учебного центра самораспространяющегося высокотемпературного синтеза НИТУ «МИСиС» разработал покрытия для титановых имплантатов на основе оксида титана с наночастицами серебра и платины. Материал позволяет ускорить активное деление клеток костной ткани в среднем на 12-20 %, а также обеспечить уничтожение до 100 % бактерий через 72 часа и защиту от формирования бактериальной пленки.

<https://www.3dprintingmedia.network/>

<https://ria.ru/>

## Объект за несколько секунд

В Лаборатории прикладных фотонных приборов при Федеральной политехнической школе Лозанны (Швейцария) разработали технологию сверхскоростной трехмерной печати объектов. Методика основана на принципе томографии, а в качестве рабочего вещества используется фоточувствительный полимер. Его заливают в прозрачную емкость, которая равномерно вращается, и внутри, как по волшебству, формируется плотная структура трехмерного объекта. Остается только

слить излишки жидкости, и изделие готово.

Область облучения в настоящее время ограничена кубом со стороной в 80 микрон, это своего рода «пиксель» при таком способе 3D-печати. Максимальные размеры готовых изделий не превышают 2 см, но инженеры готовы модернизировать установку для получения 15-сантиметровых предметов. Высокая скорость облучения лазером позволяет напечатать единственный объект всего за 30 секунд. Однако из-за механиче-



ских качеств полимера (слишком мягкий) он не отличается высокими эксплуатационными свойствами. Поэтому область применения пока ограничивается элементами отделки или простыми пластиковыми изделиями вроде мягких вкладышей для наушников.

<https://www.techcult.ru/>

# Алюминий и аддитивные технологии: в одной упряжке

Зинаида Сацкая

На каждом международном форуме по проблемам современной индустрии всегда делается акцент на таком экономическом факторе, как удлинение цепочек добавленной стоимости. То, чем занимается созданный РУСАЛом в сотрудничестве с МИСиС Институт лёгких материалов и сплавов (ИЛМиТ), как раз про это. И про алюминий в аддитивных технологиях.

О состоянии дел и перспективах использования алюминия в аддитивных технологиях рассказали в интервью нашему журналу сразу три топ-специалиста ИЛМиТ — генеральный директор Роман Вахромов, директор по науке Дмитрий Рябов и директор департамента аддитивных технологий Владимир Королёв.



*Роман Вахромов,  
генеральный  
директор  
Института лёгких  
материалов и  
сплавов (ИЛМиТ)*

## Как всё начиналось

Будучи по сути R&D-структурой РУСАЛ, ИЛМиТ имеет четыре научных направления: алюминиевые деформируемые и алюминиевые литейные сплавы, алюмооксидная продукция на основе глинозёма и аддитивные технологии. Доля «аддитивки» в общем объеме работ составляет, по словам Романа Вахромова, около 30%.

РУСАЛ выпускает около 100 различных видов продукции — пудры, газообразователи, пигменты, различные порошки. Ежегодный прирост рынка материалов и технологий для аддитивной печати на 30% не мог пройти незамеченным, и РУСАЛ принял решение развивать это направление. Развитие пошло сразу по

всем направлениям — и создание в 2017 Центра аддитивных технологий в ИЛМиТ, и изготовление первых опытных партий. «РУСАЛ сделал громадное дело для распространения в России алюминия для аддитивных технологий, — утверждает Роман Вахромов. — Более чем сотне предприятий были бесплатно переданы опытные образцы порошков в обмен на обратную связь. Фидбэк помог нам понять требования наших потенциальных потребителей к морфологии и гранулометрическому составу порошков, выявлению факторов, которые могут отрицательно влиять на печать. С учётом полученной информации буквально за полтора года мы доработали технологию стандартного сплава AlSi10, и сейчас это идеальный порошок. Это правильная сферическая форма, именно тот гранулометрический состав, который обеспечивает хорошую текучесть, исключает дефекты при сплавлении».



*Дмитрий Рябов,  
директор по науке  
Института  
лёгких материалов  
и сплавов (ИЛМиТ)*

## Положение на рынке

В 2019 году РУСАЛ продал в России чуть больше 10 тонн. Основными потребителями стали автомобилестроение, космическая и авиационная отрасли. Из крупных промышленных компаний никто, кроме РУСАЛа, алюминиевых порошков не производит. Есть, как мне объяснили, производители типа ВИАМ, которые могут произвести и поставить порошки, но производственные мощности РУСАЛ на несколько порядков больше. А вопрос о месте России на мировом рынке Дмитрий Рябов назвал едва

ли не философским: «По некоторым аналитическим исследованиям, доля России по числу установленных принтеров составляет 2% мирового объема, а по материалам такой аналитики вообще нет, потому что никто не знает, как посчитать. Нет единой организации, которая посчитала бы проданные порошки. Оценки рынка экспертами сильно разнятся. Но цель у нас есть — постепенно наращивать выпуск и продажу и стать производителем алюминиевых порошков номер один».

#### Алюминий требует технологической фантазии

Как рассказали мои собеседники, у алюминия есть козырь в виде его удельного веса, что важно для ряда изделий, где масса — решающий критерий. В принципе, конечно, любой материал найдет свое применение, но уже очевидно, что есть такие сферы, где без аддитивных технологий никак не обойтись, они, по сути, единственный способ решить какую-то задачу. Чтобы алюминий нашел достойную нишу, он должен быть лучше чем то, что сейчас используют в традиционных технологиях. Это первая задача. А вторая задача связана с мировым трендом на создание деталей под технологию, потому что чем меньше поддержек, тем процесс дешевле и быстрее. «Для этого мы сейчас нарабатываем компетенции под услуги инжиниринга, — говорит Вахромов. — Мы можем разработать материал, технологию его производства, технологию печати, делать редизайн деталей с учетом нагрузок и прочего, а также снабдить заказчика комплектом документации с информацией о том, как печатать, как производить техническую обработку и описание результатов испытанных образцов».



*Владимир Королёв,  
директор  
департамента  
аддитивных технологий  
Института лёгких  
материалов и сплавов  
(ИЛМиТ)*

Тему продолжает Владимир Королёв: «Сейчас в каждом принтере есть режим для стандартного сплава, и многие считают, что вот купил принтер, нажал кнопку и что-то построил. Да, это может так работать, хотя там вопросы для технологов тоже возникают. А новый материал в принципе требует другого под-

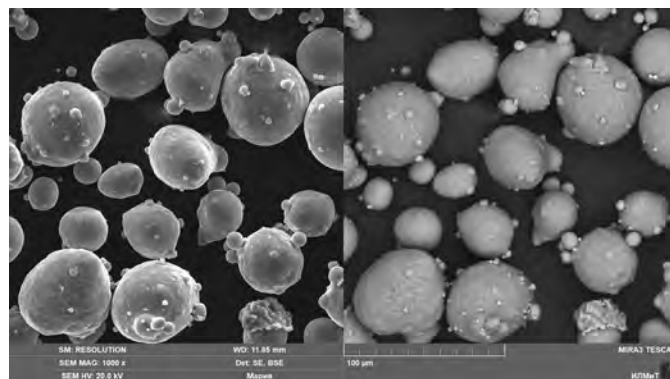
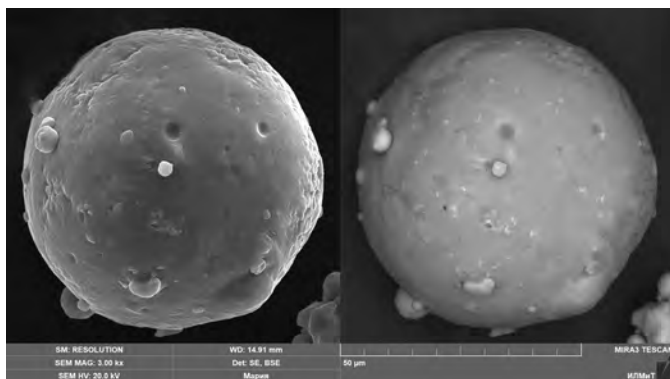
хода. Нужна технологическая фантазия, чтобы найти оптимальный режим. В 2018 году у нас появился первый новый материал. Мы начали его пробовать и поняли, что всё происходит совсем по-другому и что режим надо создавать с самого начала».

Печать алюминием позволяет уйти от конструкторского традиционализма, погрузиться в конструкторскую фантазию. «Если до этого в течение века конструкторы были скованы существующими технологиями — можно отлить только такое, вырезать только такое, — то сейчас стало гораздо проще, — говорит Роман Вахромов. — Особенности аддитивных технологий позволяют раскрыть невероятно мощный потенциал алюминия. Как только принтеры станут подешевле, во многих секторах машиностроения станет экономически и технологически привлекательным изготовление деталей общего назначения. Мы, честно говоря, верим в теплообменники, потому что к такому большому плюсу алюминия, как его высокая теплопроводность, добавляется возможность напечатать каналы любой конфигурации».

#### Ограничения

«Алюминий — металл замечательный, — говорит Дмитрий Рябов. — Он не очень дорогой и хорошо обрабатывается, но аддитивные технологии пока дороги из-за высокой цены на 3D-принтеры, которая отягощает цену готового изделия. Пока в России алюминиевые порошки используются преимущественно для изготовления прототипов. Правда, например, космическая промышленность готова принимать дорогие решения, тем более что это эксклюзивные изделия, несколько штук в год. Дешевле их напечатать, чем создавать оснастку, отливать, обтачивать».

Порошки РУСАЛ печатаются на всех принтерах, что есть сегодня на рынке. В центре аддитивных технологий ИЛМиТ есть 3D-принтер EOS. Клиент, у которого такой же принтер, получит комплексное решение — материал и технологию, а для владельцев других принтеров ИЛМиТ помогает адаптировать режимы. «Основная проблема технологии, — объясняет Дмитрий Рябов, — заключается в том, что для разных принтеров под один и тот же материал нужно проводить некую оптимизацию. Проблема сертификации стоит ещё сложнее. Если в литейной отрасли мы, условно говоря, раз и навсегда сертифицируем производство проката, потом сертифицируем лист, то в аддитивном производстве надо сертифицировать конкретный порошок, да ещё в паре с конкретным принтером. А если ещё принтер одного производителя, но на нём, скажем, разные лазеры, то возникнут новые развилки требований. Ещё лет десять и придут к какой-то унификации или к понятным правилам сертификации. А пока российские и зарубежные эксперты аэрокосмической отрасли отмечают, что одна из



проблем применения, по крайней мере в аэрокосмической технике, это именно проблема сертификации. Вроде правила игры всем известны, но всегда есть какие-то нюансы».

### Миру нужны новые материалы

Рынок определил порошок Al10Mg как самый востребованный. Он первым был адаптирован под аддитивные технологии. «Он очень хороший, им быстро печатается, — рассказывает Дмитрий Рябов, — свойства такие же или даже лучше, чем у отливки, но проблема оптимизации массы деталей требует новых материалов. И поэтому в мире очень многие работают над новыми материалами на основе алюминия. Например, наш сплав PC 553 скандий-алюминий-магний — один из самых прочных из того, что есть, благодаря скандию. Такой сплав есть и в Европе, так называемый scalmalloy, но скандий по цене сопоставим с золотом, может, чуть дешевле. Мы в нашем сплаве снизили содержание скандия в два раза, и он стал в два раза дешевле при сопоставимых свойствах. Это практически 500 МПа, в то время как у Al10Mg прочность 300 МПа, то есть это другой уровень прочности, поэтому в каких-то применениях он может заменить титан. Порошок PC 970 спроектирован на других принципах. Это система легирования, которая классически не применяется для алюминия. Аддитивные технологии приоткрыли дверцу в некое пространство, в котором можно печатать такими материалами, которые вообще сложно получить, — они либо плохо легируются, либо плохо обрабатываются. Но мы нашли правильные компоненты, правильное соотношение, и уникальность сплава в том, что с повышением температуры он не теряет свои свойства. Для понимания: если взять обычный алюминиевый сплав и испытывать его при 100 градусах, то будем иметь около 80 процентов снижения прочности относительно той, что есть при комнатной температуре, а здесь мы имеем снижение только порядка 30%. Он очень стабильный. В этом мы видим большой потенциал, потому

что жаропрочность — очень важная характеристика, и алюминий избегают применять там, где есть нагрев, а следовательно, разупрочнение».

### Отработка экспериментальных формул

Предварительно смоделированный химический состав «овеществляют» в ИЛМиТ. Расплавляют чисто алюминиевую чушку и в строгом соответствии с технологией, в определенной очередности и с определенной температурой вводят в расплав все легирующие добавки, после чего отливают вторую заготовку. Этот слиток везут на площадку ИЛМиТ в Дмитрове, где на лабораторном атомайзере будет сделан порошок. Для экспериментов в принтере обычно достаточно 10 кг порошка, которые поступают в распоряжение Владимира Королёва. Полученный порошок имеет довольно широкий гранулометрический состав — от 1 до 250–300 микрон, и его подвергают двухстадийной обработке с целью получить нужную фракцию 10–63 микрон. «Сначала приготавливаем кубики, смотрим, чтобы в материале не было горячих трещин, чтобы там была минимальная пористость, и также измеряем твёрдость, чтобы хотя бы примерно понимать, что в итоге получится, — излагает последовательность действий Владимир Королёв. — В итоге выбираем оптимальный режим, он должен быть самым быстрым, укладываться в требования ТЗ по сплошности материала. Только после этого порошок поступает в принтер для изготовления образцов по подготовленной сетке режимов: разная мощность лазера, разная скорость, разная стратегия движения, полосами, квадратами, сплошная, штриховочка. Мы можем проводить более 40 видов испытаний на все виды свойств, которые интересуют реальных и потенциальных потребителей, — рассказывает Королёв. — Когда заказчик говорит, какой материал ему нужен, чаще всего он начинает с прочности, твёрдости и пластичности, а потом уже оговаривает специальные свойства — способность переносить циклические нагрузки, длительную прочность, ползучесть и другие. Далее идут такие



специфичные вещи, как коррозионная стойкость, восприимчивость к различным видам излучения. Может интересовать, например, ТКЛР — температурный коэффициент линейного расширения, что очень важно, например, для космонавтов, потому что в зависимости от того, находится корабль в тени или на солнце, перепады температуры могут быть от плюс 100 до минус 60 или от минус 100 до плюс 60. Если там два материала рядом, один другого касается, у них должен быть или одинаковый ТКЛР, или должно быть полное его отсутствие. В повседневной жизни такая характеристика нам не нужна, а для некоторых потребителей это критичное требование».

#### Всеу есть своя цена

При разработке формулы нового порошка в поле зрения присутствует вопрос цены. «Буквально 3–4 года назад килограмм алюминиевого порошка стоил около 300 евро, и его даже никто не рассматривал в качестве материала для изготовления каких-то деталей, потому что это экономически нецелесообразно, — рассказывает Роман Вахромов. — И когда была принята стратегия РУСАЛ по развитию порошкового производства, основной целью было снижение себестоимости порошка. Сейчас она составляет около 5 евро».

Разговоры о том, что аддитивная печать пока не может сравниться по точности с фрезерованием, Владимир Королёв называет палкой о двух концах: «Есть принтеры, у которых диаметр спота лазерного лу-

ча составляет 3–5–7 микрон. Для сравнения: у меня сейчас 80 микрон. Вот если у меня будет луч не 80, а 3 микрона, я буду получать точность не нынешние 50 микрон, а меньше микрона, но производительность процесса будет очень низкая. Если сейчас я печатаю, грубо говоря, 30 кубических сантиметров в час, то там я буду печатать 1 кубический миллиметр в час. Не великовата ли цена за соревнование с фрезерным стан-ком?»

#### Вместо эпилога

Космическая и авиационная промышленность, а также двигателестроение — вот потребители алюминиевых порошков. Для них важны прочность и лёгкость, которые могут обеспечить только аддитивные технологии. А на недавней конференции по использованию алюминия в аддитивном производстве Роман Вахромов назвал аддитивные технологии драйвером цифровой промышленности. На мой осторожный вопрос, не является ли это утверждение поэтическим преувеличением, Вахромов уверенно ответил: «Действительно драйвер. Потому что кроме АТ нет другого производства, которое позволяет создавать продукт, что называется, с пикселя».

Сдерживающими факторами продвижения алюминиевой печати были высокая стоимость материалов и оборудования. Со стоимостью материалов, выпускаемых в промышленных количествах, РУСАЛ справился. Теперь дело за производителями 3D-принтеров. ■

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ:  
ОТ 3D-ПЛАНИРОВАНИЯ ДО БИОПЕЧАТИ**

Научно-практическая конференция с международным участием  
Холидей ИНН Московские Ворота, Санкт-Петербург

**11 сентября 2020**

РНИИТО им. Р.Р. Вредена (Санкт-Петербург), ПИМУ, Ассоциация специалистов по 3D печати в медицине (Нижний Новгород) приглашают Вас принять участие в научном мероприятии основными вопросами которого будут: юридические аспекты и стандарты аддитивных технологий; чудеса 3D-визуализации; технологические аспекты 3D-печати; роль и место аддитивных технологий в медицине: реальные результаты.

**КОНТАКТЫ.** Научная программа: +7 (965) 073-38-81, Additivmed@yandex.ru, Денисов Алексей Олегович  
Сервис: ООО «Альта Астра», (812) 386-38-31, 386-38-32, www.altaastra.com, mailto: info@altaastra.com

# Кинематические системы перемещения печатающей головки 3D-принтера

И.С. Топубаров, А.А. Бутюшкова, ООО «Стереотек», info@ste3d.ru

При производстве различных функциональных изделий вроде деталей машин и элементов конструкций особо важное значение имеют вопросы обеспечения качества. Так, из-за послойного формирования печатного изделия на его поверхности образуются полосы. Лучше всего ступенчатый вид заметен на искривленных и изогнутых поверхностях. Он становится более выраженным по мере увеличения толщины слоя. Ступенчатость может никак не влиять на прочность печатаемого изделия, она чаще всего лишь увеличивает его шероховатость. Впрочем, если от изделия требуется не низкий уровень шероховатости сам по себе, а только внешний вид (например, если речь идет о корпусах приборов), можно прибегнуть к простой отделке наружных поверхностей. Значительные размерные погрешности и искажение формы изделий, которые могут быть допущены при печати, представляют гораздо большую проблему. В наиболее распространенных 3D-принтерах, работающих по технологии послойного наплавления (FFF, Fused Filament Fabrication), определяющее значение при этом имеют два основных фактора: температурная усадка материала и погрешность позиционирования.

Усадка печатного объекта обусловлена физикой процесса: расплавленный материал выдавливается на платформу слой за слоем и застывает в виде конечного изделия, а в процессе охлаждения от температуры плавления

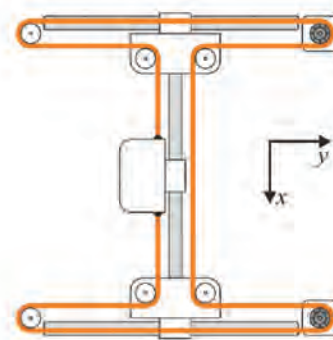
до комнатной как бы сжимаются. Разные материалы могут усаживаться сильнее или слабее, но этот процесс всегда имеет непредсказуемый характер. В ряде случаев можно предполагать, что усадка происходит равномерно во всех направлениях на определенный процент. На основе этого предположения в управляющую программу (G-код) могут быть внесены поправки, которые способны отчасти компенсировать погрешность усадки.

Не менее важную роль в обеспечении точности играет точность позиционирования рабочего органа оборудования, т.е. печатающей головки принтера.

К настоящему времени предложено множество вариантов построения системы перемещения печатающих головок 3D-принтеров, однако наибольшее распространение получили системы, основанные на ременных передачах. Это связано с тем, что нагрузка, действующая на печатающую головку в процессе работы, сравнительно невелика (в отличие от металлорежущих станков, в принтерах нет такого мощного возмущающего фактора, как силы резания), так что такие кинематические схемы обеспечивают достаточную жесткость. При этом они отличаются простотой, экономичностью и высокой скоростью перемещения, положительно влияющей на производительность. Однако на данный момент остаются малоизученными факторы, влияющие на точность позиционирования печатающей голов-

ки в таких системах. Отсутствуют практические рекомендации по выбору конфигурации кинематической схемы и зависимости погрешностей позиционирования от рабочих параметров (массы печатающей головки, размеров области построения, предварительного натяжения ремней, зазоров в подвижных соединениях и пр.) 3D-принтера.

Рис. 1. Кинематическая система перемещения H-Bot



Среди известных вариаций кинематических систем, основанных на ременных передачах, одной из наиболее распространенных является одноконтурная схема H-Bot. В ней единственный ремень расположен в виде буквы «H» и приводится в действие двумя двигателями (рис. 1). Малое количество подвижных элементов в этой схеме снижает инерционность, что положительно влияет на точность позиционирования. Также она повышается и благодаря тому, что при повороте двигателей на 1 шаг печатающая головка проходит линейное расстояние, равное половине шага. Однако в этой системе однонаправленное

вращение двигателей, необходимое для перемещения печатающей головки вдоль оси X, приводит к появлению разнонаправленных сил, вызывающих перекося поперечной направляющей относительно продольных. Неперпендикулярность направляющих приводит к появлению грубой погрешности формы конечного изделия — например, объект с прямоугольным сечением примет вид параллелограмма. Кроме того, от многократного цикла перекося выпрямления страдают крепления поперечной направляющей к продольным, снижается ресурс системы.

