

LOGEEKS^S DM

3D-печать

Обработка с ЧПУ

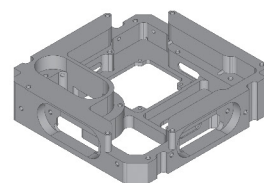
Мелкосерийное литьё

Обработка листового материала



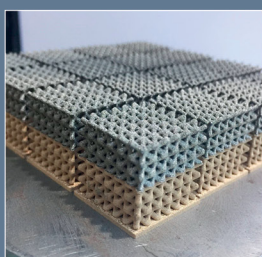
+ Загрузите файл

.STEP



Получите анализ технологичности, мгновенную оценку стоимости и срок изготовления

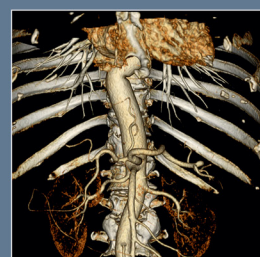
LOGEEKS DM — самый простой способ получить нестандартные детали



3D-печать полиметаллами. Вы готовы?
28



3D-печать в строительстве: что нового?
40



Формирование цифровых моделей для аддитивного производства в медицине
52

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ
АДДИТИВНЫХ УСТАНОВОК

ПЕРВЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ SLS 3D-ПРИНТЕРЫ



Onsint SM400



Onsint SM300

Установки лазерного порошкового спекания (SLS)

Линейка 3D-принтеров:

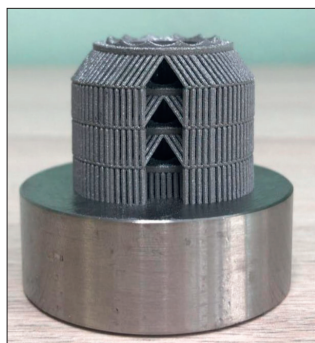
- ➔ «настольная» Onsint SM200
- ➔ «промышленная» Onsint SM300
- ➔ «высокопроизводительная» Onsint SM400



Onsint SM200



10



12



37

СОДЕРЖАНИЕ

- 2** Вопрос поставлен, ответа пока нет
- 4** Аддитивные технологии для ключевой отрасли
- 6** Экосистема аддитивного производства
Imprinta Additive Manufacturing Platform
- 10** Единственные в России
- 12** Технологическая подготовка аддитивного производства
в ПО «Глайсер»
- 16** Возможности аддитивных технологий применительно
к изделиям ответственного машиностроения
- 24** Определение направлений применения технологии
селективного лазерного сплавления при создании изделий РКТ
- 28** 3D-печать полиметаллами. Вы готовы?
- 37** Автоматизированная постобработка полиамида:
новый подход к 3D-производству медицинских изделий
- 40** 3D-печать в строительстве: что нового?
- 52** Формирование персонифицированных цифровых моделей
для аддитивного производства в медицине

Издатель ООО «ПРОМЕДИА»

директор О. Фалина

главный редактор
М. Копытина

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

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

отдел рекламы
т/ф (499) 55-9999-8

АДРЕС: 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.

Вопрос поставлен, ответа пока нет

Зинаида Сацкая

Продолжаем знакомить читателей с перспективами внедрения аддитивных технологий в различные отрасли промышленности глазами участников лидер-форума «Аддитивные технологии». Сегодня расскажем о сессии «АТ в машиностроении: когда мы будем печатать машины целиком?»



До обсуждения вопроса, вынесенного в название сессии, разговор так и не дошел, но и с промежуточными изделиями, как показало мнение экспертов, тоже не все просто. Кроме того, корректности ради надо отметить, что на сессии были представители разных отраслей, но они говорили только о практике своих предприятий, из чего все-таки нельзя было видеть картину использования АТ в той или иной отрасли в целом.

Зависимость от импорта

Первым вопросом, который задала модератор сессии, советник президента АО «ТВЭЛ» Ольга Оспенникова, был вопрос о степени зависимости нашей аддитивной индустрии от иностранных поставщиков оборудования и материалов.

Михаил Турундаев, генеральный директор «Русатом — Аддитивные технологии» (ООО «РусАТ»), начал с информации о мировом и российском рынке аддитивных технологий. Мировой объем рынка АТ примерно 12 млрд долл. США, и продолжается рост. В России объем рынка пока 4 млрд рублей, что составляет около 1% мирового объема. «К сожалению, — говорит Михаил Турундаев, — 90% оборудования, если не больше, иностранного производства». Это, по его словам, и хорошо, и плохо. С одной стороны, потребители научились на оборудовании работать, почувствовали вкус к аддитивке, с другой — российский производитель должен конкурировать с теми, кто стартовал на десятки

лет раньше. Тем не менее, по мнению представителя атомной отрасли, мы сможем переломить тенденцию с потреблением внутри страны и выйти на зарубежные рынки. Отечественная продукция на рынке уже есть, на выставке «Росмолд» можно было видеть большое количество пластиковых принтеров, что понятно, поскольку печать пластиком в мире преобладает. «РусАТ» уже представил модели металлических принтеров разных размеров, и стоит задача обеспечить конкурентоспособное качество печати изделий.