Рис. 2. Кинематическая система перемещения CoreXY

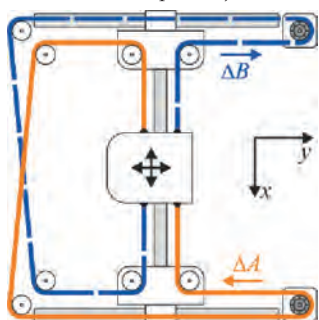


Рис. 3. Кинематическая система перемещения Markforged

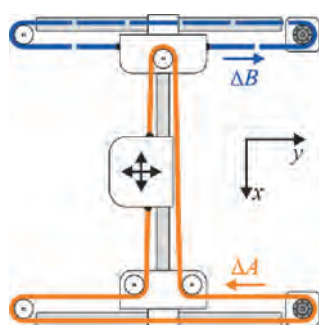
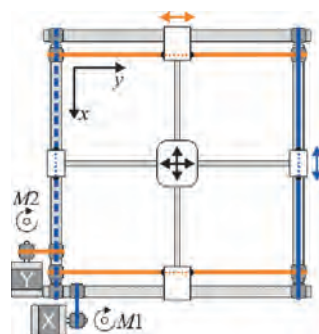


Рис. 4. Кинематическая система перемещения Ultimaker



Геометрическую перпендикулярность направляющих обеспечивает двухконтурная кинематическая схема, такая как схема CoreXY (рис. 2). В ней использование двух приводных ремней уравнивает воздействие на подвижные элементы, благодаря чему сохраняется их правильное геометрическое расположение. В системе используется больше обводных роликов, чем в системе H-Vot (на 2 больше). Однако в этой схеме возникает необходимость обеспечения равного предварительного натяжения обоих контуров. В случае, если один ремень натянут сильнее другого, при однонаправленном вращении двигателей так же, как и в схеме H-Vot, возникает пара сил, приложенных к поперечной направляющей. Появляющийся в результате момент сил поворачивает подвижный узел в плоскости XY, это вызывает нарушение перпендикулярности направляющих и также приводит к погрешности позиционирования и накапливающейся деформации элементов системы перемещения. Для исключения случаев пересечения ремней их контуры расположены в разных плоскостях — это приводит к дополнительным изгибающим моментам на каретке печатающей головки.

В сравнении с H-Vot двухконтурная система перемещения отличается меньшими значениями динамической погрешности, вызванной растяжением ремней при ускорении и торможении печатающей головки: наличие двух параллельных ремненных ветвей вдвое увеличивает жесткость этой колебательной системы.

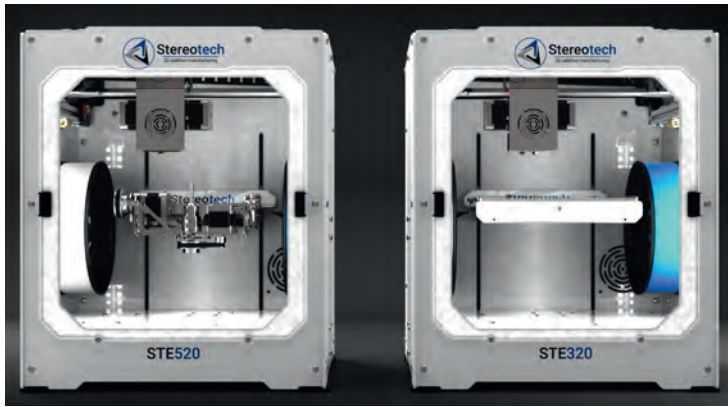
Еще одним вариантом кинематической схемы с неподвижным расположением двигателей является кинематика Markforged (рис. 3). Это устройство перемещения имеет два ремненных контура. Ремень первого контура закреплен с двух сторон каретки с помощью единого обводного ролика и выполняет функцию пере-

мещения головки вдоль оси X. Этот же контур приводится в движение и при перемещении вдоль оси Y, но в этом случае также приводится и ремень второго контура, закрепленный на подвижном узле. Несмотря на простоту, схема сочетает в себе недостатки обоих предыдущих схем — требует обеспечения равного натяжения ремней и при этом независимо от натяжения склонна к повороту подвижного узла при однонаправленном вращении двигателей. Эта схема не получила широкого использования среди производителей аддитивных установок.

Еще одной кинематической системой, в которой каждый двигатель отвечает за перемещение вдоль своей оси, является система Ultimaker. В ней печатающая головка приводится в движение поперечной направляющей, которая закреплена в поперечных блоках и скользит по центральной продольной направляющей, закрепленной в продольных блоках. Данная кинематическая схема имеет высокую жесткость конструкции и малую инерционность печатающей головки. Также система включает в себя кольцевые ремни замкнутого типа, что в теории должно обеспечивать равное натяжение ремней. Эти характеристики положительно влияют на точность позиционирования. Тем не менее схема чувствительна к начальной взаимной установке направляющих, погрешность их взаимного расположения отражается на форме печатных изделий подобно перекося подвижного узла в предыдущих системах. К недостаткам схемы Ultimaker можно отнести сложную реализацию и высокие требования к качеству компонентов линейных перемещений.

Существуют и другие системы перемещения с ремнными передачами, которые получили меньшее распространение из-за значительно большей сложности или большего количества недостатков.

Рис. 5. 3D-принтеры компании «Стереотек»: Stereotech 520, Stereotech 320



Компания «Стереотек» при производстве собственных 3D- и 5D-принтеров (Stereotech 320 и Stereotech 520 (рис. 5, 6) использует собственную запатентованную систему перемещения печатающей головки STE HeadMotion (рис. 6, 7).

Система перемещения печатающей головки включает одну поперечную и две продольные рельсовые направляющие. Продольные направляющие жестко закреплены на основании в направлении оси Y, поперечная направляющая расположена по оси X и соединяется с продольными через каретки. Перемещение печатающей головки происходит с помощью двух приводных ремней, как и в схеме CoreXY, для повышения жесткости приводной системы и снижения инерционной погрешности. Концы ремней закреплены с образованием двух связанных контуров на каретке печатающей головки. Симметричное расположение контуров компенсирует изгибающие моменты на подшипниках и направляющих подвижных узлов системы.

Для решения проблемы обеспечения равного натяжения ремней в контурах в устройство включен узел выравнивания сил натяжения. Он представляет собой рычаг с двумя роликами на концах (каждый из которых является частью отдельного контура), шарнирно закрепленный на основании с возможностью поворота в плоскости XY, и работает по принципу

качелей. При появлении разности сил натяжения в контурах рычаг поворачивается, ролики смещаются и оба контура возвращаются в состояние равновесия. Для гашения вибраций на концах рычага установлены демпферы (рис. 7, 8).

Два связанных контура ремней позволяют сохранить перпендикулярность поперечной и продольных направляющих — и таким образом сохранить правильность траекторий движения рабочего органа принтера. Подвижный узел с поперечной направляющей при этом выполнен в виде единого портала для повышения жесткости устройства, что также положительно отражается на точности позиционирования.

Двигатели закреплены на основании принтера для уменьшения массы подвижных частей и снижения инерционного момента. Их однонаправленное или разнонаправленное движение вызывает перемещение печатающей головки по оси X или Y соответственно; вращение каждого двигателя по отдельности перемещает головку по диагонали.

Каркасное основание устройства перемещения может быть выполнено из соединенных профилей, пластин и иных элементов, которые расположены параллельно и соединены поперечно между собой.

Таким образом, важными преимуществами кинематической системы STE HeadMotion являются, во-первых, выравнивание

Рис. 6. Общий вид 3D-принтера Stereotech 320 в корпусе без верхней крышки с кинематической системой STE HeadMotion

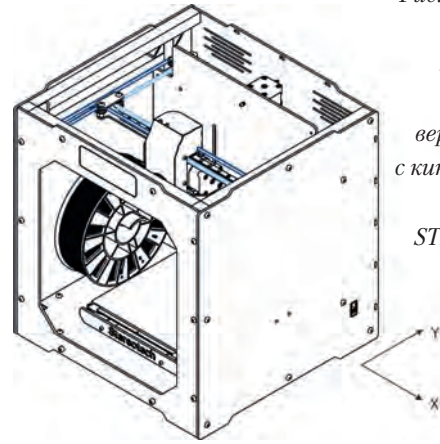


Рис. 7. Кинематическая система перемещения STE HeadMotion с узлом выравнивания сил натяжения

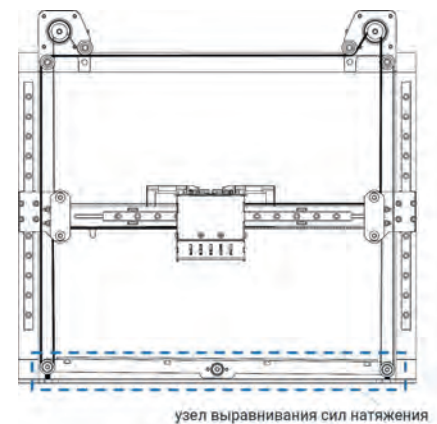
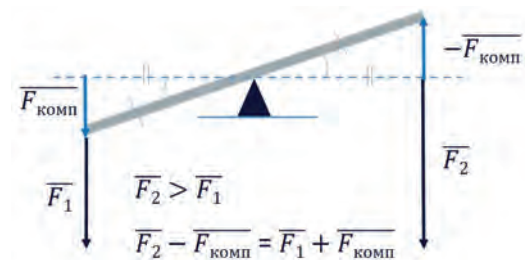


Рис. 8. Расчетная схема узла выравнивания сил натяжения



сил натяжения ремней на протяжении всего срока эксплуатации 3D-принтера для обеспечения плавности работы и постоянства рабочих характеристик, во-вторых, увеличение точности перемещения печатающей головки, в-третьих, увеличение ресурса работы 3D-принтера. Устройство является универсальным для двух моделей принтеров: Stereotech 320 и Stereotech 520, в котором используется инновационная технология 5D Additive Manufacturing. ■

# Оборудование для аддитивного производства

В.В. Константинов, Ю.А. Соколов

В статье рассмотрены вопросы организации аддитивного производства. Стратифицированное представление аддитивного производства позволяет раскрыть взаимодействие разнородных по своей природе уровней и межуровневых связей, имеющих различные интерфейсы. Приведена иерархическая абстракция, состоящая из технологической, инструментальной, измерительной, информационной, алгоритмической, системной страт. Приведено оборудование для получения порошка и реализации технологии селективного лазерного синтеза изделий.

## Введение

Под аддитивным производством (additive manufacturing) понимается процесс изготовления деталей, основанный на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства и традиционного формообразующего производства [6, 7]. В данном определении следует «распредметить» [2] несколько важных понятий, которые существенно отличают аддитивное производство (АП). Прежде всего, это изготовление изделия исключительно по цифровой 3D-модели, разработанной в среде CAD-системы. Следовательно, использование современных компьютерных аппаратных и программных средств обязательно. Впервые настолько ясно основная функция в технологии отведена именно программной составляющей (компьютерное моделирование деталей, полигонизация/триангуляция, разбиение модели по слоям, деление площади слоя на ячейки спекания/сплавания и др.). Следует также отметить, что наряду с принципом «слой за слоем», в стандарте допускается использование иных подходов к синтезу изделий. Отличительной чертой АП является неразрывность и целостность всего процесса от проектирования изделия до ее изготовления, что позволяет сократить ряд технологических операций.

Оборудование для реализации аддитивных процессов является программируемым и имеет много общего с технологиями обработки изделий на станках с числовым программным управлением. Современная технологическая система АП (additive manufacturing system) включает установку АП и вспомогательное оборудование [6]. В свою очередь, установка АП (AM

machine), представляющая собой часть системы АП, включает в себя аппаратную часть, программное обеспечение для настройки и контроля установки, а также периферийные приспособления, используемые для обслуживания установки [6].

## Иерархическое представление АП

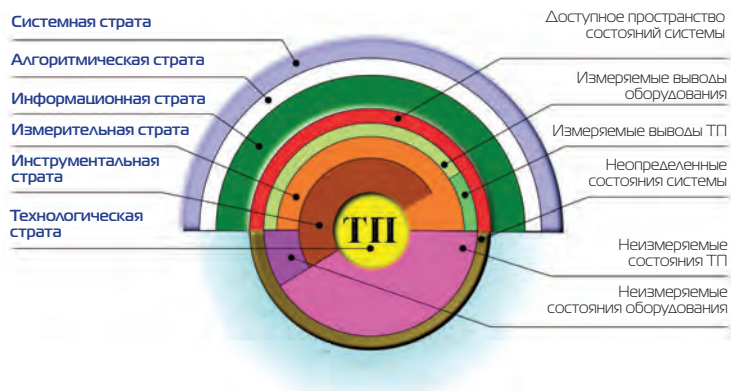
Аддитивное производство можно рассматривать как сложную производственную систему, к характерным особенностям которой относятся: многокритериальность оценок процессов, разнородность и семиотическая природа информационных связей между подсистемами и элементами; многообразие различных форм связей. В основу организации производства положена ее системная архитектура, которая определяет не только структуру и поведение системы, но и пользовательские свойства, функциональность, производительность, гибкость, экономические показатели.

Теория иерархических систем [8] облегчает раскрытие внутренних закономерностей АП, позволяет выявить различные способы ее декомпозиции в виде иерархий абстрагирования, организации и сложности принятия решений. В работе [1] сложная система представляется в виде многоуровневой иерархической структуры, которая характеризуется последовательным вертикальным расположением подсистем, приоритетом действий подсистем верхнего уровня, зависимостью действий подсистем верхнего уровня от фактического исполнения нижними уровнями своих функций. Стратифицированное описание АП включает семейство моделей на каждом абстрактном уровне (страте). При этом каждая страта определяется собственными законами, переменными и т. д.

Для абстрактного представления АП введем следующие страты: системную, алгоритмическую, информационную, измерительную, инструментальную и технологическую (рис. 1).

**Технологическая страта.** Под технологическим процессом (ТП) понимается часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и/или определению состояния предмета труда [4]. АП — многомерный объект управления с векторными входами и выходами измеряемых и неизмеряемых параметров. На уровне технологической страты АП протекают все базовые динамиче-

Рис. 1. Иерархическая декомпозиция аддитивного производства



ские процессы синтеза изделий. Основной задачей на данном уровне является анализ закономерностей протекания элементарных технологических операций (ТО).

**Инструментальная страта.** На инструментальной страте рассматривается аппаратное обеспечение для выполнения ТО. Элементами подсистемы, соответствующей инструментальной страте, являются элементы установки АП, к которым в зависимости от метода формирования слоя и вида концентрированного потока энергии можно отнести рабочую камеру, разнородные источники питания, роботизированные комплексы, электромеханические исполнительные механизмы, вакуумные станции, блоки подготовки контролируемой инертной среды, сопловые устройства, узлы водяного охлаждения и др.

**Измерительная страта.** На измерительной страте рассматриваются функции очувствления состояния ТП и установки АП. Элементами измерительной страты, образующими интерфейс между подсистемами технологической и информационной страт, являются видекамеры, электронные приборы и нормализаторы, фотодатчики положения исполнительных механизмов установки, расходомеры, датчики давления и воды, преобразователи, реле, различные средства измерительной техники и др. Общее пространство состояний включает векторы переменных ТП и установки АП.

**Информационная страта.** На информационной страте рассматривается множество взаимосвязанных и взаимодействующих элементов управления, выполняющих самостоятельные и общесистемные функции управления и передачи данных. Элементами информационной страты являются оборудование вычислительных цифровых сетей, промышленные компьютеры (ПК), программируемые логические контроллеры (ПЛК), устройства числового программного управления, микропроцессорные и другие аналогичные устройства.

**Алгоритмическая страта.** Алгоритмический уровень объединяет в себе общие алгоритмы управле-

ния, математические модели (ММ), технологические карты процесса синтеза изделий. Согласно ГОСТ 34.003–90, под алгоритмом понимается задание условий и последовательность действий компонентов системы при выполнении ею своих функций [5]. Элементами данной страты являются алгоритмы управления, записанные в виде программ на алгоритмических языках в памяти микропроцессорных устройств.

**Системная страта.** На системной страте рассматриваются задачи оценки качества моделей на нижестоящих уровнях с учетом основных структурных и параметрических характеристик, общие комплексные вопросы, определяется методика оптимизации параметров процесса на базе векторного критерия. На данной страте анализируются все технические и экономические вопросы, задаются проектные ограничения. Системная страта, подобно кровеносной системе биологического организма, обеспечивает коммуникационные процессы всех разнородных страт АП для достижения главной задачи: получения изделия заданных размеров и свойств.

Особенностью современного этапа развития АП является усиление взаимодействия алгоритмической, информационной, системной и измерительной страт, значение которых неуклонно растет. Расширение и дополнение функций связано с использованием математических и алгоритмических основ искусственного интеллекта.

#### Оборудование для реализации аддитивных технологий

Разрабатываемое и производимое ПАО «Электромеханика» технологическое оборудование позволяет создавать автономные производственные комплексы. Организация их систем управления предполагает интеграцию в промышленные структуры, реализованные в парадигмах концепции Индустрии 4.0 с полным сопровождением жизненного цикла технологического оборудования

#### Установка для получения порошка

В качестве исходного сырья в процессах селективного синтеза изделий используются порошки, под которыми понимают сыпучие материалы с характерным размером частиц до 100 мкм. Аддитивные технологии предъявляют особые требования к металлическим порошкам (однородный химический состав, насыпная плотность, форма и распределение размеров частиц). Важным условием использования порошка является его текучесть, поскольку технология селективного спекания/сплавания предусматривает распределение порошка по поверхности.

Общим требованием к порошкам является шаровидная форма частиц. Такие частицы более компактно укладываются в определенный объем, а также

обеспечивают текучесть порошковой композиции в системах подачи материала с минимальным сопротивлением. Если порошок имеет слишком малый размер частиц, то в процессе построения легкие частицы будут вылетать из зоны расплава, что приведет к повышенной шероховатости детали и микропористости.

Структура, технологические и эксплуатационные свойства порошковых и композиционных материалов определяются на этапах получения порошков, послойного синтеза или компактирования. В общем случае на изменение плотности и свойств порошковых изделий влияют величина и форма частиц, состояние их поверхности, химический состав, степень несовершенства кристаллического строения порошка и другие факторы. Посредством варьирования технологических параметров в процессе распыления можно изменять средний размер частиц, гранулометрический состав порошка, морфологию частиц, их химический состав и структуру.

В промышленности используются различные методы, обеспечивающие получение порошка: плазменное распыление быстровращающейся заготовки, распыление с вращающимся тиглем, газоструйное распыление, распыление растворенным водородом и др. Одним из наиболее распространенных является метод PREP (плазменное центробежное распыление вращающейся заготовки), к преимуществам которого относится получение плотных безгазовых частиц шаровидной формы.

Для получения порошка методом PREP в ПАО «Электромеханика» разработан целый ряд оборудования типа «УЦР», «УЦРТ», «Гранула», отличающегося как конструктивными решениями, так и уровнем автоматизации технологического процесса.

Особенностью конструкционного решения установки является возможность непрерывного распыления десятков заготовок за счет непрерывной подачи заготовок из загрузочного устройства в блок приво-

дов. Партия специально подготовленных заготовок загружается в накопитель и устанавливается в загрузочное устройство, из которого заготовки поочередно через разделитель подаются в блок приводов. Узел вращения заготовки выполнен на двух опорных вращающихся барабанах. Удержание вращающейся заготовки на барабанах осуществляется прижимным роликом специальной конструкции, компенсирующей вибрации. Вращающаяся заготовка подается в камеру распыления, где в ее торце образуется тонкая жидкая пленка вследствие нагрева плазменной струей. Капли расплава, оторвавшиеся от вращающейся заготовки, перемещаясь в инертной среде, образуют частицы, которые из камеры распыления перемещаются в приемный бункер.

Технология получения порошка имеет следующие стадии:

- создание вакуума в камере распыления;
- заполнение объема камеры распыления смесью аргона и гелия;
- загрузка на барабаны заготовки;
- прижим заготовки к барабанам роликом;
- разгон заготовки до рабочей частоты вращения;
- включение плазмотрона;
- задание рабочего зазора между торцом заготовки и плазмотроном;
- начало процесса распыления;
- продольное перемещение распыляемой заготовки;
- контроль длины огарка;
- остановка вращения заготовки;
- сброс огарка.

Установки типа «Гранула» обеспечивают получение порошка крупностью 20–70 микрон с низким содержанием газовых элементов для реализации аддитивных технологий и газостатической обработки; широкий диапазон получаемых порошков различного химического состава (жаропрочные никелевые сплавы, титан, молибден, интерметаллиды и др.).

Рис. 2. Установка «Гранула» для получения порошка методом PREP



Рис. 3. Пульт оператора установки «Гранула», реализованный на базе компьютера



При проектировании установки «Гранула-2500» реализован целый ряд новых конструкторских решений:

- привод вращения обеспечивает максимальную частоту вращения заготовки до 30000 об/мин и 43600 об/мин при диаметрах заготовки соответственно 80 мм и 55 мм;
- увеличен диаметр камеры распыления и, следовательно, длина полета частиц;
- обеспечивается широкий диапазон скорости перемещения заготовки в продольном направлении;
- разработан двухрычажный механизм прижимного ролика с амортизирующей пружиной;
- поддержание зазора между плазмотроном и торцом заготовки выполняется в автоматическом режиме.

Установка «Гранула-2500» (рис. 2) имеет следующие основные узлы: камеру распыления, блок приводов, устройство загрузочное, энергетический комплекс (плазмотрон и источник питания), вакуумную станцию, газовый блок, систему водяного охлаждения, систему управления.

Формирование порошка осуществляется в камере распыления, в торце которой расположена откатная дверь. На откатной двери устанавливаются плазмотрон и механизмы его перемещения для поддержания рабочего зазора и эксцентриситета относительно оси заготовки. С другой стороны камеры распыления находится блок приводов, внутри которого расположены барабаны с электроприводом и механизм передвижения заготовки.

Автоматизация ТП получения порошка методом PREP на базе современных вычислительных средств

открывает новые возможности управления. С развитием микропроцессорных устройств и локальных вычислительных сетей появилась возможность создания целостных технологических систем обработки данных ТП.

В составе системы установки типа «Гранула» применяется блок оптического измерения зазора между торцом заготовки и плазмотроном. Оптическая камера, направленная в область распыления, обрабатывает сигналы, пропорциональные энергии излучения, и передает по цифровому протоколу информацию в компьютер (рис. 3).

На компьютере выполняется обработка полученных данных, осуществляется визуализация зазора с учетом расстояния и пропускной способности стекла иллюминатора. Использование видеокамеры позволяет компенсировать недостатки априорной технологии получения порошка с заранее заданными значениями параметров процесса.

Контур автоматизированного управления предполагает наличие измерительного канала (рис. 4а) выходной переменной процесса. В качестве стабилизируемой выходной переменной рассматривается зазор  $S(t)$  между торцами распыляемой заготовки и плазмотрона. Среди множества всех состояний технологических процессов, на которые можно воздействовать, в данном контексте следует ограничиться: скоростью продольной подачи заготовки  $V(t)$ , частотой вращения заготовки  $n(t)$ , вертикально-поперечными перемещениями плазмотрона, энергетическими параметрами плазмотрона. Перечисленные переменные состояния могут управляться как вручную, так и автоматически

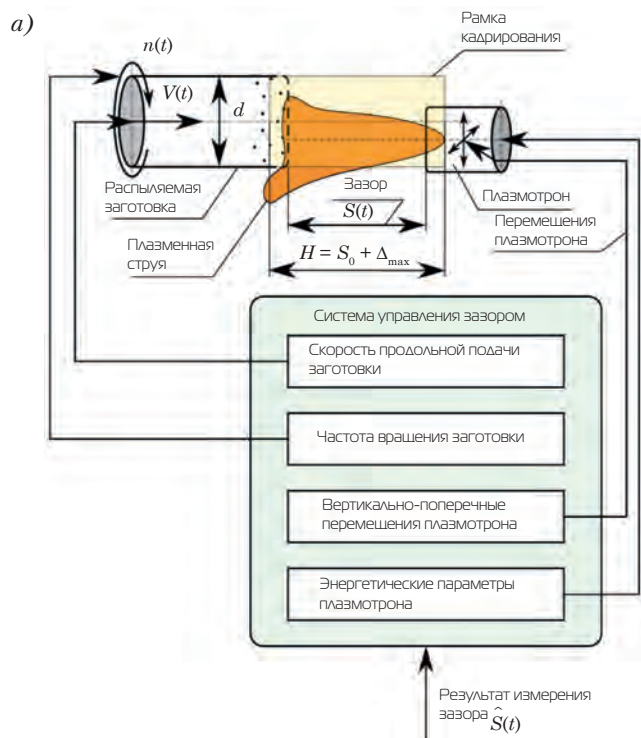
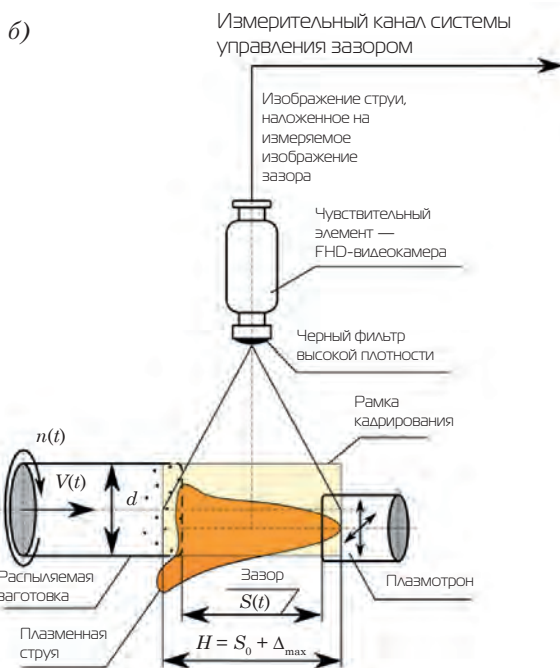


Рис. 4. Структура устройства управления зазором (а) и формирование измерительного канала (б)





с помощью системы управления зазором, содержащей контуры управления скоростью продольной подачи заготовки, частотой вращения заготовки, вертикально-поперечными перемещениями плазмотрона, энергетическими параметрами плазмотрона.

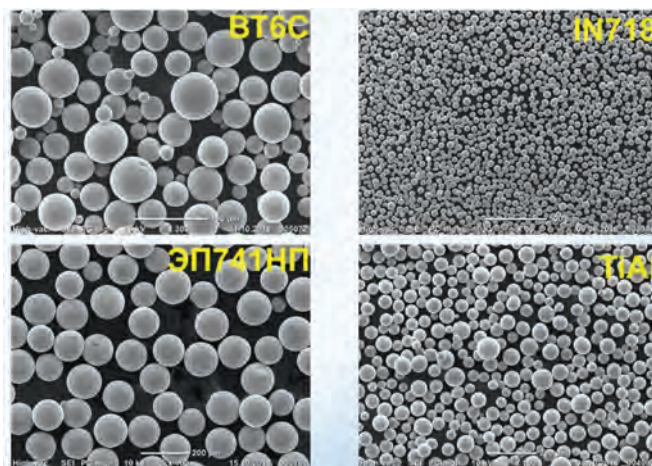
Сложность реализации измерительного канала для определения зазора заключается в необходимости использования бесконтактного способа измерения, поскольку объект измерения помещен в вакуумную камеру. Измеряемое значение зазора является быстро изменяющейся случайной функцией времени, а наибольшую сложность представляет уровень помехи, которая обусловлена наличием плазменной струи, практически скрывающей объект измерения. Кроме того, плазменная струя является очень ярким источником излучения, случайно изменяющим свою форму и яркость. Контур зазора случайным образом проявляется под завесой плазменной струи. Необходимо выделить изображение зазора, отфильтровав завесу плазменной струи, с последующим измерением его геометрического размера методом сравнения с калиброванной измерительной шкалой координатной сетки.

Поставленная задача достигается тем, что для измерения зазора в плазменной струе между плазмотроном и заготовкой в производстве металлических порошков используют видеосъемку процесса плавления заготовки цифровой цветной FHD-видеокамерой с черным фильтром высокой плотности, передачу изображения на ЭВМ, при этом полученное цифровое изображение подвергается операциям исключения засветок, бликов и избыточности посредством цифрового кадрирования, фильтрации синего и интерактивного формирования полихромного цифрового профиля, последующего преобразования в изображение в градациях серого, бинаризации с заданным порогом, выделения информативной области черно-белого изображения по максимуму плотности пиксельного горизонтального заполнения в продольно-вертикальной плоскости и сравнения со шкалой измерительной калиброванной размерной сетки; минимизацию случайных погрешностей результата измерений посредством накопления выборки измерений с последующей оценкой среднего значения величины зазора и дисперсии.

Интенсивность распыления заготовки зависит от требований к параметрам технологического процесса. Контур управления скоростью продольной подачи заготовки должен обеспечивать постоянство значения зазора  $S(t)$  между плазмотроном и заготовкой в плазменной струе. Измерительный канал реализован аппаратно-программными средствами, взаимодействие которых показано на рис. 4б.

Программно-аппаратные средства системы управления позволяют реализовать режим «Обучение», при

Рис. 5. Внешний вид порошка сплавов на основе титана, никеля и интерметаллидов (фотографии выполнены на электронном микроскопе) ВТ6 С (а), IN718 (б), ЭП741 НП (в), TiAl (г)



котором с заданной периодичностью обеспечивается определение и запись в энергонезависимую память параметров ТП. Тем самым формируется управляющая программа непосредственно в ходе ручного или автоматизированного управления под управлением опытным оператором. Процесс подготовки управляющей программы в этом случае упрощается и занимает значительно меньшее время.

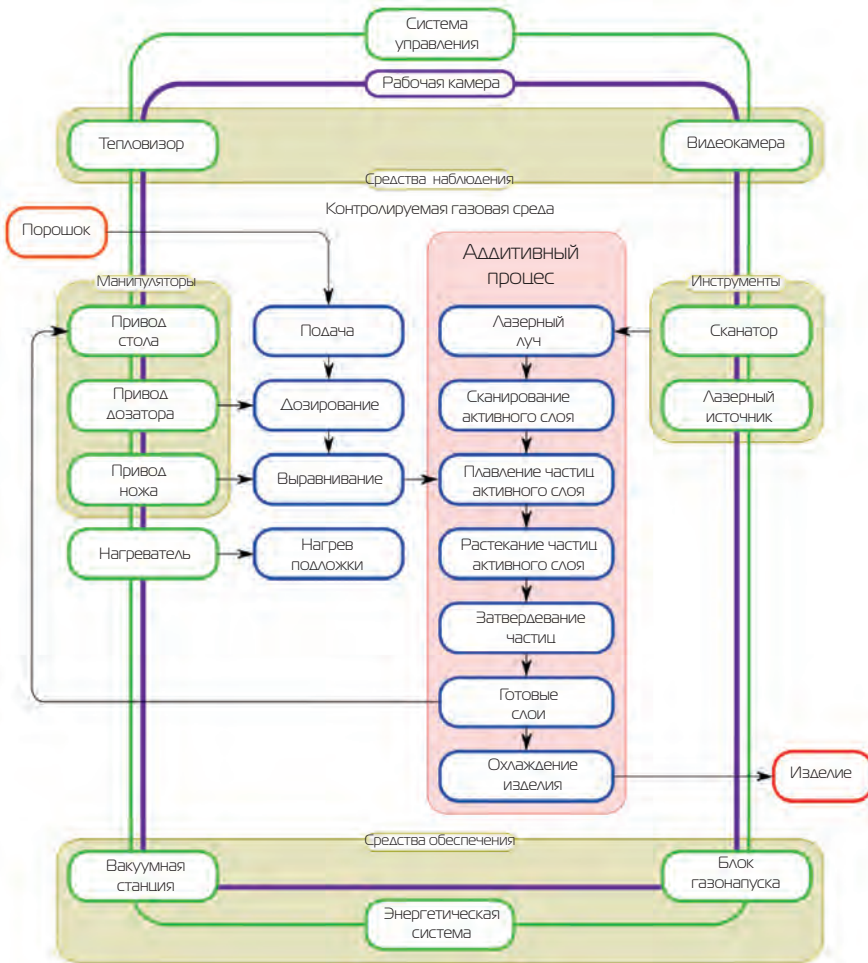
На установке типа «Гранула-2500» были получены порошки из жаропрочных сплавов на никелевой основе марок ЭП741 НП, ЭП962 П, ЭИ698 П, ЭП962 НП, ЭП975 П, Inconel 625М и другие, титановые сплавы, интерметаллиды TiAl, молибден (рис. 5).

#### Установка для синтеза изделий по технологии селективного лазерного сплавления

Процесс синтеза изделий по технологии селективного лазерного сплавления (Selective Laser Melting, SLM) выполняется циклически посредством повторения отдельных технологических операций: подача дозированного количества металлического порошка; выравнивание слоя порошка на подложке: горизонтальное перемещение каретки с ножами; обработка поверхности лазерным пучком по заданному алгоритму; перемещение подложки вниз на толщину слоя. Концептуальная модель селективного синтеза изделий включает семейство математических моделей (ММ), описывающих различные физические процессы: лазерное излучение, взаимодействие лазерного пучка с подложкой, сканирование пучка, плавление активного слоя порошка в инертной среде, растекание частиц по поверхности подложки, затвердевание частиц, охлаждение изделия в контролируемой инертной среде и др.

Концептуальная модель установки для синтеза изделий методом SLM включает в себя следующие

Рис. 6. Схема аддитивного производства методом селективного лазерного сплавления



основные элементы: рабочую камеру, энергетический комплекс (лазерный источник и сканатор), дозатор порошка, строительную платформу, вакуумную станцию, блок подачи газа, систему управления, узел охлаждения (рис. 6).

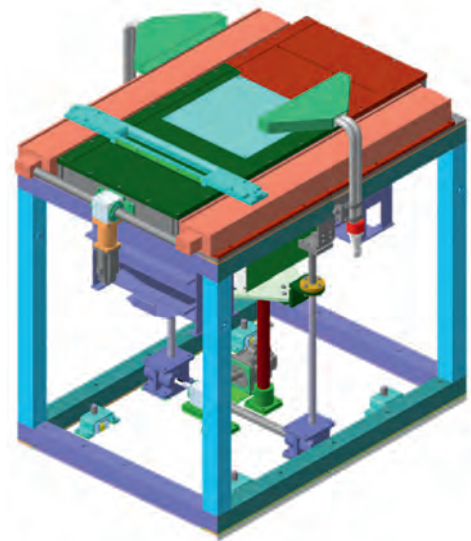
Декомпозиция АП методом SLM позволяет выделить основные группы взаимосвязанных задач, определить семейство ММ, предложить эффективные методы их численной реализации, выявить основные закономерности ТП. Общая модель разделяется на семейство моделей, что позволяет описать операции процесса, прогнозировать значения неизмеряемых параметров ТП в реальном масштабе времени (скорость плавления порошка, скорость кристаллизации материала частиц, время растекания частиц и др.), выбрать значения конструктивных и энергетических параметров установки.

Установка «СЛС-1» (рис. 7) производства ПАО «Электромеханика» предназначена для производства сложнопрофильных объемных изделий по технологии селективного послойного лазерного спекания металлических порошковых материалов на основе титановых, никелевых и других сплавов. Для формирования лазерного излучения используется иттербиевый волоконный комплекс (мощность 1000 Вт). Высокоскоростное отклонение осуществляется поворотным зеркалом с прецизионными гальванометрическими сканерами и температурной компенсацией.

Рис. 7. Установка «СЛС-1» для реализации технологии SLM



Рис. 8. Стол установки «СЛС-1»



Стол представляет собой силовую конструкцию для выполнения технологических переходов. В состав стола обычно входят следующие узлы: несущий каркас; бункер-дозатор; механизмы дозированной подачи порошка, выравнивания с набором ножей, вертикального перемещения подложки (рис. 8).

Рабочая камера представляет собой замкнутый объем, предназначенный для создания контролируемой среды; размещения стола, исполнительных механизмов, инфракрасных нагревателей, бункера-дозатора, электрической разводки, технологической оснастки. На потолоч-

ной части рабочей камеры расположены сканатор энергетического комплекса, видеокамера, освещение.

Вакуумная станция установки обеспечивает предварительное разряжение в рабочей камере. Низковакуумный режим откачки воздуха из рабочей камеры выполняется по двухступенчатой схеме: механический насос и двухроторный насос Рутса.

Блок напуска инертного газа обеспечивает заполнение рабочей камеры аргоном после предварительного разрежения. Напуск осуществляется из газовых баллонов. Во время работы осуществляется постоянная прокачка аргона для охлаждения газовой среды и удаления продуктов испарения. Система очистки газа включает: рампу напуска газа, устройство для фильтрации газа, воздухоудку для подачи и охлаждения газа.

Ключевым преимуществом АП является обеспечение максимальной свободы конструирования и изготовления изделия непосредственно по цифровой 3D-модели изделия. Аддитивные технологии предоставляют уникальную возможность изготавливать и воспроизводить сложнейшие пространственные формы, объекты, инженерные конструкции и механизмы широкого спектра технического назначения. При этом отсутствует необходимость в технологической оснастке. Основой для реализации преимуществ АТ являются процедуры численной оптимизации изделий. Методология такой оптимизации обуславливается конкретными показателями, видом соответствующей задачи и осуществляется посредством применения методов математического моделирования и различными программными комплексами. ■

#### Литература

1. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева, В.Г. Митрофанова. М.: Машиностроение, 1986. 256 с.
2. Богин Г.И. Обретение способности понимать: Введение в филологическую герменевтику. Тверь, 2001. 126 с.
3. Внедрение и развитие Индустрии 4.0. Основы, моделирование и примеры из практики. Под ред. Армина Рота. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. 294 с.
4. ГОСТ 3.1109–82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. М.: Изд-во стандартов, 1982. 14 с.
5. ГОСТ 34.003–90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 14 с.
6. ГОСТ Р 2.0.182–1.001.16. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 22 с.
7. ГОСТ Р 2.0.182–1.002.16. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2017. 14 с.
8. Месаревич М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
9. Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Издательство «Э», 2018. 208 с.

# METAL 3D

аддитивная сеть

## metal3d.ru

1-я онлайн-конференция

# «ЦИФРОВАЯ ЛИТЕЙКА»

Применение 3D-технологий в литейной промышленности

10-11 июня 2020

ОРГАНИЗАТОРЫ  
МЕРОПРИЯТИЯ:



**РУСАТОМ**  
аддитивные технологии

**i3D**  
3D - INTEGRATION



# Уникальные особенности и преимущества томографов Werth

Компания Werth была основана в 1951 году и специализируется на производстве оптических высокоточных мультисенсорных координатно-измерительных машин (КИМ) и томографов.

Компания всегда в своей работе основное внимание уделяла работе с изображениями, их оцифровке и алгоритмам обработки. **Werth** уже порядка **40 лет** тому назад разработал и запатентовал уникальный алгоритм обработки изображений **Werth IP**, который нашел свое применение и в работе оптического датчика в классических мультисенсорных КИМ, и в томографах! Суть метода заключается в том, что реальный контур детали строится по дополнительно, более точному **подпиксельному** (субвоксельному в случае с томографом) **контур**у, что позволяет значительно более точно определять границы детали (переход воздух–деталь), а значит, и измерять с меньшей погрешностью. Итак, данный метод нашел свое применение и показал на практике свою пригодность

и в КИМ, и в томографах, потому что и в первом, и во втором случае мы имеем дело с изображениями, которые нужно получить, оцифровать и точно измерить, отличие только лишь в том, что получены они разными датчиками.

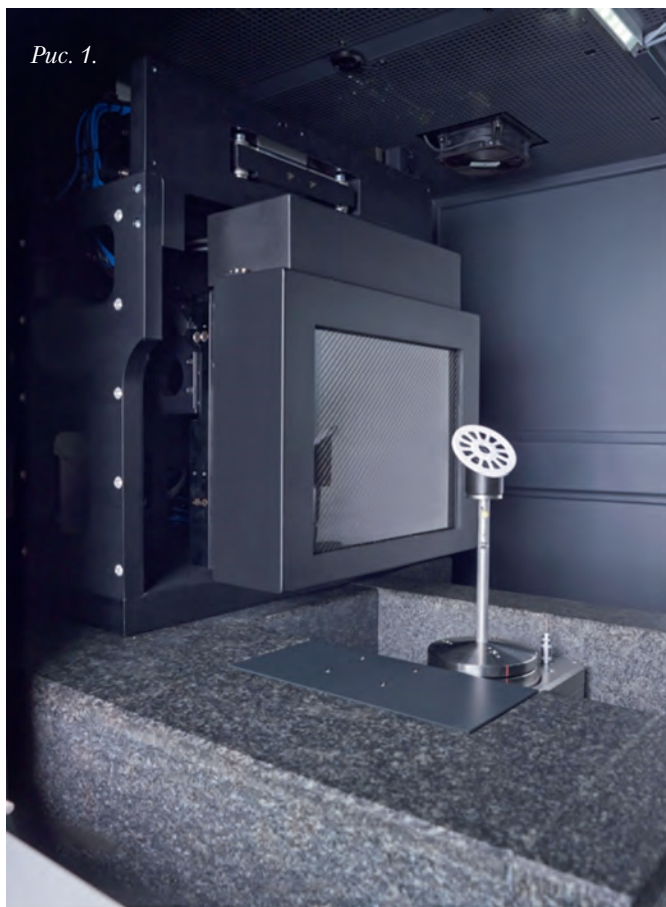
Алгоритм обработки изображения — это только один из определяющих моментов, влияющих на погрешность измерения. Что еще определяет качество и точность измерения? Это, конечно, база машины! Компания **Werth** предлагает: **гранитное основание** (рис. 1) в базе всех машин, конструкция томографа — это **классическая КИМ** с рентгеновским датчиком, томографы **Werth калибруются и настраиваются по калибровочным эталонам КИМ** (ступенчатые меры, штриховая мера длины, KobaStep и пр.), **отсчетные шкалы от КИМ с разрешением 0,1 мкм (опционально 0,01 мкм), поворотная ось на воздушных подшипниках и пр.**

Выделение субвокселей используется в момент расчета STL-модели (облака точек) из реконструированного, т.е. так называемого живого рентгеновского изображения. И здесь в работу уже вступает программное обеспечение **WinWerth — метрологическое ПО**, используемое также в классических КИМ.

**WinWerth — это единый модуль**, который включает в себя управление машиной, всеми ее датчиками, настройками рентгеновского датчика, написанием программы, обработкой и анализом собранных данных вплоть до формирования протокола. **Все операции происходят в одном софте**, без переноса данных, дополнительных конвертаций, потерь данных и времени.

Еще одним важным моментом является то, что во время сканирования детали в рентгеновском излучении собирается и сохраняется огромное количество данных, требующих последующей обработки и оцифровки. Работать с такими данными трудозатратно даже для современных компьютеров и занимает много времени. Чтобы сократить время на анализ, компания **Werth** в своем ПО реализовала **алгоритм параллельной обработки данных**, т.е. реконструкция объемного 3D-изображения детали происходит параллельно сбору самих отдельных изображений, во время сканирования детали. **По окончании сканирования мы имеем готовое 3D-реконструированное изображение детали** (рис. 2).

Рис. 1.



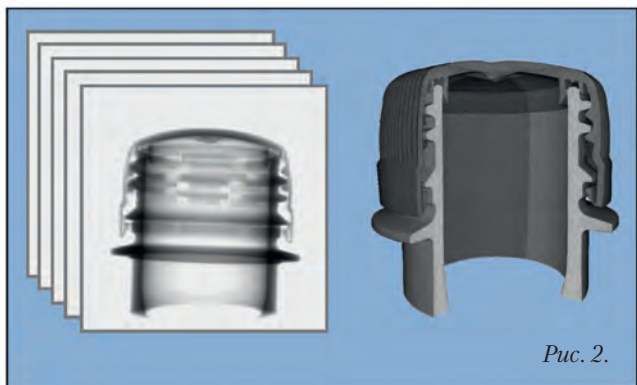


Рис. 2.