Антон Аношкин, специалист 1 категории группы экспериментальных технологий ПАО «КамАЗ», тоже говорил о зависимости от импортных технологий и материалов, предлагаемых производителями оборудования. От оригинальных материалов нельзя отказаться, не потеряв гарантию. А вот опытное производство таких ограничений не имеет.

Руководитель проекта отдела инноваций и технического развития АО «ОСК» Александр Прохода в свою очередь отметил, что два металлических принтера, которые эксплуатируются в Подмоскowie и Северодвинске, работают исключительно на отечественных материалах.

Созданием собственного оборудования занимается НПО «Техномаш». Советник генерального директора Валерий Семенов рассказал, что предприятие делает новые станки и обрабатывает технологии для аддитивного производства. Совместно с петербургским Университетом Петра Великого создавали принтер для печати больших створок солнечных батарей. Была сделана установка с рабочим столом 3×3 метра. Сейчас предприятие создало и обрабатывает большой станок прямого лазерного выращивания с одновременной механической обработкой для изготовления деталей 500×400×800 мм. Установка позволяет делать мехобработку, а затем доращивание. По словам Валерия Семенова, отечественных аналогов нет.

Импортозависимость для предприятия также существует. Потребители хотят видеть только импортные системы управления. На оборудовании должно быть точное и жесткое позиционирование, хорошие, обеспечивающие повторяемость приводы и системы обработки сигналов. В то же время недостатка в отечественных поставщиках порошков предприятие не испытывает.

Участники сессии были единодушны во мнении, что АТ сегодня на подъеме, они меняют облик промышленности. Ольга Оспенникова тем не менее, считает, что внедрение АТ во всех отраслях идет сложно. Причину она видит в том, что конструкторам непросто отказаться от традиционных подходов к проектированию деталей и переходить к проектированию с учетом особенностей АТ. Антон Аношкин более оптимистичен и препятствий со стороны конструкторов не видит. По его словам, «стоит конструкторам один раз попробовать и посмотреть, что получается, они войдут во вкус». С ним согласен Кирилл Казмирчук, начальник отдела перспективных технологий и развития НАМИ: «Наши конструкторы тоже распробовали АТ, скорость изготовления деталей увлекает». Единственная сложность возникает с конструированием изделий для печати металлом, когда речь идет о более наукоемких деталях и действительно требуется отказаться от традиционного подхода.

Александр Прохода отметил, что первоочередная задача производства — это обеспечение гарантированных свойств материалов для тех или иных изделий, а «аддитивное производство сегодня, к сожалению, пока не может дать прогнозируемых свойств. Соответственно и представители заказчика, наверное, не будут пока брать на себя ответственность за возможный выход изделий из строя, особенно если речь идет о подводном судостроении».

Михаил Турундаев заметил, что в атомной отрасли дело, скорее, не в консерватизме конструкторов, а в консерватизме изделий. Они же ставятся в атомные реакторы, и здесь приходится долго отмерять, чтобы один раз отрезать. «Напечатать изделие и подтвердить все его свойства — это только полдела. Теперь изделие надо поставить на год или дольше в реактор, чтобы оно поработало в реальных условиях, посмотреть, как оно себя ведет в жесточайших условиях реактора. И это тоже не значит, что, пройдя все испытания, изделие тут же можно запускать в серию и ставить в активную зону реактора. Предстоит еще пройти все процессы аттестации и сертификации». И это стало новым поворотом темы внедрения АТ.

Нормативная база

По словам Михаила Турундаева, «абсолютно любая отрасль промышленности, прикасаясь с АТ, понимает, что недостаточна нормативная база, хотя внедрено уже огромное количество стандартов». Валерий Семенов согласился, что сертификация — это один из основных вопросов, который «пронизывает все этапы создания того или иного изделия. Помимо государственных стандартов требуются отраслевые, и мы их создаем».

Сергей Павлов, заместитель директора НИИПМ АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», заметил, что с гражданской продукцией проблем меньше: «Мы активно используем песчано-полимерные формы для литейного производства, для изготовления опытных деталей. Что касается военной продукции, то у нас нет четкого понимания, каким образом оценить качество деталей и изделий, изготовленных с помощью АТ. Нет специализированных ГОСТов, которые определили бы тот объем испытаний, который необходим для оценки качества тех или иных деталей».