Поскольку все операции выполняются в одном ПО и используются методы работы с изображениями те же, что и в оптике, то значит, есть возможность **проводить прямые измерения** не только на STL-модели, но и на **реконструированном живом изображении с возможностью использования фильтров (как в оптическом датчике) и построении любых сечений** (рис. 3).

Рис. 3. Использование фильтра белого (повышение контрастности)



Если говорить о погрешности, то в спецификации томографов **Werth** можно увидеть следующие значения: **MPE E: 4,5 + L/75 мкм** — для серии томографов **TomoScore** и **MPE E: 2,5 + L/150 мкм** — для томографов серии **TomoCheck**. Данная погрешность — более чем наглядный показатель отлаженной и точной работы всей системы томографа в целом. Погрешность подтверждается на эталоне типа «лес щупов» (рис. 4).

**Отличительной особенностью является то, что компания Werth указывает погрешность MPE E, а не SD.** MPE E и SD отличаются тем, что первый включает в себя не только погрешность измерения межцентровых расстояний сфер, но и погрешность измерения диаметра самих сфер, в отличие от SD, где учитывается только погрешность измерения межцентровых расстояний сфер, что само по себе



Рис. 4.

является более простым, упрощенным методом, а потому дает более «красивые» цифры, к примеру, **SD** для серии **TomoScore** составляет **3,5 + L/100 мкм!**

**Все томографы Werth МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ,** а не только инспекционные системы для поиска дефектов!

**Werth сам проектирует и разрабатывает свои трубки с ориентацией на метрологию** и заказывают их производство у таких известных производителей, как **Hamamatsu** и **Viscom**. Основной упор компания делает на трубки **с мишенью проходящего типа**, которые обеспечивают получение лучшего разрешения и высокую производительность, что снижает время измерения (см. таблицу ниже). **Только у WERTH есть трубка с мишенью проходящего типа напряжением 300 кВ и мощностью 80 Вт (180 кВ и 20 Вт у других производителей)!**

**Пояснение к таблице:** при равной мощности двух типов трубок (с мишенью отраженного и проходящего типа) — 80 Вт мы имеем равное время измерения в 2 минуты, **НО** размер фокального пятна при этом у «отраженной» трубки будет существенно больше, а значит, и хуже разрешение конечного изображения > больше воксель! Если размер фокальных пятен приравнять (в таблице 16 мкм), то на «отраженной» трубке **упадет мощность и значительно ВЫРАСТЕТ время измерения.**

Все эти методы и уникальные особенности делают томографы **Werth** самыми точными томографами в мире и позволяют решать самые разнообразные измерительные задачи. ■

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

	Мощность	Фокальное пятно	Время измерения	Мощность	Фокальное пятно	Время измерения
Трубка с мишенью проходящего типа	80 Вт	16 мкм	2 мин	80 Вт	16 мкм	2 мин
Трубка с мишенью отраженного типа	80 Вт	80 мкм	2 мин	16 Вт	16 мкм	10 мин

# Микроразмерная аддитивная наплавка металлических порошков импульсным лазерным излучением

А.А. Гусев, к.т.н., Самарский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН), г. Самара, Россия (gusev\_aa@fian.smr.ru)  
М.А. Гусева, к.т.н.

Изготовление функциональных объемных изделий в миллиметровом и менее размерном диапазоне, необходимых для медицины, радиоэлектроники и других отраслей экономики, является актуальной и нерешенной технической проблемой [1]. Для решения этой задачи наиболее перспективным представляется процесс выплавки объемных изделий из металлического порошка импульсным лазерным излучением.

Преимущества плавления импульсным лазерным излучением:

– высокая локальность расплава, что позволяет в теории получать изделия размером порядка длины волны излучения (1 мкм) при условии использования наноразмерных порошков металла;

– сравнительно низкая средняя мощность излучения, что исключает высокую температуру в объеме и, как следствие, обеспе-

чивает высокое разрешение формы выплавляемых миниатюрных изделий.

Однако этими преимуществами невозможно воспользоваться из-за высокой плотности мощности излучения в импульсе, сверхбыстрого разогрева порошка и, как следствие, разлета частиц порошка из зоны облучения. Поэтому все технологии импульсной наплавки порошков используют предварительное закрепление порошка на поверхности за счет клея, эмульсии, связующих синтетических компонентов и т.п. В результате расплав имеет высокую пористость, большое количество неметаллических примесей, низкую адгезию и, как следствие, низкое качество наплавленного слоя металла. Для качественной наплавки чистых порошков и выплавки целых изделий используют непрерывное лазерное излучение [2]. Однако при таком

воздействии размер зоны плавления порошка из-за объемной температуры значительно превышает размер зоны облучения (на порядок), что не позволяет использовать непрерывное излучение для выплавки миниатюрных изделий.

Целью работы являлся поиск режимов и условий плавления чистого порошка импульсным лазерным излучением для получения высококачественной литой структуры наплавленного металла. В эксперименте по сплавлению металлического порошка чистого Ni использовалась YAG-Nd-лазерная установка с перестраиваемой формой импульса излучения [3]. Экспериментальное сплавление порошка проводилось для двух форм импульса излучения (рис. 1, рис. 2) со следующими параметрами:

$$E_{\text{им}}^{\text{ср}} = 3 \text{ Дж}, \tau_{\text{им}} = 15 \text{ мс}, \\ \lambda = 1,06 \text{ мкм}, d_{\text{фок.}} = 0,3 \text{ мм},$$

Рис. 1. Нормальная форма импульса

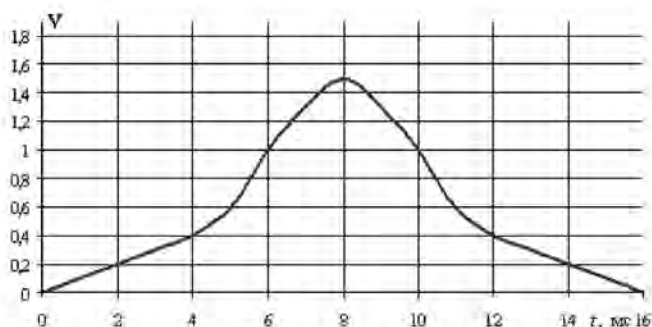


Рис. 2. Ассиметричная форма импульса

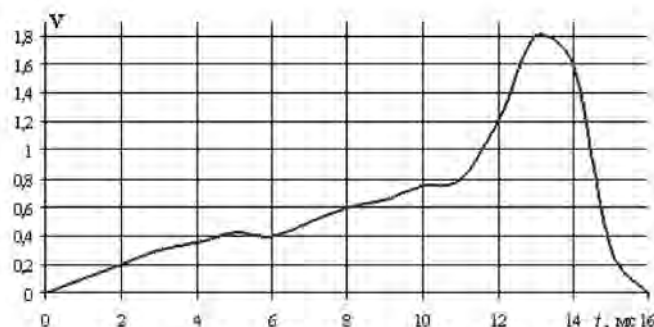
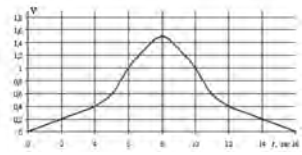
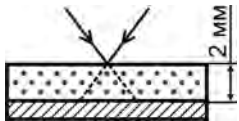

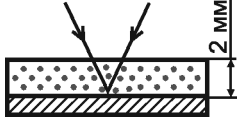

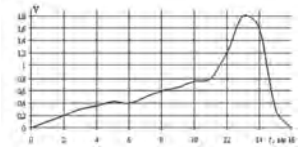
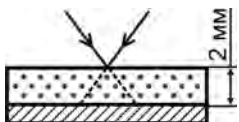
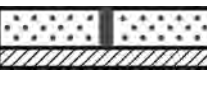
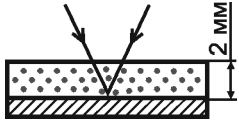



Таблица 1. Схема и условия облучения порошка

Форма импульса	Режим п/п	Схема фокусировки	Схема наплавки	Результат
	1			Отрицательный
	2			Отрицательный
	3			Положительный
	4			Отрицательный

$\alpha = 5$  мрад, моноимпульсный режим.

Металлический порошок чистого Ni с размером частиц 160...200 мкм насыпался на металлическую основу из стали ШХ 15 слоем высотой 2 мм без связующих компонентов. Излучение фокусировалось либо на поверхность порошка, либо на поверхность подложки. Результаты четырех

вариантов наплавки представлены в таблице 1.

Экспериментальные образцы, полученные методом аддитивного сплавления металлического порошка импульсным лазерным излучением, исследовались на микроскопах СЭМ LED 1450 и НЕОРНОТ-30. Результаты практической реализации режима № 3 представлены на рис. 3 – рис. 6.

Наплавленный металл имеет плотную, практически бездефектную структуру, аналогичную структуре классического литья (рис. 7).

Динамика расплава порошка определяется динамикой изменения плотности мощности излучения от толщины слоя порошка за время импульса. Для определе-

ния зависимости плотности мощности излучения от толщины наплавляемого слоя порошка были приняты следующие допущения:

- коэффициент поглощения излучения порошком постоянен на протяжении всего импульса;
- распространение тепла в слое порошка описывается законами теплопроводности для сплошного металла;

Рис. 3. Однократное и трехкратное облучение одного и трех слоев порошка соответственно

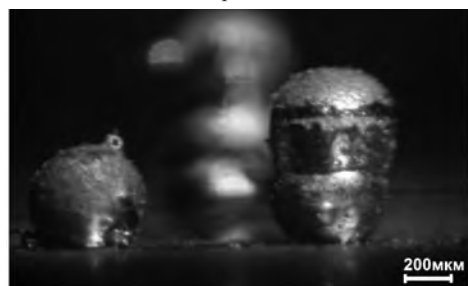


Рис. 4. Трехкратное облучение одного слоя порошка



Рис. 5. Многоимпульсное облучение при перемещении образца по контуру при однослойном насыщении порошка

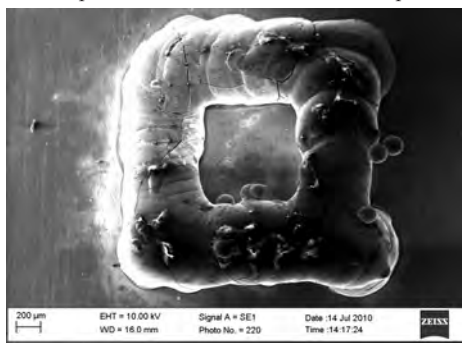


Рис. 7. Микроструктура порошка чистого никеля, расплавленного импульсным лазерным излучением (x100)

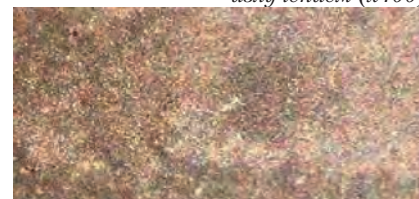


Рис. 6. Многоимпульсное облучение при перемещении образца по контуру при трехслойном насыщении порошка

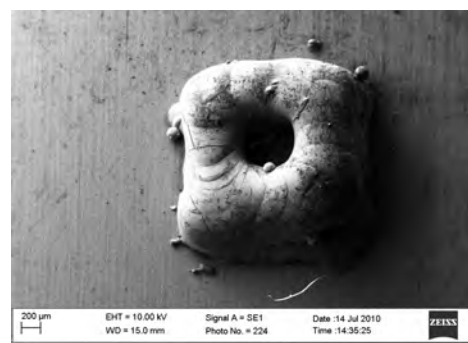
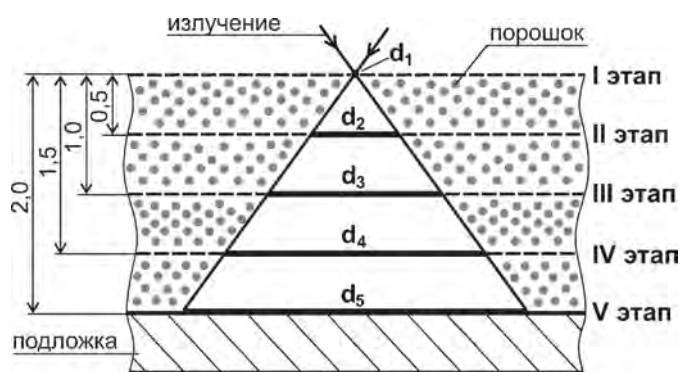


Рис. 8. Геометрическая схема плавления порошка с положительным эффектом



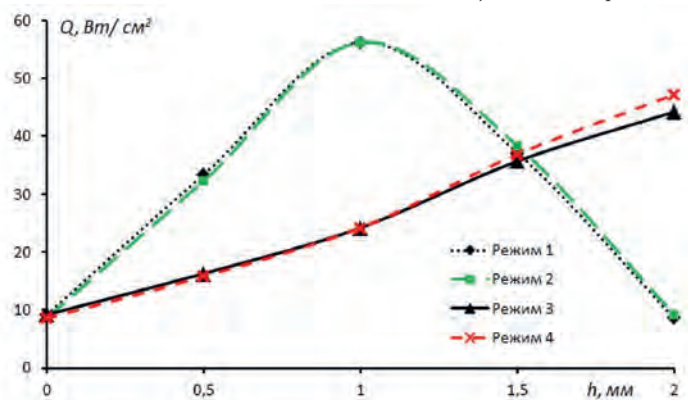
— время импульса излучения условно разделено на 5 этапов, характерных для глубокого плавления металла миллисекундным импульсом [4]: I этап — 0...4 мс — первичный расплав, мелкая ванна; II этап — 4...7 мс — увеличение объема расплава, образование буферного объема; III этап — 7...10 мс — критическая кривизна ванны расплава, образование первичного капилляра; IV этап — 10...12 мс — быстрый рост парогазового канала, эффект

самофокусировки излучения; V этап — 12...16 мс — плавление металла в направлении роста парогазового канала, глубокое плавление (рис. 8).

Расчеты плотности мощности излучения для всех вариантов эксперимента представлены в таблице 2.

Зависимость плотности мощности излучения ( $Q$ , Вт/см<sup>2</sup>) от высоты слоя насыпанного порошка ( $h$ , мм) для всех режимов обработки представлена на рис. 9.

Рис. 9. Зависимость плотности мощности излучения от толщины слоя порошка



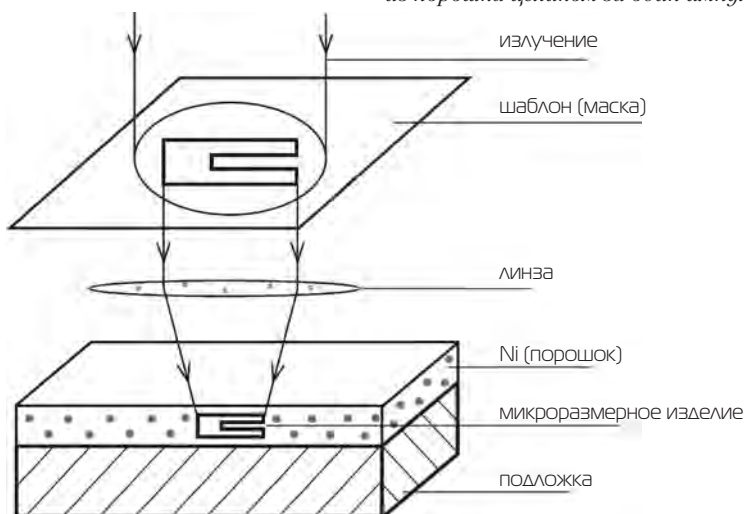
Из графика видно, что кривой 3 соответствует наиболее равномерный рост плотности по глубине наплавляемого слоя порошка, что обеспечивает поддержание температуры в зоне облучения во время импульса в диапазоне  $T_{пл.} < T_{напл.} < T_{кип.}$ , где  $T_{пл.}$  — температура плавления порошка никеля, °С;  $T_{напл.}$  — температура наплавки порошка никеля, °С;  $T_{кип.}$  — температура кипения расплава порошка никеля, °С. Кривые 1 и 2 имеют ярко

Таблица 2. Параметры эксперимента

Режим	Этап	d пятна, см, $10^{-2}$	S пятна, см, $10^{-4}$	$\tau$ , мс	E, Дж	P, Вт	$Q_s = P/S$
1	I	3,000	7,06	4	0,26	65	9,2
	II	3,025	7,18	3	0,72	240	33,4
	III	3,050	7,30	3	1,23	410	56,2
	IV	3,075	7,42	2	0,53	275	37,1
	V	3,100	7,54	4	0,26	65	8,6
2	I	3,100	7,54	4	0,26	65	8,6
	II	3,075	7,42	3	0,72	240	32,3
	III	3,050	7,30	3	1,23	410	56,2
	IV	3,025	7,18	2	0,53	275	38,3
	V	3,000	7,06	4	0,26	65	9,2
3	I	3,000	7,06	4	0,26	65	9,2
	II	3,025	7,18	3	0,35	117	16,3
	III	3,050	7,30	3	0,53	177	24,2
	IV	3,075	7,42	2	0,53	265	35,7
	V	3,100	7,54	4	1,33	333	44,2
4	I	3,100	7,54	4	0,26	65	8,6
	II	3,075	7,42	3	0,35	117	15,8
	III	3,050	7,30	3	0,53	177	24,2
	IV	3,025	7,18	2	0,53	265	36,9
	V	3,000	7,06	4	1,33	333	47,2



Рис. 10. Схема выплавления объемных микроразмерных изделий из порошка целиком за один импульс



выраженный максимум в середине слоя порошка, что приводит к перегреву зоны облучения и разлету частиц порошка из зоны обработки. Фактор изменения положения фокальной плоскости облучения незначительно меняет динамику роста (кривая 4). Однако в совокупности с формой импульса излучения становится определяющим для процесса наплавки чистого порошка Ni. Можно предположить, что реальная картина плавления порошка намного сложнее и допущений, принятых нами, недостаточно для описания реального процесса плавления.

Представленный экспериментальный результат может служить основой для дальнейших исследований по нескольким перспективным направлениям:

- Выплавление функциональных объемных микроразмерных изделий из металлического порошка соответствующего размера (1...100 нм) за один или несколько импульсов облучения с использованием шаблонов готовых деталей. При этом габариты изделий будут определяться размером излучения в фокусе (1...300 мкм) (рис. 10).

- Аддитивное выплавление микроразмерных изделий из од-

нокомпонентных металлических порошков импульсным лазерным излучением (рис. 11).

- Аддитивное выплавление микроразмерных изделий из многокомпонентных металлических порошков импульсным лазерным излучением (рис. 12).

### Заключение

Экспериментально доказана возможность плавления (наплавки) порошка чистого металла, находящегося на поверхности подложки в свободном состоянии, импульсным лазерным излучением миллисекундной длительности.

Впервые реализован режим и условия импульсного лазерного послойного выплавления из чистого порошка металла с размером частиц 160...200 мкм объемных форм со структурой металла, характерной для классического литья.

Полученные практические результаты открывают новые перспективы в разработке технологий изготовления микроразмерных объемных функциональных изделий. ■

Рис. 11. Аддитивная наплавка однокомпонентных металлических порошков

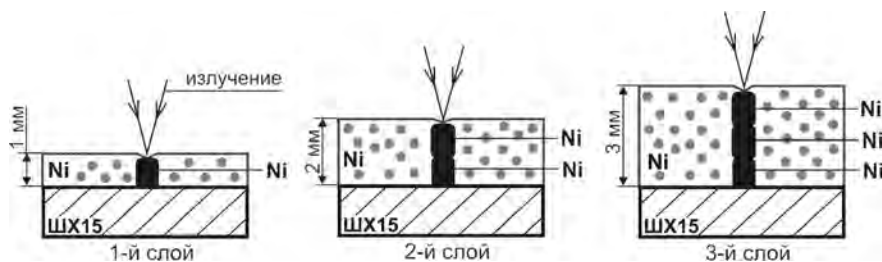
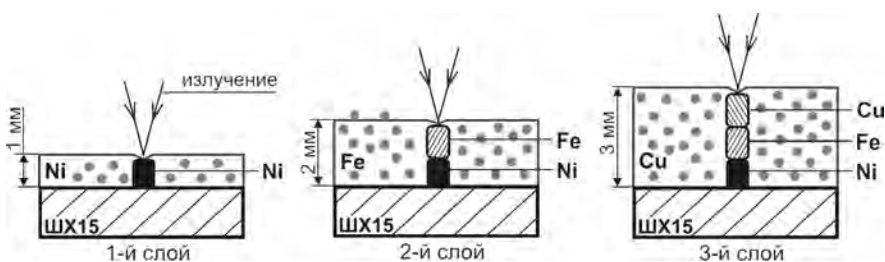


Рис. 12. Аддитивная наплавка многокомпонентных металлических порошков



### Литература

1. И. В. Шишковский. Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий // М.: Физматлит, 2019. С. 424.
2. Н. М. Максимов. Аддитивные технологии в хирургии и ортопедии // Аддитивные технологии. 2019. № 1. С. 30–39.
3. С. В. Каюков, А. А. Гусев, Г. В. Самарцев, А. П. Канавин. Способ импульсной лазерной сварки и установка для его реализации // Патент РФ № 2120364, В23К26/00. Заявка № 96119448/02 от 27.09.1996. Оpubл. 20.10.1998.
4. А. А. Гусев. Формирование парогазового канала в условиях глубокого плавления металла лазерным излучением миллисекундной длительности // ФХОМ. 2010. № 6. С. 23–29.

# Финишная обработка изделий из полиамида после 3D-печати

Евгений Андреевич Кузьмин, TopStanok

В продолжение серии статей по постобработке изделий после печати в данном материале мы расскажем о финишной технологии применительно к деталям, выполненным такими методами печати, как: MJF, FDM, HSS и SLS-полиамидами и их производными.

Проблематика абсолютно идентичная с печатью металлом, отсутствие каких-либо технологий, которые позволяли бы получать стандартное качество от изделия к изделию в промышленном масштабе. Окрашивание изменяет размеры изделия, ручная полировка и травление не позволяют получить серийность. Еще большей драматичности добавляет тот факт, что, в отличие от печати металлом, SLS-печать уже сейчас конкурирует с традиционным производством малой и средней серии (литье пластика) по скорости и цене, и единственным параметром, который позволит полностью уйти от литья пластика в такой серийности, является качество поверхности.

Шероховатость полученной поверхности после печати полиамидом подходит только для производства прототипов или внутренних частей механизмов и никак не годится для большинства конечных изделий, которым требуется глянцевая, ровная поверхность, характерная для пластиковых товаров народного потребления.

В 2016 году на базе Шеффилдского университета в Англии группой ученых была разработана тех-

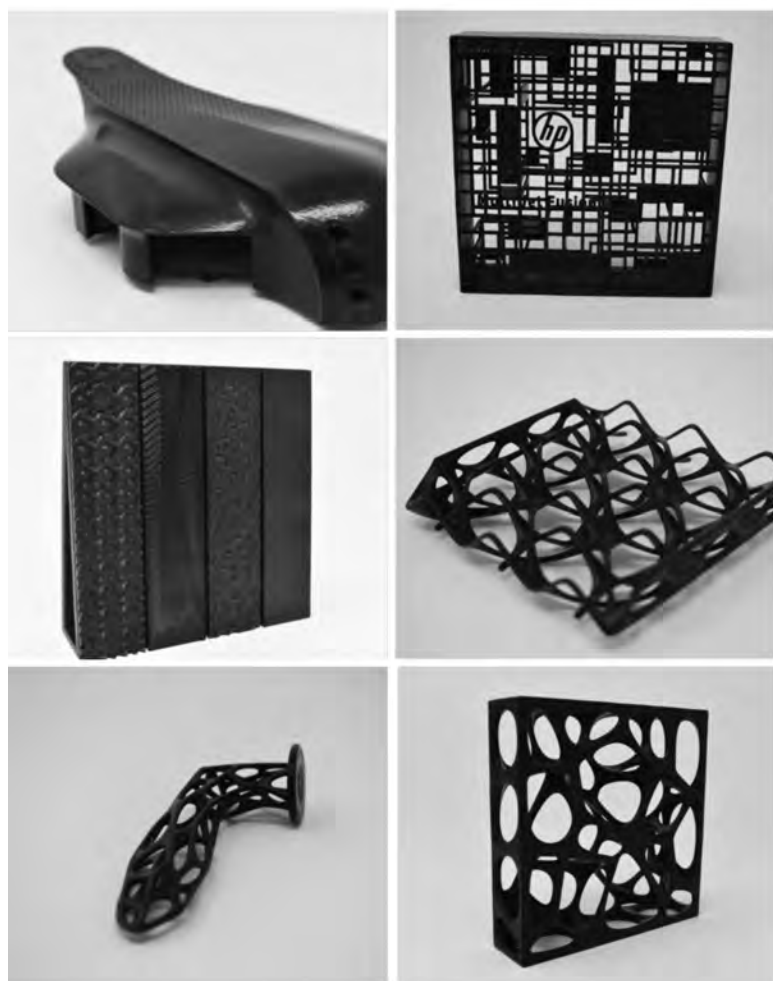
Рис. 1. Установка PostPro3D® компании AMT



нология BLAST (технология автоматизированного сглаживания верхнего слоя), которая легла в основу установки PostPro3D® от компании AMT (рис. 1). В 2017 году установка PostPro3D® была удостоена премии в номинации «Технология года» по версии авторитетной команды экспертов на ежегодной выставке аддитивных технологий Formnext, а также стала финалистом TCT Awards 2018 в номинации «Лучшее решение для постобработки».

Процесс BLAST представляет собой физико-химический процесс, в основе которого лежит запатентованная химическая смесь веществ. Для обработки доступны все порошковые материалы для аддитив-

Рис. 2. Изделия, обработанные по технологии BLAST



ного производства, в том числе полиамид в различных вариациях (корбоно/стеклонаполненный, огне-стойкий), термопластичный полиуретан и эластомер, ULTEM, PMMA. Так как для сглаживания используется газ, технология позволяет обрабатывать сложные внутренние полости деталей (рис. 2). Технология является управляемой, что позволяет воспроизводить результаты от партии к партии без ухудшения механических свойств. В результате обработки происходит перераспределение материала по поверхности, а не его удаление, как во время шлифования. Несмотря на это, обработка не изменяет структуру и геометрию изделия и позволяет получить поверхность с шероховатостью менее 1 Ra.

В итоге, установка PostPro3D® представляет собой автоматизированное решение «под ключ», которое легко интегрируется в рабочий процесс. Используя ряд предопределенных наборов параметров и алгоритмов, PostPro3D® впервые достигает качества поверхности, соответствующего методам литья под давлением. Эта технология — как раз тот самый недостающий элемент, позволяющий наконец заменить традиционные методы производства конечных изделий при сохранении экономики производства.

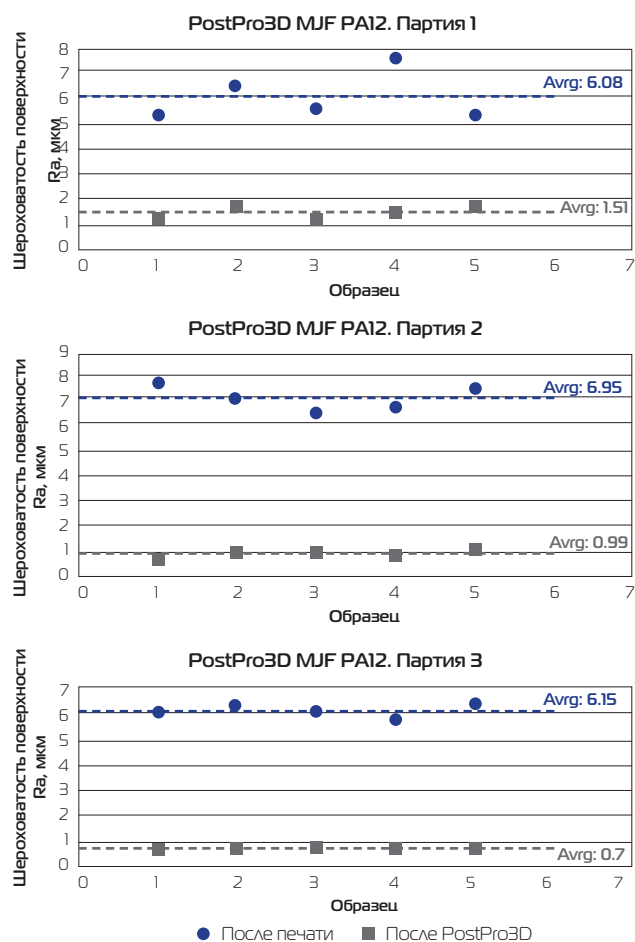
Сам процесс занимает от 60 до 120 минут в зависимости от необходимого результата и материала изделия и проходит в полностью автоматическом режиме. Все, что требуется от оператора, — это полностью очистить изделия от остатков порошка, загрузить на подставку и выбрать один из заранее запрограммированных режимов обработки. Рабочая жидкость поставляется в специальном картридже. Машина согласно программе закачивает необходимое количество в камеру обработки и после завершения цикла перекачивает отработанную жидкость в специальный картридж. После опустошения одного и заполнения другого картриджа необходимо заменить, весь процесс протекает в замкнутом контуре и никаким образом не влияет на окружающую среду. Операция замены не требует специальных знаний или оборудования и выполняется в один простой шаг. Максимальный размер обрабатываемого изделия 400×600×400 мм.

Немаловажно то, что газ не оставляет никаких следов после обработки и подходит для производства медицинских изделий (согласно требованиям ISO 10993).

Далее мы расскажем про результаты тестов, которые помогут понять в цифрах, какое влияние на изделие оказывает обработка.

Для теста были взяты три партии изделий по три изделия в каждом (сердце, пирамида и пластина), напечатанные на принтере HP из материала HP MJF PA12 (рис. 3). Предварительно изделия были очищены от остатков порошка.

Рис. 3. Измерение шероховатости на образцах из трех партий



Все три партии были обработаны отдельно друг от друга с последовательным изменением (улучшением) параметров относительно предыдущего цикла. Время обработки 60 минут. Все измерения производились в соответствии с американскими промышленными стандартами ASTM.

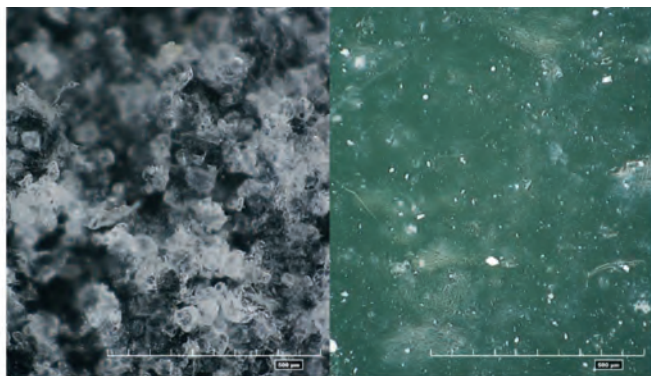
#### Измерение шероховатости

Шероховатость поверхности образцов измеряли с помощью прибора Mitutoyo Surftest SJ-210. Пять измерений на разных участках каждой поверхности были сделаны до и после обработки, и было получено среднее значение.

### Механические свойства

Предел прочности при растяжении, относительное удлинение при разрыве и модуль Юнга были измерены для обработанных и необработанных образцов (рис. 4). Результаты показывают отсутствие потери предела прочности при растяжении в обработанных образцах. Удлинение при разрыве испытанных образцов значительно увеличилось, тогда как модуль Юнга уменьшился. Эти эффекты можно объяснить уменьшением количества мест возникновения трещин на поверхности полимера из-за удаления поверхностной пористости, как показано на микроскопическом изображении ниже.

Рис. 4. Качество поверхности до и после обработки



### Изменение размеров

Детали, обработанные на установке PostPro3D, имеют изменение размеров не более 0,4%. Это незначительное изменение размеров приводит к сохранению допусков деталей, сохранению мелких деталей и не влияет на заложенную собираемость.

### Цвет изделия

Во время обработки поверхность изменяется в контролируемом диапазоне. И при сглаживании поверхностного слоя также изменяется цвет изделия в диапазоне от серого до глянцевого черного (рис. 5).

### Влагопоглощение

Был проведен эксперимент по погружению образцов в воду для изучения влияния обработки на водопоглощение. Обработанные и необработанные образцы с площадью поверхности 208 см<sup>2</sup> были погружены в воду, и с определенными промежутками производилось повторное измерение веса образцов.

С первых минут опыта можно увидеть, что вода имеет тенденцию «прилипать» к поверхности необработанных образцов, что приводит к увеличению веса для деталей с большой площадью поверхности. При этом с поверхности обработанных образцов вода скатывается, не оказывая никакого воздействия. На рис. 6 можно наглядно увидеть скорость поглощения воды обработанным и необработанным изделием.

После проведенных опытов можно сказать, что обработка по технологии PostPro3D® улучшает свойства изделия и помимо глянцевой поверхности позволяет получить много дополнительных улучшений, влияющих на механические и эксплуатационные характеристики.

Все это дает основания заявлять, что технология PostPro3D® делает 3D-печать конкурентоспособной традиционным методам производства по всем параметрам, включая качество поверхности.

Установка уже используется такими компаниями, как Boeing и McLaren, и на деле доказывает свою необходимость в современном аддитивном производстве.

В этом году также станет доступной технология для окрашивания изделий PostProCOL®. Плюс окрашивания по данной технологии в том, что краска проникает внутрь изделия и не меняет его размеров, в отличие от обычного окрашивания. Более подробно об этой технологии мы расскажем в следующей статье. ■

Рис. 5. Изменение цвета изделий после обработки

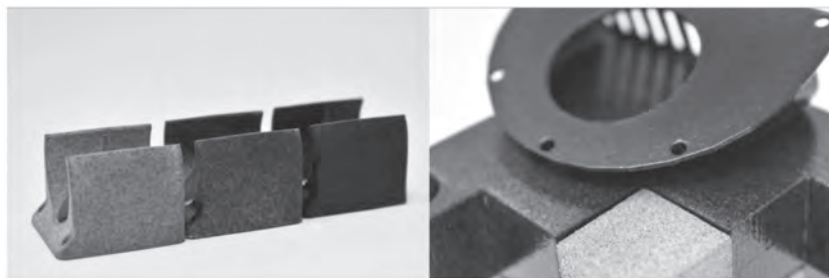
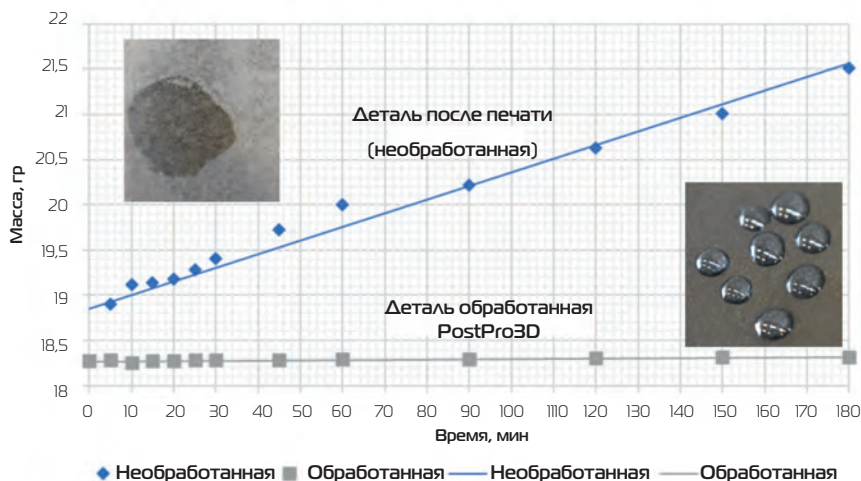


Рис. 6. Влияние обработки PostPro3d на поглощение влаги





ADDITIVE  
MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES

 topstanok.ru

postpro3D™

ПРЕДСТАВЛЯЕМ ПЕРВУЮ И ЕДИНСТВЕННУЮ В МИРЕ АВТОМАТИЗИРОВАННУЮ ТЕХНОЛОГИЮ ОБРАБОТКИ, КОТОРАЯ ОБЕСПЕЧИВАЕТ ТАКОЕ ЖЕ КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИМЕРА, КАК У ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ПЛАСТИКА



**PostPro3D®** — ЭТО ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, ОСНОВАННАЯ НА ЗАПАТЕНТОВАННОМ КОМПАНИЕЙ АМТ ПРОЦЕССЕ BLAST (ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО СГЛАЖИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ), КОТОРАЯ ПОЗВОЛЯЕТ СОКРАТИТЬ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА, ЗАТРАТЫ НА ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И ОБЕСПЕЧИТЬ ТОТ САМЫЙ «НЕДОСТАЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ» В ЦЕПОЧКЕ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА.

#### СОВМЕСТИМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Технология PostPro3D® совместима со всеми порошковыми технологиями, а так же технологиями наплавления нити. Компанией АМТ были проверены тесты с изделиями полученными следующими методами: SLS, MJF, HSS и FDM. В настоящее время технология позволяет обрабатывать полиамид (нейлон) в различных вариациях (карбон/стекло наполненный, огнестойкий), ULTEM, PMMA, термополиуретан (ТПУ) и термопластичные эластомеры (ТПЭ). Всего протестировано более 80 материалов.

#### УЛУЧШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕТАЛИ

Процесс BLAST улучшает механические свойства деталей. Обширные испытания демонстрируют отсутствие потери предельной прочности на растяжение (UTS) с кратным увеличением удлинения на разрыв (EAB). Улучшение показателей связано с уменьшением количества мест возникновения трещин на поверхности полимера вследствие удаления поверхностной пористости.

#### МЕДИЦИНСКИЕ ДОПУСКИ

Обработанные детали не проявляют цитотоксического эффекта и полностью соответствуют требованиям к медицинским изделиям и компонентам ISO 10993-5, ISO 10993-1 и ISO 10993-12. Поэтому детали, обработанные с использованием технологии PostPro3D, легко проходят сертификацию для медицинского применения.

#### ЛЕГКОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Технология PostPro3D® — это автоматизированное готовое решение, которое можно легко интегрировать в рабочий процесс. Достаточно загрузить изделия на держатель, выбрать программу и нажать кнопку старт, все остальное установка сделает в автоматическом режиме и в конце вы получите обработанные изделия готовые к использованию.



topstanok.ru



# 3D-принтер или станок?

## Сравниваем методы прототипирования в автопроме

Ольга Горобец, <https://blog.iqb.ru>

В последние годы наблюдается резкий рост числа автопроизводителей, использующих 3D-печать для прототипирования и даже изготовления конечных изделий. Гиганты индустрии: BMW, Lamborghini, Jaguar Land Rover и многие другие — следуют в русле этого тренда, создавая новые конструкторские решения, функциональные прототипы и детали своими силами, без помощи сторонних организаций. Такой подход не просто более удобен для проектировщиков и процесса НИОКР в целом — он позволяет значительно сократить расходы и время вывода новых продуктов на рынок.

ProtoFab, крупный игрок на рынке 3D-печати, давно и активно сотрудничает с предприятиями автомобильной индустрии. Не так давно компания выполнила несколько проектов для Great Wall Motors, и чтобы наглядно продемонстрировать различия между SLA-технологией и ЧПУ-обработкой, мы решили воспроизвести некоторые детали, используя оба метода. Это позволит увидеть все плюсы и минусы каждой технологии.

Great Wall — крупнейший в Китае производитель кроссоверов и пикапов — в настоящее время расширяет сферу своего присутствия на мировом рынке. Одним из самых громких событий последних лет для Great Wall стало создание компактного кроссовера премиум-класса Wey, который был выпущен на рынок в 2017 г. ProtoFab выполнила прототипирование ряда деталей, включая крышку двигателя, которой будет отведено центральное место в данном сравнении.

Рис. 1. При работе на станке потребовалось изготовить 25 секций изделия, а затем склеить их



Крышка двигателя для Great Wall Wey VV7:

два подхода к прототипированию

Сначала давайте посмотрим, как крышка двигателя была изготовлена на станке с ЧПУ (рис. 1). Это субтрактивный способ производства, поэтому нам потребовалось взять большую заготовку и постепенно удалить лишний материал. Однако это совсем не значит, что мы просто загрузили заготовку и нажали кнопку «Пуск» — на подготовку к этому этапу потребовалось целых 10 часов!

4 часа ушло на анализ цифровых файлов и 6 часов — на настройку конфигурации. Помимо этого потребовалось правильно настроить режущие инструменты и параметры. Поскольку данная технология не позволяет создать прототип как цельное изделие, пришлось изготовить на трех отдельных станках различные секции и затем склеить их друг с другом.

В отличие от станка, стереолитографический 3D-принтер изготавливает деталь как единое целое и без каких-либо отходов. Невероятно приятно наблюдать, как из резервуара появляется практически готовая деталь, которая достаточно хорошо выглядит даже без постобработки (рис. 2).

Отдельно от основной детали пришлось напечатать только небольшую съемную крышку. И поскольку она была напечатана одновременно в том же резервуаре, это нисколько не удлинило и не усложнило

Рис. 2. Крышка двигателя напечатана на 3D-принтере как цельный объект



Рис. 3. Части детали, которые необходимо склеить

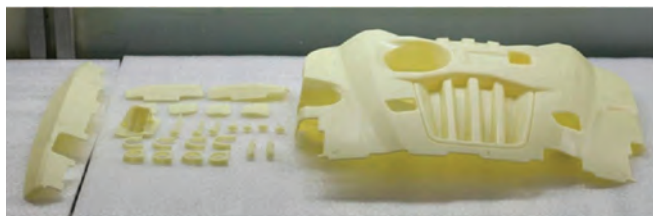


Рис. 4. При мехобработке потребуются лишние часы склеивания



процесс построения. По окончании подготовительной работы нам действительно достаточно было лишь нажать кнопку «Пуск».

Это сильно контрастирует с тем, как выглядела деталь после фрезерования на станке с ЧПУ. На рис. 3 вы видите много мелких секций, которые пришлось вырезать отдельно в силу физических ограничений ЧПУ-обработки. Все эти секции нужно приклеить к основной детали на следующем этапе. Это вызвано тем, что режущий инструмент имеет сильно ограниченный диапазон перемещения, и в противном случае многие секции крышки двигателя были бы недоступны для обработки.

Технический специалист должен внимательно сверяться с исходными чертежами и следить за правильностью сборки. Необходимо обеспечивать предельную точность на протяжении всего процесса. Склеивание — крайне сложный и трудоемкий процесс, который неизбежно приводит к некоторому снижению качества отделки. Какой бы высокой квалификацией ни обладали наши специалисты, приклеенная деталь просто не может быть настолько же гладкой, как деталь, напечатанная как цельный объект (рис. 4).

Обе детали практически идентичны по размерам, и срок изготовления в обоих случаях составил 40 часов. Однако если добавить к этому 10 часов подготовки к мехобработке, а также время, потраченное на склеивание, то в целом длительность технологического процесса при использовании станка с ЧПУ будет гораздо больше.

Хотя склеивание никогда не дает идеальных результатов, сборка этой напечатанной детали не представляла больших сложностей благодаря минимальному количеству соединяемых секций. По за-

вершении склеивания оставалось лишь отшлифовать места соединений и довести поверхность до гладкого состояния. Несмотря на то, что обработка на станках с ЧПУ имеет свои преимущества и области применения, для такого рода проектов гораздо предпочтительнее SLA-технология. Она намного быстрее по сравнению с ЧПУ-обработкой и позволяет создавать намного более сложные формы и конструкции с гораздо меньшими трудозатратами и гораздо меньшим количеством отходов.

Чтобы вы имели представление о количестве отходов ЧПУ-обработки, достаточно сказать, что крышка двигателя весит около 950 г, но ее нужно было вырезать из 27-килограммового блока ABS-пластика. Невероятно!