Антон Аношкин, в свою очередь, считает, что невозможно в одном государстве работать по разным стандартам, которые актуальны только для одного предприятия.

Чего ждут от государства

В этом вопросе не обошлось без ссылки на зарубежный опыт. В частности, Михаил Турундаев сказал, что видит роль государства на примерах мировых лидеров. Например, «США уже долгие годы ежегодно инвестируют в аддитивку по 10 млрд долларов. Правительство страны решило, что необходимо развивать эту важную технологию. В Китае примерно та же история. Аддитивку приняли как национальную программу несколько лет назад, и инвестируют порядка 80 млрд долл. Мы бы хотели, чтобы нас здесь тоже поддержали. Наше отставание нужно срочно сокращать».

Как участники сессии видят способы государственной поддержки? Михаил Турундаев видит поддержку в части финансирования НИОКР, материалов, принтеров, необходимых в различных отраслях, чтобы нагнать отставание.

Александр Прохода за открытие целенаправленных опытно-конструкторских работ, которые привязаны к конкретному изделию, конкретному проекту корабля. «Это было бы оптимальным путем, но для этого нужен заказ от государства, а от Минобороны как представителя государства такого заказа пока не поступало». В то же время, по мнению Александра Прохода, открытие комплексных ОКРов могло бы создать нормативную базу, материалы, технологии, оборудование.

Антон Аношкин, согласившись, что от государства было бы интересно получать какие-то субсидии или налоговые льготы за использование аддитивного оборудования в производственном процессе, все же считает, что было бы правильно поддержать образование. «Того количества качественных специалистов, которое сейчас есть, недостаточно для массового внедрения АТ в промышленность».

Тема действительно важная, и о том, как происходило обсуждение этой темы на лидер-форуме, мы рассказали в предыдущем выпуске журнала «Аддитивные технологии». ■

Зинаида Сацкая

Возвращаемся к лидер-форуму «Расширяя горизонты», посвященному аддитивным технологиям. Сегодня расскажем о панельной дискуссии «Аддитивные технологии в нефтегазовой отрасли».

Объективно нефтегазовая отрасль является ключевой для российской экономики, и ее же считают флагманом в процессе внедрения инновационных аддитивных технологий. Но первый же поставленный вопрос, который задал модератор сессии Данар Подкопаев, руководитель направления аддитивных технологий в ООО «Газпромнефть — Цифровые решения», прозвучал довольно неожиданно: «Зачем нефтегазовой отрасли аддитивные технологии?»

Роман Тихонов, начальник отдела развития АТ «Сибур Холдинг», свой ответ начал с вызовов, которые возникли перед нефтегазовой и нефтехимической отраслью. Это прежде всего возможность отойти от возникших санкционных барьеров, что диктуется именно важностью этих отраслей для российской экономики. Когда возникают проблемы с поставками запасных частей, поиск решений приводит к аддитивным технологиям. Сейчас АТ располагают серьезным оборудованием. Оно позволяет выпускать те же запчасти в короткие сроки и с теми свойствами, которые раньше были невозможны.

Михаил Гладких, руководитель по технологиям Baker Hughes, Хьюстон, в свою очередь, тоже отметил возможность преодолеть вызовы в цепочке поставок. Например, длительное время поставки запчастей от вендоров может привести к замедлению всех процессов, а с аддитивными технологиями эту острую проблему можно снять сразу же.

Драйвером развития аддитивных технологий некоторые участники дискуссии видят желаемый эффект от их внедрения, снижение затрат: чем лучше эффект, тем более активно будут использоваться аддитивные технологии. Другие полагают, что драйверами будут такие крупные компании, как «Газпромнефть» и «Сибур», потому что у них большие объемы выпускаемой продукции, большой парк оборудования, больше накопленной информации о том, какие требования предъявляет к аддитивным технологиям сама специфика нефтехимического оборудования.

Оценивая перспективы, Олеся Хафизова, старший инженер EMEA Sandvik Educate Manufacturing, говорит, что перспективными будут автоматизированные системы, печать без участия человека. В первую оче-

редь, по ее мнению, это касается металлических компонентов.

Перспективным представляется уходить от складского отягощения, а вместо этого иметь готовый материал, из которого можно изготовить нужные детали.

Михаил Перевозчиков, директор по технологиям развития бизнеса аддитивного производства Oerlikon, считает, что будущее отрасли зависит от производителей 3D-принтеров.