Если учесть, насколько эффективнее в этом отношении SLA-технология, и принять во внимание все упомянутые ранее преимущества, можно действительно сказать, что будущее — за аддитивным производством, особенно для современных автопроизводителей типа Great Wall.

Что особенно важно, для управления 3D-принтером нужен лишь один оператор, и деталь печатается целиком за один раз, в то время как для работы на станке требуется несколько человек. ЧПУ-обработка очевидным образом представляет собой более трудоемкий и ресурсоемкий процесс.

#### Сложные автодетали?

#### SLA-технология вне конкуренции!

SLA-технология идеально подходит не только для создания прототипов крышек двигателей. Вот примеры других автокомпонентов, которые ProtoFab изготовила для Great Wall.

Радиаторная решетка с очень сложной конструкцией (рис. 5) будет настоящим кошмаром для станка

Рис. 5. Решетка радиатора имеет сложную конструкцию



Рис. 6. Секция передней левой двери с сеткой динамика, напечатанная на 3D-принтере ProtoFab SLA600 из фотополимера Formula W



с ЧПУ, однако стереолитографический 3D-принтер справится с ней без каких-либо проблем!

То же самое можно сказать и о дверной секции, которую вы видите на рис. 6. Она слишком велика для печати в виде цельного изделия, однако мы напечатали ее за один раз, разделив на несколько секций.

Одна из этих напечатанных отдельно секций — сложная сетка для динамика, еще один пример сложной геометрии, представляющей серьезные трудности для ЧПУ-обработки. Основные секции были напеча-

Рис. 7. Готовая деталь, установленная на Weiy VV7



таны таким образом, чтобы их было легко соединить на этапе постобработки.

Если принять во внимание только допуски и качество поверхности, станок — однозначный выбор. SLA-технология обеспечивает достаточно высокую точность, однако в плане гладкости отделки она уступает мехобработке. Кроме того, станок с ЧПУ выгодно использовать в случаях, когда вам требуется большая партия деталей и более одного или двух прототипов, особенно если изделие имеет простую конструкцию. Еще одно преимущество обработки на станке — разнообразие материалов. Станок может обработать практически любой материал, включая дерево, металл и пластик, тогда как стереолитографическая 3D-печать ограничена фотополимерами.

### 3D-печать и будущее автомобильной промышленности

Выбор 3D-печати вместо традиционных технологий позволили компании Great Wall получить необходимые прототипы гораздо быстрее и затратить на них гораздо меньше. Кроме того, 3D-печать обеспечила большую гибкость на протяжении всего процесса разработки продукта. Принимая во внимание все преимущества, о которых мы рассказали в этой статье, можно сделать вывод, что 3D-принтеры будут играть важнейшую роль в дальнейшем развитии автомобилестроения. ■

Сравнение 3D-печати и обработки на станке с ЧПУ

Технология	SLA-принтер	Станок с ЧПУ
Простота изготовления	Деталь печатается в виде цельного изделия. Несколько деталей можно изготовить за одну сессию печати.	Зачастую детали требуется изготавливать в виде нескольких отдельных секций, которые затем склеивают. Каждая секция изготавливается отдельно.
Сложность конструкции	Доступно создание изделий любой формы, включая сложные решетчатые и полые конструкции.	Можно изготовить только конструкции простой формы.
Материал	Фотополимер	ABS-пластик
Расход материала	Аддитивный способ производства, предполагающий использование более 95% расходного материала.	Субтрактивный способ производства, при котором значительная часть обрабатываемого материала идет в отходы.
Время изготовления, в среднем	2–3 дня	5–7 дней
Гибкость	Исключительно гибкая технология. Возможность быстро и легко внести изменения в конструкцию. Быстрая подготовка принтера к работе.	Негибкая технология. Изменение конструкции — долгий и сложный процесс.
Конструктивные ограничения	Проектировщик ограничен лишь своим воображением.	Многие формы и конструкции реализовать невозможно.
Обслуживающий персонал	1 человек выполняет эксплуатацию и контроль нескольких 3D-принтеров. Обучение работе на принтере занимает 1 день.	1 станок обслуживается 2-3 операторами. Обучение работе на станке занимает полгода.
Шумность и воздействие на окружающую среду	3D-принтер практически бесшумен и производит очень мало отходов.	Высокий уровень шума. Образуется большое количество стружек и пыли, вредных для органов дыхания.



# Применение АМ в биотехнологии: термины, методы, материалы (часть 1)

Н.М. Максимов, ООО «Ника-Рус»

## Термины и определения [1]

**Биопроизводство** — это процесс генерации биологических структур, обладающих сложной архитектурой, с использованием высокопроизводительных методов, таких как 3D-биопечать, биореакторы, и материалов на основе так называемых биочернил.

Биопечать предполагает процедуру фазового перехода из жид-

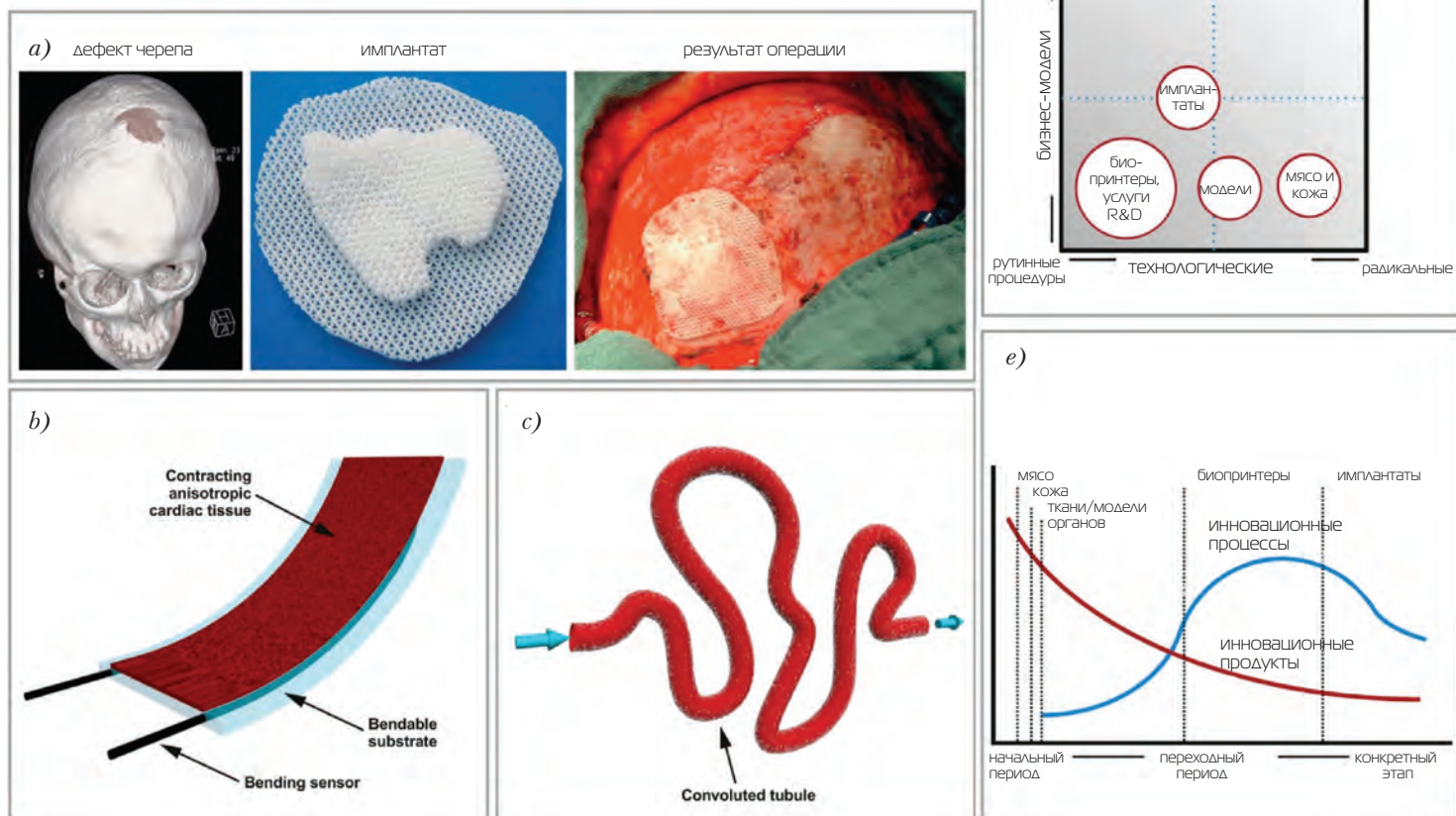
кого состояния в твердое при послойной печати или из твердого в гелеобразное. Биочернила являются биосовместимыми или инертными и могут содержать специальные активные биологические компоненты, такие как тканевые сфероиды, клеточные суспензии и биоактивные агенты. Биочернила могут наноситься непосредственно сразу на подготовленный построенный каркас,

но чаще всего они вносятся на более поздних стадиях.

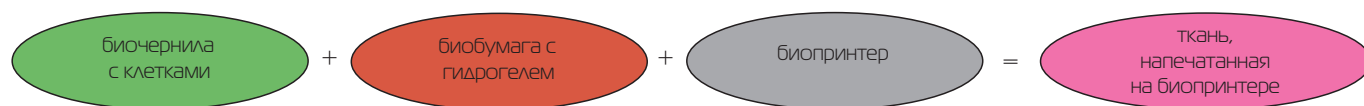
**Биореакторы** — это автоматические системы, которые позволяют эффективно и точно воспроизводить, размножать и дифференцировать клетки в контролируемой среде (in vitro).

3D-биопечать можно рассматривать как одно из важнейших приложений АМ-технологий в медицине, а именно — в биомеди-

Рис. 1. Примеры регенеративной медицины: а) дефект черепа, имплантат и результат операции [2]; б) анизотропная сердечная ткань на гибкой подложке с датчиками, выращенная с использованием биотехнологии [3]; в) нефрологическая модель [4]; д) типы биотехнологических инноваций [5]; е) этапы инноваций в биологии (Utterback и Abernathy) [6]



Trends in Biotechnology



цине. Биотехнология является основой для тканевой инженерии (производство живых тканей) и регенеративной медицины (TERM, рис. 1), а также для таких приложений, как открытие/разработка лекарств, в частности индивидуальное дозирование лекарств; изучение микросреды рака; решение проблемы с анатомическими животными; производство продуктов питания: мяса и кожи.

Основные подходы в биопроизводстве:

**Биомимикрия** — аналог природным структурам, с использованием биочернил, предполагает создание идентичных клеточных и внеклеточных компонентов тканей, их размножение в микромасштабе. Компоненты, необходимые для 3D-биопечати тканей, приведены на рис. 2 [5].

**Автономная самостоятельная сборка** — аналог физическим процессам при развитии эмбрионального органа, с использованием сфероидов. Ранние клетки, которые вырабатываются во время развития тканей, производят свои собственные компоненты ЕСМ, организуют передачу сигналов и шаблонов клеток, которые дают желаемую биологическую функцию [6, 7, 8].

**Тканевые строительные мини-блоки.** Данная концепция связана с обеими вышеупомянутыми стратегиями. Наименьшие струк-

турные и функциональные строительные мини-блоки, как нефрон в почке, например, образуют органы и ткани. Они объединяются между собой путем самосборки, чтобы сформировать сложную трехмерную конструкцию с законченными структурными, функциональными и механическими свойствами.

**Обычно различают два направления 3D-печати в медицине:**

с применением полимеров для моделирования частей тела или для создания имплантатов, и биопечать, которая использует клетки для создания органического материала. С производством реальных человеческих тканей, реплик органов и функциональных структур органов биопечать может

стать дополнением к традиционным трансплантациям донорских органов, а затем и практически заместить их.

**Основными этапами биопечати являются** визуализация, дизайн, выбор материала, отбор клеток и печать конструкции ткани [9], приведенные в таблице 1.

### Биочернила

Биочернила представляют собой жидкий раствор, содержащий тканевые сфероиды или клеточные суспензии. В 3D-биопечати наиболее широко используются органические растворы (альгинатные гидрогели, коллаген и гиалуроновая кислота), синтетические биоматериалы (PCL и другие) для

Рис. 3. Составляющие для тканевой инженерии



Таблица 1. Выбор материала, клеток и печать ткани

Визуализация	Подход к конструированию	Выбор материала	Выбор клеток	Биопечать	Приложение
Рентген	Биомимикрия	Синтетические полимеры	Дифференцированные клетки	Струйная печать	Созревание
Компьютерная томография	Самосборка	Натуральные полимеры	Плюрипотентные стволовые клетки	Экструзионная печать	Имплантация
Магнито-резонансная томография	Мини-блоки ткани	ЕСМ (внеклеточные матрицы)	Мультипотентные стволовые клетки	Лазерная печать	Тестирование in vitro

механической поддержки клеточных тканевых конструкторов или их смеси. Наиболее перспективны наноцеллюлозные материалы благодаря высокому содержанию в них воды, хорошей механической прочности и свойствам разжижения при сдвиге (рис. 3).

Биочернила должны обладать такими характеристиками, как пригодность для печати, высокие механические свойства, биodeградация в контролируемой среде и нетоксичность для клеток [5].

#### Биочернила на основе природных полимеров

Гидрогели включают в себя живые клетки, а также стимуляторы, которые определяют различные формы их поведения, такие как миграция, пролиферация, дифференцировка и созревание. Основным недостатком природных гидрогелей — это изменчивость от партии к партии.

*Альгинат* — обладает идеальной биосовместимостью и обеспечивает простое и быстрое гелеобразование.

*Коллаген* — является частью различного внеклеточного матрикса (ЕСМ) и участвует в физиологических взаимодействиях между клетками и ЕСМ. Простое сшивание посредством терморективного гелеобразования в физиологических условиях является основным преимуществом биочернил на основе коллагена.

*Желатин* — это форма коллагена, которая денатурируется и находит применение в пищевой, фармацевтической и косметической промышленности в качестве гелеобразующего агента.

*Фибрин* состоит из продуктов взаимодействия фибриногена и тромбина и действует как хирургический клей в процессе заживления ран благодаря своей способности к быстрому гелеобразованию.

#### Биочернила на основе синтетических и полусинтетических материалов

Материалы PCL, PEG, PLGA, PLA и PGA в основном используются в тканевой инженерии из-за их высокой механической прочности. Например, PCL может использоваться для ортопедических приложений при остеоинтеграции костных тканей. Синтетические и натуральные материалы, используемые в биотехнологии, приведены в таблице 2 [10].

В процессе биопроизводства биочернила превращаются в трехмерную конструкцию, последовательно фиксируемую гелеобразованием — физико-химическим процессом сшивания, которое основано на сетках избыточных цепей молекулярных полимеров, ионных взаимодействиях и водородных мостиках [11]. Этот тип сшивки совместим с живыми клетками, но имеет недостаточные механические свойства. Для преодоления этого недостатка используются дополнительные сшивающие материалы.

Вязкость гидрогеля является другим важным аспектом биопе-

чати. Повышенная концентрация полимера приводит к жесткости геля, что сводит к минимуму подвижность клеток в водной среде.

Возможное решение для трансплантации органов состоит в том, чтобы восстановить собственные органы человека, что делается с помощью тканевой инженерии. При традиционном подходе к тканевой инженерии выделяют небольшой образец ткани пациента, извлекают стволовые клетки, смешивают с факторами роста и дают возможность культивировать в лаборатории, помещая их на опору, называемую каркасом, из которого регенерируется весь орган. Трехмерная биопечать обеспечивает дополнительное существенное преимущество по сравнению с традиционной тканевой инженерией, так как имеет высокий контроль над концентрацией, объемом, диаметром и разрешением печатаемых клеток и производит их либо слой за слоем, либо непосредственно в конечную трехмерную подобную ткани структуру.

Сначала клетки выращивают как монослой, потом высеваются в специально построенные каркасы в биореакторе, где они могут

Таблица 2. Синтетические и природные материалы для биопроизводства

Материал	Тип	Метод гелеобразования	Цитосовместимость	Тип клеток
Агароза	натуральный	термический/химический	<95%	HUVEC
Алгинат	натуральный	термический	<95%	HeLa, фибробласт
Коллаген	натуральный	термический	95–75%	RFMF
Фибрин	натуральный	ферментативный	85–70%	HMVEC
Желатин	натуральный	термический/химический	75–95%	печень
Матригель	натуральный	термический	<95%	HUVEC
PEG	синтетический	термический/фото	<95%	фибробласт
PHEMA	синтетический	термический/фото	нет данных	C3A
PCL	синтетический	термический	<95%	hMSC
PLGA	синтетический	термический	<95%	hMSC

размножаться. Каркасы должны быть разлагаемыми. Клетки можно выращивать как в биореакторе, так и в донорском теле. Следующим шагом (4D-биопечать) должно стать выращивание сигнальных систем, как, например, для сердца и мозга. Тонкие ткани (до 400 мкм), размещенные в донорском теле, обеспечиваются всем необходимым для жизнедеятельности клеток. Для тканей больших размеров необходима сосудистая структура.

Плюрипотентные стволовые клетки (pluripotent stem cells), или мастер-клетки [12].

Плюрипотентные стволовые клетки способны производить любые клетки или ткани, дифференцироваться или созревать в три основные группы клеток, которые формируют человека:

— эктодерма — создает кожу и нервную систему;

— энтодерма — формирует желудочно-кишечный тракт и дыхательные пути, а также железы внутренней секреции, печень и поджелудочную железу;

— мезодерма — формирует кость, хрящ, большую часть кровеносной системы, мышцы, соединительную ткань и многое другое.

Это их основное свойство называется плюрипотентностью.

Типы плюрипотентных стволовых клеток

**Индукцированные плюрипотентные клетки (iPS).** Можно взять обычную клетку, такую как клетка кожи, и «перепрограммировать» ее, вводя несколько генов, которые превращают ее в индуцированную плюрипотентную клетку (iPS). Лаборатория в Детской больнице Бостона была одной из первых, сделавших это открытие, а журнал Science обозначил его как прорыв года

в 2008 году. iPS-клетки обладают огромным терапевтическим потенциалом. Поскольку они происходят из собственных клеток пациента, они генетически соответствуют этому пациенту и могут устранить проблемы с подбором и отторжением тканей, которые в настоящее время препятствуют успешной трансплантации клеток и тканей. iPS-клетки также являются ценным исследовательским инструментом для понимания развития различных заболеваний.

**Эмбриональные стволовые клетки.** Ученые используют термин «эмбриональные стволовые клетки» в качестве общего термина для плюрипотентных стволовых клеток, которые получены с использованием эмбрионов или яиц, а не для клеток, генетически перепрограммированных из организма. Существует несколько типов эмбриональных стволовых клеток:

1. «Истинные» эмбриональные стволовые клетки (ES) получают из неиспользованных эмбрионов, которые были пожертвованы парами, которые подверглись экстракорпоральному оплодотворению (ЭКО). Они являются «общими» и генетически не соответствуют конкретному пациенту, поэтому вряд ли будут использоваться для создания клеток для лечения, скорее, для научных исследований.

2. Стволовые клетки, полученные путем переноса ядер соматических клеток (nTES). Термин перенос ядра соматической клетки (SCNT) означает буквально передачу ядра (которое содержит все генетические инструкции клетки) из соматической клетки — любой клетки организма — в другую клетку, в данном случае яйцеклетку. Этот тип клеток был успешно получен только у низших животных. Чтобы получить клетки nTES у пациентов-людей, требуется донор яйцеклетки,

а также клетка пациента (обычно клетки кожи).

3. Стволовые клетки из неоплодотворенных яйцеклеток рES (партеногенетические эмбриональные стволовые клетки). Посредством химической обработки неоплодотворенные яйцеклетки могут быть «обмануты» для превращения в эмбрионы без оплодотворения спермой — процесс, называемый партеногенезом. Если этот метод окажется безопасным, женщина сможет пожертвовать свои собственные яйцеклетки, чтобы создать плюрипотентные стволовые клетки, генетически соответствующие ей, которые, в свою очередь, могут быть использованы для создания клеток, которые не будут отторгнуты ее иммунной системой. Поскольку клетки рES могут быть получены более легко и более эффективно, чем клетки nTES, они потенциально могут быть готовы к клиническому использованию раньше.

## Обзор методов биопечати

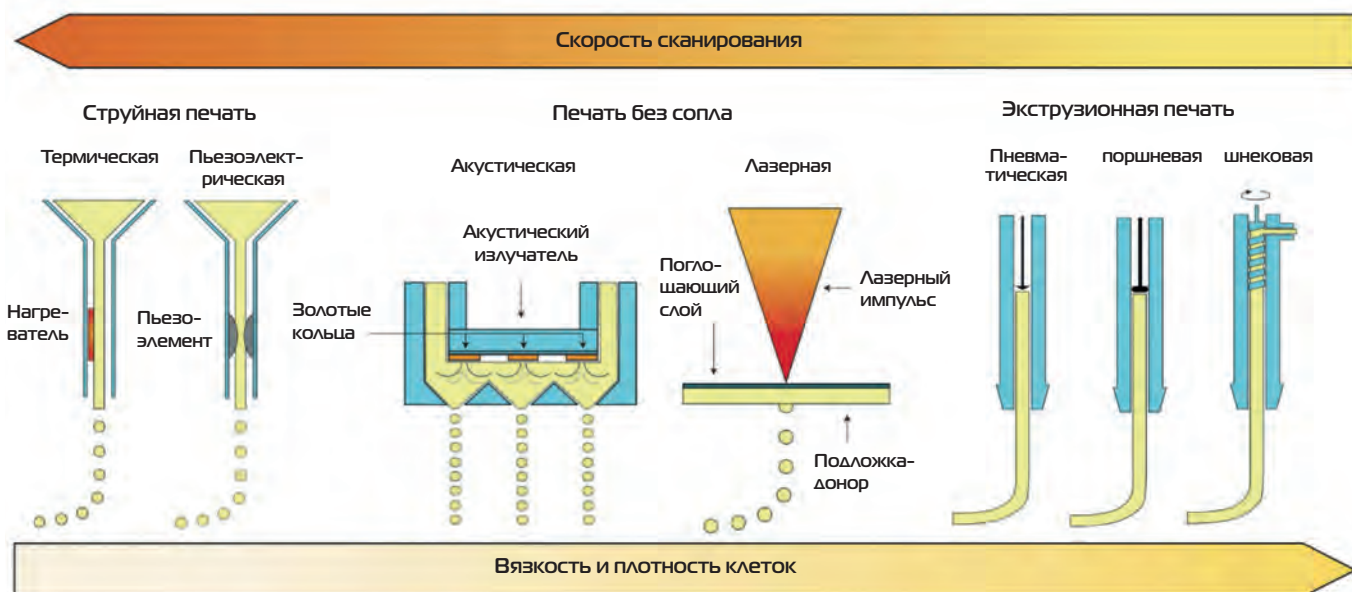
Из 7 групп АМ-технологий (стандарт F2792 [1–5] ASTM) наибольшее распространение в биопроизводстве получили технологии (рис. 4):

а) лазерная — лазерные импульсы создают высокое давление на донорской пластине, покрытой гидрогелем с клеточным материалом, что побуждает частицы гидрогеля переходить на рабочую пластину;

б) струйная (InkJet, термическая и пьезоэлектрическая) — частицы биополимера или гидрогеля с клеточным материалом инжектируются в виде капель через сопло, либо за счет образования паровых пузырей при электрическом нагреве, либо за счет вибраций пьезоэлектрического модуля;

в) экструзия (Extrusion, пневматическая и механическая) — частицы биополимера или гид-

Рис. 4. Виды биопечати в зависимости от вязкости биочернил и плотности клеток, с одной стороны, и от скорости сканирования — с другой



роголя с клеточным материалом инжестируются в виде капель через сопло либо за счет образования паровых пузырей при электрическом нагреве, либо за счет вибраций пьезоэлектрического модуля.

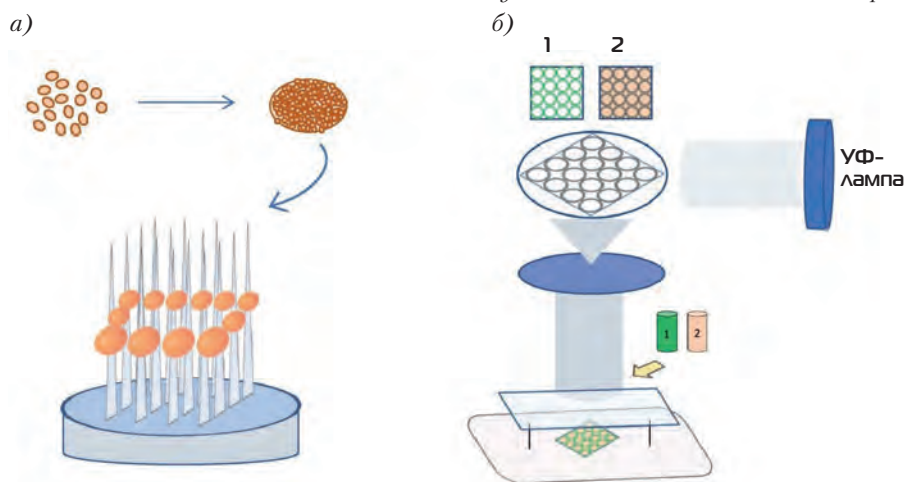
Другие типы АМ (печать без сопла, например с помощью акустических волн) используются значительно реже.

### 2.1. Струйная биопечать (термическая и пьезоэлектрическая)

Струйный термический принтер имеет камеру с чернилами. Для создания потока капель на нагревательный элемент подаются импульсы тока, которые нагревают сопло головки до 200–300°C [13]. Кратковременный нагрев до таких температур не оказывает видимого разрушительного воздействия на биологические молекулы, включая ДНК и живые клетки.

Пьезоэлектрический струйный принтер использует пьезокристалл, на который подается импульс тока, и вследствие вибрации кристалла чернила выходят

Рис. 5. Виды биопечати: а) метод KENZAN (размещение клеточных сфероидов на микроиглах как на поддержке); б) метод стереолитографии (печать основным — зеленый — и поддерживающим — бежевый — материалами) — отверждение фотополимера за счет облучения УФ-светом лампы или лазера



из сопла. Размер, форма капель и скорость их выброса определяются приложенным напряжением, длительностью и амплитудой импульса. К недостаткам следует отнести возможность повреждения клеточных мембран или стенок клеток акустическими волнами.

Благодаря своей доступности, быстрой печати и экономичности струйные принтеры имеют широкий спектр применения. Однако эффективность термоструйных

принтеров снижается из-за закупорки сопла, неравномерного потока и разброса размеров капель [13]. Для преодоления некоторых проблем были разработаны различные модификации струйных принтеров.

Сложная конструкция тканей и органов требует одновременного нанесения различных типов клеток и других компонентов ткани, что стало возможным с появлением струйной печати с помощью матрицы сопел.

Таблица 3. Сравнительные характеристики биочернил для различных типов биопринтеров

Характеристики	Лазерные	Акустические	Струйные	Экструзионные
Вязкость биочернил, мПа•с	1–300	1–18	<10	30–6×10 <sup>7</sup>
Плотность клеток, клеток/мл	средняя (10 <sup>8</sup> )	низкая (< 6×10 <sup>6</sup> )	низкая (< 6×10 <sup>6</sup> )	высокая, клеточные сфероиды
Разрешение, мкм	10–100	3–200	10–50	200–1000
Управление отдельными клетками	среднее	высокое	низкое	среднее
Производительность	средняя (200–1600 мм/с)	высокая (1–10000 капель/с)	высокая (100000 капель/с)	низкая (700 мм/с – 10 мкм/с)
Выживаемость клеток, %	>95	89,8	>85	80–90

Как вариант предлагается струйный принтер с использованием постоянно приложенного пневматического давления с набором электромеханических микроклапанов. Принтер работает с биоматериалами с вязкостью до 200 Па•с, и за счет регулировки давления в канале и длительности закрытия и открытия клапанов (до 200 мкс) можно изменять объем капель.

Другой тип струйной печати включает в себя электрогидродинамическое распыление (ЭГДР), которое связано с применением разности электрических потенциалов между положительно заряженной иглой и заземленным электродом для создания отталкивающей кулоновской силы. В ходе передачи заряженной среды от иглы в электрическое поле высокой интенсивности происходит выброс капли размером от микрометра до нанометра. ЭГДР эффективно при распылении концентрированных суспензий с помощью нескольких игл размерами в сотню микрометров, которые могут легко генерировать капли материала размерами от микрометра и меньше.

Размер капли при стандартной струйной печати составляет 10–50 мкм в диаметре, он примерно вдвое больше диаметра сопла. При этом объем капли может быть 1–100 пиколитров.

В струйной биопечати поверхностное натяжение является важ-

ным параметром, который определяет характер инжектирования материала — в виде капли или струи. Поверхностное натяжение уменьшается с увеличением концентрации клеток в биочернилах, поскольку все больше клеток адсорбируются на границе раздела жидкость–газ [14].

Методы гелеобразования (отверждения материала) основаны на физических, химических свойствах материалов, а также на использовании фотополимеризации для обеспечения устойчивости печатаемых объектов. Процесс отверждения должен происходить сразу после выхода материала из сопла при печати, в противном случае при более раннем отверждении (внутри печатающей головки) в сопле возникают закупорки, а при позднем — конструкция теряет форму.

К недостаткам метода относится негативное влияние на жизнеспособность клеток напряжения сдвига при отрыве капли от сопла головки. Как результат в струйных биопринтерах используются биочернила с низкой вязкостью (<10 мПа•с) и невысокой плотностью клеток (<10<sup>6</sup> клеток/мл) (рис. 4 и таблица 3) [15].

Несмотря на эти ограничения, струйные биопринтеры успешно применяются с хорошим разрешением (10–50 мкм) для осаждения клеток и работают с различными биочернилами.

## 2.2. Лазерная капельная биопечать

Метод биопечати без использования сопла (LIFT — laser-induced forward transfer), который включает в себя импульсный лазерный источник, донорный слой (состоит из поглощающего энергию лазера слоя золота или титана и слоя биочернил) и приемную подложку. Луч лазера фокусируется в точке на донорном слое, где образуется пузырь высокого давления за счет локального испарения биочернил, который в конечном итоге выбрасывает каплю материала на подложку. Объем капли от 10 до 7000 мкл, разрешение печати 10–100 мкм. Можно использовать биочернила высокой вязкости (1–300 мПа•с) с большой плотностью клеток (до 10<sup>8</sup> клеток/мл) [15]. Поскольку в данном методе не используется сопло для инжектирования материала, то снимаются проблемы с засорением сопел головок, а также с влиянием высокого напряжения сдвига на выживаемость клеток при отрыве клеток от сопла.

Другой метод биопечати без сопла использует поверхностные акустические волны, которые генерируются с помощью пьезоэлектрического эжектора. Последний представляет собой подложку из кварца, ниобата лития и др. с гребенкой из золотых колец на внешней поверхности подложки. Благодаря круговой геометрии

волн на границе раздела воздух–жидкость в микроканале создает акустическая фокальная плоскость, в результате воздействия акустического давления капли биочернил выбрасываются из микроканала. Капли имеют одинаковый диаметр в диапазоне от 3 до 200 мкм, размер капель устанавливается путем изменения длины волны акустического эжектора. Поскольку клетки в биочернилах при построении конструкции не подвергаются воздействию геометрии сопла, нагрева или высокого давления, то метод обеспечивает высокую выживаемость клеток при печати (> 89,8%). Используются биочернила с различными поверхностными натяжениями и вязкостью (рис. 4 и таблица 3) [15].

### 2.3. Экструзионная биопечать

Считается широко распространенным и экономически эффективным методом в биотехнологии. Она включает в себя систему дозирования (эжектор, один или несколько) и автоматизированную трехосевую роботизированную платформу. Существует три типа дозирующих систем: пневматическая, механическая (поршневая или винтовая) и микроэкструзия с использованием соленоида. На подложку вместо капель, как при струйной или лазерной печати, подается нить диаметром 150–300 мкм. Пневматический подход связан с применением сжатого воздуха для выталкивания нитей (с клапаном или без него). Благодаря контролируемому давлению и частоте импульсов конфигурация с клапаном является более точной по сравнению с конфигурацией без клапана. В отличие от пневматической системы, поршневая система обеспечивает прямой и более простой метод управления. Винтовая механическая система имеет более

точное управление и может работать с биочернилами с высокой вязкостью и высокой плотностью клеток, включая клеточные сфероиды (рис. 4, таблица 3). Однако большие перепады давления при этом могут разрушить клеточные мембраны [11].

Точное изготовление сложных конструкций, спроектированных с использованием САД, достигается за счет высокого разрешения систем микроэкструзии. Обычно для микроэкструзионной биопечати используют термически сшитые материалы и/или материалы, обладающие свойствами разжижения при сдвиге.

Новый подход к экструзионной печати «гель-в-геле» был предложен в работе [11]. Здесь основной материал – биочернила – экструдируются в поддерживающий материал – самозалечивающийся гель. Поддерживающий гидрогель деформируется при экструзии внутрь напечатанного каркаса и немедленно восстанавливается, заполняя весь внутренний объем. Механические свойства напечатанной конструкции можно улучшить, если добавить дополнительное сшивание за счет использования фотополимера в биочернилах. Кроме того, в сочетании с фотосшиванием, когда биочернила или гидрогель-носитель является фоточувствительным, можно создать автономные трехмерные структуры или структуры с пустотами путем вымывания неотвержденного гидрогеля. Этот метод печати «гель-в-геле» годится для печати нескольких материалов, и, поскольку гидрогели разжижаются при сдвиге, печать с клетками также обеспечивает их высокую жизнеспособность (> 90%).

Отличие еще одного метода экструзионной биопечати от экструзионной клеточной биопечати заключается в использовании летучих органических раствори-

телей для образования трехмерных структур. Исходный раствор с высокой вязкостью преобразуется в твердые трехмерные каркасы путем растворения полимеров из летучих органических растворителей. Здесь клетки полностью отделены от органических растворителей, они культивируются на поверхности каркаса для регенерации тканей/органов [11].

*Сильные стороны экструзионной биопечати:*

- обеспечивает равномерное распределение клеток вследствие их высокой плотности;
- экономит время;
- легкость в управлении;
- можно использовать широкий спектр биочернил, включая клеточные агрегаты, насыщенные клетками гидрогели, синтетические полимерные волокна, микроносители, децеллюляризованные матрицы;
- обеспечивает до 95% жизнеспособности клеток под воздействием различных факторов, таких как рабочее давление, размер сопла, сшивающие свойства гидрогелей.

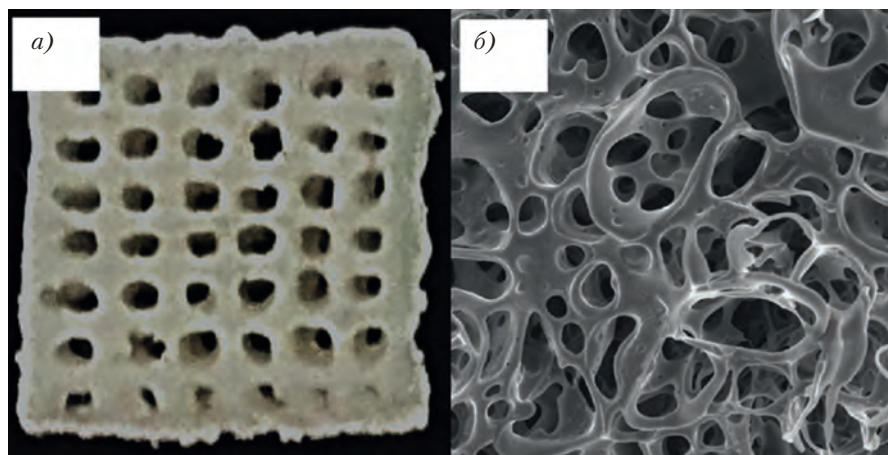
*К слабым сторонам экструзионной печати можно отнести следующее:*

- высокое давление сдвига, ограничивающее печать гидрогелей с клетками;
- ограниченный выбор материалов для печати;
- низкое в сравнении с другими методами разрешение печати (200–1000 мкм);
- степень выживаемости клеток (40–86%) находится в обратной зависимости от давления экструзии и размера сопла.

Соответственно повышение размера сопла и снижение давления может повысить производительность печати.

Микроэкструзионные биопринтеры были использованы для биопечати различных типов

Рис. 6. Вид пористой структуры ткани-каркаса:  
а) макроизображение, б) микроизображение



тканей, таких как клапаны аорты, разветвленные сосудистые структуры, фармакокинетика *in vitro* и модели опухолей [13].

#### 2.4. Биопечать на синтетической основе

В отличие от клеточной биопечати, бесклеточная 3D-биопечать (экструзионная и лазерная) имеет широкий спектр возможностей для выбора метода и материала. Бесклеточные биочернила могут быть использованы в вышеупомянутых методах клеточной биопечати для изготовления каркасов в тканевой инженерии, а 3D-биопечать тканей/органов может быть выполнена с помощью дополнительной техники посева клеток [11].

Технология послойного выращивания модели за счет укладки расплавленной нити полимера (**FDM-технология**) применяется при изготовлении каркаса в тканевой инженерии. В этом методе нить нагревают до температуры размягчения и через сопло выталкивают на подложку, на которой в соответствии с CAD-программой послойно выращивается модель.

Принтер включает в себя греющий блок с регулируемой температурой, головку с соплом для

подачи материала и систему перемещения головки. Используются два типа подачи материала — пневматический и механический.

#### Примеры построений каркасов по методу FDM:

1. В работе [16] рабочим материалом для трансплантата кости послужила смесь композитов поликапролактона (PCL), поли(молочно-гликолевой кислоты) (PLGA) и  $\beta$ -трикальцийфосфата и минерализованного ECM (внеклеточного матрикса).

2. Lee et al [17] использовали для регенерации тканей нанесенные в расплавленном состоянии и обработанные плазмой каркасы из PCL, на которые был нанесен хитозан различной молекулярной массы.

В работе [14] были исследованы внутренняя структура и механические свойства каркасов гидроксиапатит/поликапролактон (HA/PCL), полученных методом 3D-печати (FDM).

Каркасы должны обеспечивать поддержку поврежденной костной ткани и иметь поры размерами от 100 до 500 мкм, чтобы обеспечить остеоинтеграцию и транспорт питательных материалов. Для тестирования использовались материалы *micro* HA/PCL и *nano* HA/PCL (рис. 6), причем

результаты с *nano* HA/PCL получились более предпочтительными для производства костной ткани.

#### Достоинства метода FDM:

- простота эксплуатации,
- высокая скорость печати,
- широкий спектр синтетических биоматериалов, обладающих хорошими механическими свойствами и биосовместимостью (поли(капролактон) (PCL), поли(молочная кислота) (PLA), полиуретан и их производные).

#### Ограничения:

- требование высокой температуры для расплавления нити, которое делает среду неблагоприятной для клеток при биопечати каркасов.

Дешевые 3D-принтеры, работающие по технологии FDM (Maker Bot, Ultimaker, Flashforge и Prusa) имеют ограниченное применение из-за низкого разрешения печати и ограниченного набора используемых материалов в отличие от более дорогих и более совершенных 3D-принтеров Stratasys.

#### 2.5. Лазерная биопечать

##### 1. Биопечать на основе стереолитографии (SLA).

Техника стереолитографии с биопечатью впервые появилась в 1980-х годах. Послойное отверждение фотополимера происходит за счет облучения УФ-лампой проецируемого изображения слоя-маски в ванне или послойным отверждением сканирующим лучом лазера. Управлять процессом биопечати, в частности разрешением, можно за счет изменения длины волны, мощности, времени экспозиции и скорости сканирования, размера лазерного пятна, поглощения или рассеяния лазерного луча, а также концентрации фотоинициатора или любых поглотителей ультрафиолетового излучения [11].



Таблица 4

Виды технологий	Материалы	Достоинства	Недостатки
<b>Лазерная печать</b>	клетки в среде	высокая точность	низкая структурная целостность
		высокое разрешение (от 20 мкм), любые биочернила	долгое время подготовки и печати
		возможность печати с контролем до отдельной клетки	высокая стоимость и ограниченная доступность
<b>Струйная печать</b>	жидкости, гидрогели	высокая производительность (масштабируется)	низкая структурная целостность
		высокая жизнеспособность клеток	умеренная точность
		среднее разрешение (30 – 50 мкм), высокие механические характеристики	биочернила с низкой вязкостью (забиваются сопла)
<b>Экструзионная печать</b>	гидрогели, клеточные агрегаты	высокая структурная целостность	низкая точность
		короткое время печати	ограниченное количество используемых биоматериалов
		возможна одновременная печать нескольких материалов (100 мкм – 1 мм), высокая вязкость	клетки испытывают напряжение сдвига на конце сопла

Для проецирования изображения маски слоя используется цифровое микрозеркальное устройство обработки света (DLP), которое эффективно отверждает один целый 2D-слой. Поэтому по сравнению с процессом сканирования лазерным лучом проекционная печать маски изображения является более быстрой техникой.

Биопечать на основе SLA обычно использует несколько типов фотоотверждаемых биочернил, включая метакрилатные/акрилатные природные биоматериалы (желатин, гиалуроновая кислота, декстран и другие, полиэтиленгликольакрилат/метакрилат и его производные и метакрилат/акрилат, покрытый другими синтетическими полимерами [11].

Лазерная биопечать использует лазерный луч в качестве источника энергии для осаждения биочернил с клетками на подложку для получения высокоточных литых шаблонов. Метод позволяет эффективно осажать биочернила с высокой плотностью клеток и высокой вязкостью.

*Достоинства SLA-методов биопечати:*

- печать сложных структур с высоким разрешением;

- печать с высокой скоростью и за меньшее время;

- построение сложных структур без поддерживающих материалов;

- системы  $\mu$ SLA эффективны при создании элементов с малыми размерами (до 50 мкм), при этом размер наименьшего фрагмента может быть менее 5 мкм.

Недостатки SLA биопечати:

- образование свободных радикалов во время фотополимеризации, вызывающее потенциальное повреждение клеточной мембраны, белков и нуклеиновых кислот,

- меньшая доступность фотоотверждаемых материалов,

- дорогостоящее оборудование.

Техника стереолитографии также связана с изготовлением синтетических каркасов.

2. Другой метод лазерной печати каркасов включает **послойное селективное лазерное спекание (SLS)** различных материалов: керамики, металлов и композитов. Поддержкой является неспеченный порошок, из которого извлекается готовое изделие после построения, сам неспеченный порошок направляется для повторного использования. На ка-

чество построения влияют различные факторы: размер и форма частиц, плотность свободной упаковки, источник энергии и термодинамические изменения материалов. Диапазон разрешения от 20 до 100 мкм. К достоинствам SLS-метода можно отнести легкодоступность биоматериалов (обычно в виде порошков), но высокая стоимость оборудования, сложность и трудоемкость метода наряду с невысоким разрешением ограничивают применимость лазерной биопечати.

**3. Селективное термическое спекание (СВС)** — технология, связанная с использованием термопечатающей головки вместо лазера для послойного построения структур путем плавления поверхности порошкообразных термопластиков. СВС не нашла широкого применения в 3D-биопечати.

В таблицах 4, 4–1 представлены сравнительные характеристики основных технологий биопечати.

## 2.6. Электроспиннинг

В Университете штата Пенсильвания (Penn State University, США) открыли революцион-

Таблица 4-1. Сравнение методов 3D-биопечати, зависимых и не зависимых от биоматериалов

	Зависимые от биоматериалов		Не зависимые от биоматериалов	
	характеристики	комментарии	характеристики	комментарии
Конфигурация объекта	напрямую из CAD	напрямую из CAD	примерно соответствует модели	большой размер «voxel», ограниченное разрешение
Структурная когезия (склеивание)	дорогие, не универсальные биочернила, часто патентованные	появление новых биочернил (на основе коллагена или фибрина)	клетки создают свою собственную матрицу; структура определяется типом и качеством клеток	полученная матрица может быть непредсказуемой или несоответствующей
Биомеханика	гидрогели достаточно мягкие, отверждение может повредить клетки	«гибридная» биопечать как альтернатива	механика структуры менее предсказуема и не поддается контролю	«гибридная» биопечать как альтернатива
Эффективность	существенный уровень гибели клеток по разным причинам	использование более мягких методов печати, например, лазерных	отсутствие или незначительная гибель клеток, зависит от типа клеток	при использовании больших сфероидов производительность сравнима или превосходит лазерную печать
Клеточное взаимодействие	ограниченное	не проблема для тканей с матрицами (кости, хрящи)	прямое клеточное взаимодействие	опционно — добавка гидрогелей внутрь или между сфероидами
Структура ткани	простая клеточная архитектура	растворение биоматериала позволяет более спонтанно перестраивать клетки	следует принципам развития	внедрение эндотелиальных клеток способствует микроваскуляризации
Биосовместимость	возможны цитотоксичность, реакция на инородное тело	менее значимо при использовании биологических чернил	запатентованные клетки: MSC, iPSC	возможны полностью аутологичные конструкции
Общие технические проблемы	засорение сопла	ограничения для струйной и микроэкструзионной печати	требуется время для предпечатной подготовки	время выращивания конструкции после печати сопоставимо с другими методами
Масштабируемость	высокая	хорошая для больших матричных тканей с гомогенными клетками	ограничена	рекомендуется для тканей малых размеров с гетерогенными клетками, с низкой долей клеточных матриц

ный способ печати тканей и органов [18] — электроспиннинг (electrospinning, ES) — метод переплетения полимерных волокон с клетками для создания каркасов на основе коллагена при выращивании тканей (рис. 7). Эта технология более дешевая и обеспечивает хорошую точность и больший контроль над строящимися каркасами. Так, ученые из Rice's Brown School of Engineering [19] в отделе биоинженерии смогли напечатать орган, который имитирует легкие.

Justin Brown, один из авторов исследования, пояснил: «Мы

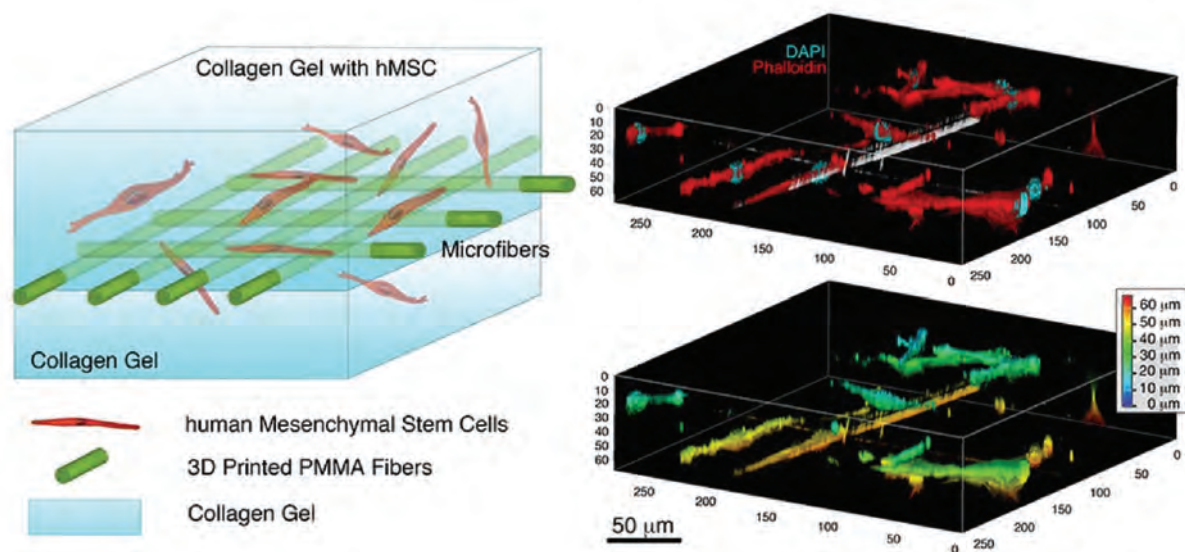
пытаемся сделать гидрогели со стволовыми клетками, армированными волокнами аналогично арматуре в цементе. Если мы сможем придать гелю некоторую структуру, мы сможем выращивать живые клетки определенным образом, и в конечном итоге волокна растворятся и исчезнут».

Многие из проблем, указанных в таблице 4, 4–1, можно было бы устранить, если бы была доступна сборка клеточных конструкций без биоматериала (т.е. бескаркасная сборка). Было предложено использовать только клетки и матрицы, в которых они находятся.

В частности, применялись неорганические материалы, например, гидрогели, в виде цилиндрических нитей с клетками внутри, которые разрезались на короткие фрагменты и повторно использовались для печати структур. При этом вспомогательные материалы (гидрогелевый каркас) удалялись [20].

Другой пример — подготовка длинных клеточных цепочек в трубках из альгината (гидрогелевый каркас), каркас затем удаляется, а подготовленный клеточный материал используется для биопечати с помощью экструзионного

Рис. 7. Каркасы из волокна (microfibers) по методу электроспиннинга с гидрогелем с коллагеном (collagen) и стволовыми клетками человека (hMSC)



принтера. Основная задача в этом методе — использование клеток, подготовленных специальным образом: в виде блоков, сфероидов, клеточных листов или цилиндров, собранных во внеклеточной матрице [21].

Использование сфероидов в качестве строительных блоков в биопечати позволяет создавать крупные конструкции, которые живут по тем же законам биологии, что и сфероиды, в отличие от ограничений, существующих для биоматериалов.

Интересное решение было предложено для биопечати сложных структур (например, таких, как клапаны) — использование свойств магнитной левитации. В этом методе клетки собираются в тканевой культуре на поверхности жидкости, а не на ее дне. Поскольку процедура помещения сфероидов в нужное место довольно затруднительна, было предложено использовать магнитную биоручку, с помощью которой можно манипулировать сфероидами [22].

## 2.7. Метод Kenzan

Метод Kenzan (рис. 5а) разработан в Японии (компания Cyfuse Biomedical K. K., принтер Regenova

рис. 8) для пространственной организации сфероидов с использованием микроигл. В основу метода положено искусство икебана. Размещенные с помощью робота сфероиды на микроиглах создают внеклеточную матрицу, где сфероиды могут взаимодействовать друг с другом. Иглы из нержавеющей стали толщиной 160 мкм размещены в виде матрицы (например, 9×9 или 26×26 игл) на расстоянии 500 мкм. Сфероиды должны иметь диаметр 400–600 мкм и содержать не менее 20000 клеток.

### Особенности метода Kenzan:

- размер сфероидов определяется расстоянием между иглами, чтобы обеспечить их контакт между собой. Поэтому важно уметь получать сфероиды нужного размера;

- другая причина ограничения размеров сфероидов связана с пределом диффузии кислорода (200 мкм) и питательных веществ.

Преимуществом метода Kenzan является сходство с некоторыми аспектами биологии развития опухолей, которые обычно игнорируются или не учитываются при биопечати с использованием биочернил. В сфероидах задействованы многие известные

биофизические и биологические механизмы, которые могут быть рационально включены и более эффективно использованы для целей тканевой инженерии.

Метод Kenzan реализован в биопринтере Regenova (рис. 8). Принтер имеет блок хранения сфероидов (два магазина по 10 планшетов с 96 гнездами каждый) и рабочий магазин для транспортировки планшетов. Изображения сфероидов в планшетах и кончиков игл анализируются специальным софтом для проверки качества, гнезда с несоответствующими по форме и размерам сфероидами не используются при печати. Набор игл хранится в стерильном резервуаре. Подвижная головка со сфероидом перемещается в нужное положение, устанавливается над иглой и насаживает сфероид на иглу. Можно создавать конструкции с заранее разработанными сфероидальными слоями высотой в 10 мм и более. Затем процесс повторяется, так что заполнение одного планшета сфероидами занимает до 20 минут. Держатели массива игл имеют сквозную полость внутри для прокачки питательного раствора и могут легко сниматься. Головка при необходимости может очищаться продувкой воздухом.

С помощью биопринтера Regenova были выращены сосуды диаметром 5 мм и длиной 20 мм с использованием человеческих эндотелиальных клеток, гладкомышечных клеток и фибробластов (рис. 9). Они показали достаточные биомеханические свойства, чтобы выдерживать хирургические манипуляции, и показали хорошую приживаемость после имплантации крысам.

Похожая технология была

предложена исследователями из Государственного колледжа штата Пенсильвания, США — метод aspiration-assisted bioprinting (ААВ), когда ткани выращивают за счет точной установки сфероидов в систему из предварительно изготовленных каркасов либо просто при формировании объема из сфероидов (рис. 9).

## 2.8. Электрогидродинамический метод

Еще один перспективный метод биопечати — электрогидродинамический 3D-принтер (ЕНД) высокого разрешения [23, 24], в котором жидкие чернила в электростатическом поле способны образовывать капли или струю, размеры которых меньше диаметра сопла. Максимальная высота печати модели была ограничена расстоянием между срезом сопла и подложкой, поскольку необходимо сохранять однородное

а)

### Этап 3

#### Созревание

Культура 3D напечатанной ткани в биореакторе, чтобы способствовать самоорганизации клеток, пока ткань не представит желаемую функцию и силу

### Этап 2

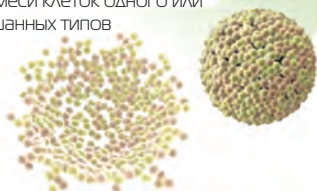
#### 3D-печать по методу "Kenzan"

Сборка клеточных сфероидов на принтере Kenzan в виде трехмерного объема в соответствии с компьютерной моделью

### Этап 1

#### Подготовка сфероидов

Из смеси клеток одного или смешанных типов



б)

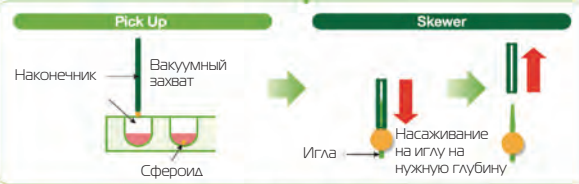
#### 01 Подготовка сфероидов

#### 02 Моделирование

#### 03 3D-печать на Kenzan



9x9 Kenzan После печати



#### 04 Созревание



Созревание сразу после удаления из принтера После созревания

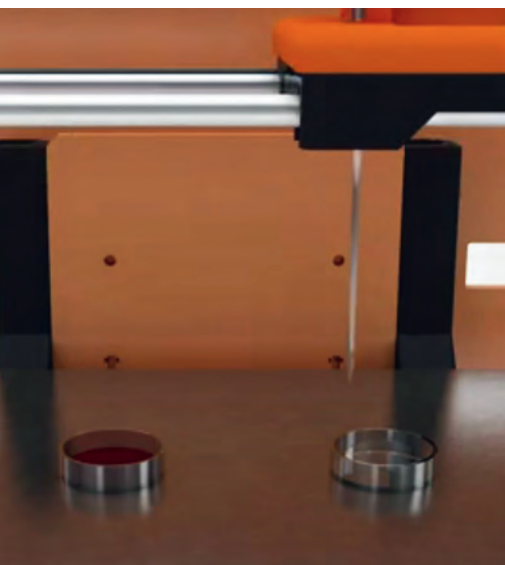
#### Возможные различные подходы



в)



Рис. 8. Биопринтер Regenova:  
а) основные этапы выращивания готовых тканей,  
б) технологический процесс с использованием принтера Kenzan,  
в) внешний вид

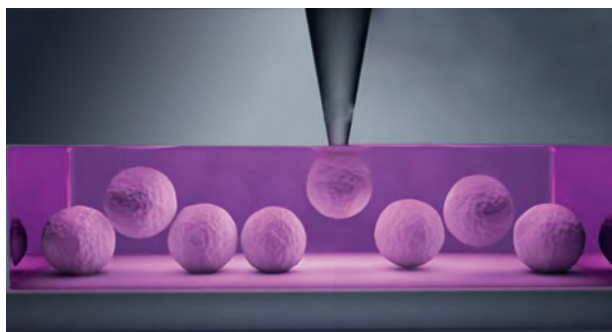


в)

Рис. 9. Метод АВВ: а) сфероид с помощью пипетки помещается на отпечатанную на биопринтере подложку; б) сфероиды в виде отпечатанной на биопринтере модели без каркаса; в) сфероиды могут быть впечатаны на биопринтере в каркас при изучении лекарств или моделирования заболевания; г) сфероиды создают сеть капилляров для снабжения ткани кислородом и питательными веществами. Фото: Университет штата Пенсильвания (Penn State)

а)

б)



г)

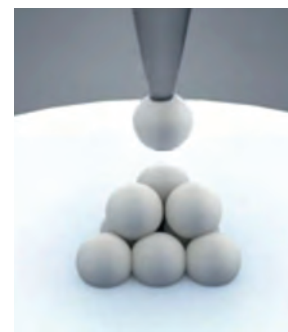
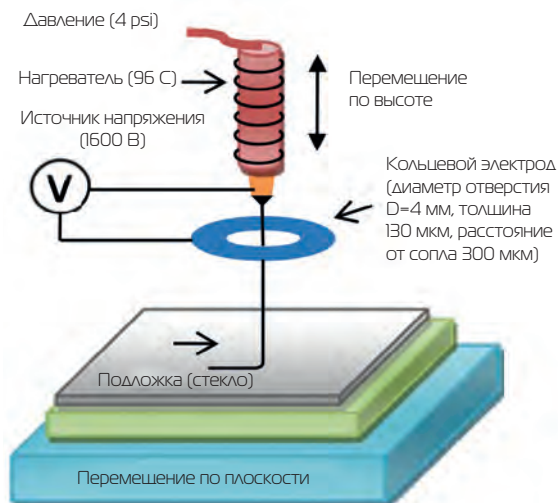


Таблица 5. Компании на мировом рынке (2019 год), имеющие отношение к биопроизводству

Компания	Страна	Главный продукт/активность	Уровень технологической готовности	Год основания
Osteopore	Singapore	Биопечатаемые биоразлагаемые имплантаты	9	1996
Organovo	USA	Биопечатаемые тканевые модели	9	2007
Cyfuse Biomedical	Japan	Платформа для создания клеточных сфероидов	9	2010
Modern Meadow	USA	Биопечатаемая кожа	4	2011
AlephFarms	Israel	Биопечатаемое мясо	4	2017
Future Meat Technologies	Israel	Биопечатаемое мясо	4	2018
Memphis Meat	USA	Биопечатаемое мясо	4	2015
Mosa Meat	Netherlands	Биопечатаемое мясо	4	2015
Nano3D	USA	Технология магнитной биопечати	9	2008
Allevi	USA	Производитель биопринтеров	9	2014
Cellink	Sweden	Производитель биопринтеров	9	2016
Aspect Biosystems	Canada	Производитель биопринтеров	9	2009
3D Bioprinting Solutions	Russia	Производитель биопринтеров	9	2013
Rokit	South Korea	Производитель биопринтеров	9	2007
Regemat	Spain	Производитель биопринтеров	9	2011
RegenHU	Switzerland	Производитель биопринтеров	9	2007
Envisiontec	Germany	Производитель биопринтеров	9	2002
GeSim	Germany	Производитель биопринтеров	9	1995

Рис. 10. Схема EHD 3D-принтера



электростатическое поле. Для большинства подобных принтеров нижний электрод заземления был расположен под подложкой. Были предложены различные решения с расположением электродов: а) в виде двух параллельных слоев с изолятором между ними, б) лучшее решение — в виде кольца, интегрированного в головку с соплом (рис. 10).

При напряжении в 1600 В между электродами начало инжектирования капель определяется расстоянием кольца от среза сопла (в среднем 2,5 мм).

При этом разрешение печати составило примерно 10 мкм (для материала PCL).

Основные игроки на рынке оборудования и услуг для биопроизводства представлены в таблице 5.

Примеры растущего использования аддитивных технологий в биопроизводстве будут представлены во второй части статьи, а различные аспекты применения АМ, включая стандартизацию, социальные проблемы, а также тенденции развития будут рассматриваться в третьей части. ■

#### Литература

- Principles of the Kenzan Method for Robotic Cell Spheroid-Based 3D Bioprinting Nicanor I. Moldovan, Narutoshi Hibino and Koichi Nakayama Tissue Engineering © Mary Ann Liebert, Inc. DOI: 10.1089/ten.TEB.2016.0322.
- F. A. Probst, et al. Calvarial reconstruction by customized bioactive implant Handchir. Mikrochir. Plast. Chir., 42 (2010), Pp. 369–373.
- J. U. Lind, et al. Instrumented cardiac microphysiological devices via multimaterial three-dimensional printing. Nat. Mater., 16 (2017), Pp. 303–308.
- K. A. Homan, et al. Bioprinting of 3D convoluted renal proximal tubules on perfusable chips. Sci. Rep., 6 (2016), Article 34845.
- Article R (2018) 3D-Bioprinting: A stepping stone towards enhanced medical approaches. Advancements in Life Sciences 5: 143–153. Link: <https://bit.ly/2LCYZ0r> (<https://bit.ly/2LCYZ0r>).
- M. J. Pavlovich, et al. Biofabrication: a secret weapon to advance manufacturing, economies, and healthcare. Trends Biotechnol., 34 (2016), Pp. 679–680.
- M. Itoh, K. Nakayama, R. Noguchi, K. Kamohara, K. Furukawa Scaffold-free tubular tissues created by a Bio-3D printer undergo remodeling and endothelialization when implanted in rat aortae. PLoS One, 10 (2015), Pp. 1–15.
- Y. Yanagi, K. Nakayama, T. Taguchi, S. Enosawa, T. Tamura, K. Yoshimaru, T. Matsuura, M. Hayashida, K. Kohashi, Y. Oda, T. Yamaza, E. Kobayashi In vivo and ex vivo methods of growing a liver bud through tissue connection. Sci. Rep., 7 (2017), p. 14085.
- 3D Bioprinting: An attractive alternative to traditional organ transplantation. Darakhshanda Iram, Rafi a Riaz and Rana Khalid Iqbal. Biomed Sci Eng (<https://www.peertechz.com/journals/archive-of-biomedical-science-and-engineering>).
- M. B. Applegate, J. Coburn, B. P. Partlow, et al. Laser-based three-dimensional multiscale micropatterning of biocompatible hydrogels for customized tissue engineering scaffolds. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 112 (2015), Pp. 12052–12057.
- Cui H, Nowicki M, Fisher JP, Zhang LG (2018) 3D Bioprinting for Organ Regeneration. Adv Healthc Mater 6: 1–54. <https://bit.ly/2Nwna2W>
- <http://stemcell.childrenshospital.org/about-stem-cells/glossary/#embryonicstemcell>
- Murphy SV, Atala A (2014) 3D bioprinting of tissues and organs. Nat Biotechnol 32: 773–785. (<https://bit.ly/2LCoZsH>).
- Xu C, Zhang M, Huang Y, Ogale A, Fu J and Markwald R R 2014 Study of droplet formation process during drop-on-demand Inkjetting of living cell-laden bioink Langmuir 309130–8.
- L.-B. Mao, H.-L. Gao, H.-B. Yao, H. Cölfen, G. Liu, S.-M. Chen, S.-K. Li, et al. Synthetic nacre by predesigned matrix-directed mineralization Science, 354 (2016), Pp. 107–110.
- Pati F, Song T, Rijal G, Jang J, Won S, et al. (2014) Ornamenting 3D printed scaffolds with cell-laid extracellular matrix for bone tissue regeneration. Biomaterials 37: 230–240. <http://bit.ly/2RSVJz3>
- KyoungHo Lee GK, Jin GH, Jang CH (2013) Preparation and characterization of multi-layered poly ( $\epsilon$ -caprolactone)/chitosan scaffolds fabricated with a combination of melt-plotting/in situ plasma treatment and a coating method for hard tissue regeneration. J Mater Chem B 1: 5831–5841. <https://rsc.li/2XKB859>
- <https://all3dp.com/researchers-find-new-ways-3d-print-living-tissues-organs/>
- [www.popularmechanics.com/science/health/a27355578/3d-print-lungs/](http://www.popularmechanics.com/science/health/a27355578/3d-print-lungs/)
- Nguyen DG, Funk J, Robbins JB, Crogan-Grundy C, Presnell SC, Singer T, Roth AB. Bioprinted 3D Primary Liver Tissues Allow Assessment of Organ-Level Response to Clinical Drug Induced Toxicity In Vitro. PLoS One 2016;11: e0158674.
- Yu Y, Ozbolat IT. Tissue strands as «bioink» for scale-up organ printing. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc 2014; 2014:1428–1431.
- Tseng H, Balaoing LR, Grigoryan B, Raphael RM, Killian TC, Souza GR, Grande-Allen KJ. A three-dimensional coculture model of the aortic valve using magnetic levitation. Acta Biomater 2014; 10:173–182.
- Han Y, Dong J. Design of Integrated Ring Extractor for High Resolution Electrohydrodynamic (EHD). 3D Printing Procedia Manufacturing Volume 5, 2016, Pages 1031–1042.
- Han Y, Wei C, Dong J. Droplet formation and settlement of phase-change ink in high resolution electrohydrodynamic (EHD) 3D printing. Journal of Manufacturing Processes 2015; 20 (3): 485–491.

# 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@gardes mash.com](mailto:ritm@gardes mash.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@gardes mash.com](mailto:ritm@gardes mash.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)

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ФОРУМ «АРМИЯ-2020»**

**23–29 АВГУСТА  
ПАТРИОТ ЭКСПО**

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

ВЫСТАВОЧНЫЙ  
ОПЕРАТОР



**МКВ**

МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