Участники дискуссии сошлись во мнении, что в нефтегазовой отрасли будущее за новыми материалами с повышенной коррозионной и эрозионной стойкостью. Они отмечают, что по этой причине композитные материалы постепенно теснят металлические сплавы. Представитель «Сибур» считает, что надо расширять номенклатуру материалов и технологий, уйти в керамику и металл и повторить успех, которого добились, работая с пластиками. По мнению Олеси Хафизовой, надо улучшать механические свойства, не изменяя сам материал.

Эксперты отмечают, что доля технологии binder jetting во всех процессах аддитивного производства увеличивается, и видят большой потенциал технологии для производства запчастей, что, кроме прочего, должно повлечь за собой создание мобильных цехов для ремонта, и сокращение логистических цепочек.

В России уже больше 20 принятых стандартов, движение есть, но нормативных материалов явно недостаточно. У крупных российских компаний нефтегазового сектора есть свои стандарты и свои ограничения по сертификации. Но каждой компании разрабатывать свои стандарты — это путь в никуда. Процесс разработки стандартов долгий. Но если, преследуя одни и те же цели, объединять усилия, то прогресс в этом деле будет очевиднее.

Барьером на пути внедрения аддитивных технологий в нефтегазовой отрасли участники дискуссии назвали консерватизм в отрасли, боязнь новых материалов и технологий. Другим барьером Олеся Хафизова назвала недостаток материалов для 3D-печати. Сегодня есть не более 40 металлических материалов, для которых разработаны параметры печати. На разработку параметров 3D-печати для одного материала может уйти от 6 до 12 месяцев, что не только долго, но и затратно. Разработка материалов, оборудования и стандартов должна быть областью совместных усилий. Важно не бояться делать ошибки. Отрицательный результат — это тоже результат. ■

Alloy 718

Gr5

ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ЭП962НП

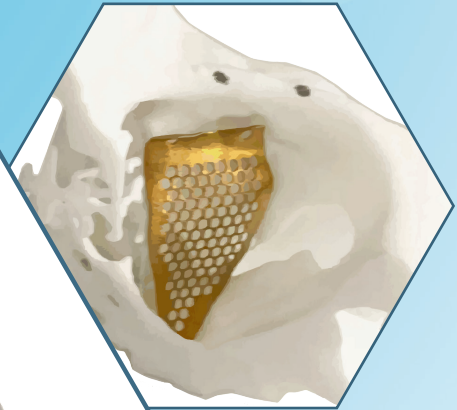
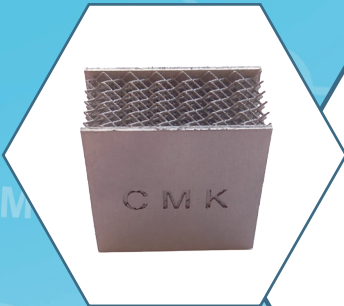


Ni

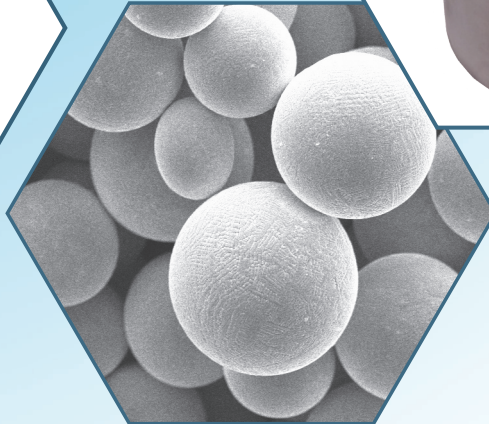
Ti

ЭП741НП

BT6



Alloy 625M



АО «Ступинская металлургическая компания»
Россия, Московская обл., г. Ступино,
ул. Пристанционная, вл. 2
+7 (495) 598 50 00 доб. 4001/4002

Экосистема аддитивного производства Imprinta Additive Manufacturing Platform

Все больше компаний при создании каких-либо изделий обращаются к аддитивным технологиям. 3D-принтеры внедряются в производственные циклы наравне с традиционными станками.

При подборе оборудования компании в первую очередь подбирают принтеры, которые позволяют изготавливать изделия нужных им размеров и необходимыми материалами. Но также оцениваются потенциальные задачи, функционал оборудования, возможность расширения парка оборудования и его совместимость друг с другом.

Обычно производители принтеров занимают определенный сегмент, а следовательно, не происходит взаимного дополнения оборудования, что влечет за собой дополнительные расходы на ПО, обучение персонала, приобретение запасных частей для ремонта оборудования.

С 2022 года компания «ИМПРИНТА» изменила стратегию производства оборудования, чтобы создать экосистему аддитивного производства — Imprinta Additive Manufacturing Platform. Экосистема включает в себя:



- FDM 3D-принтеры Hercules Series,
- расходные материалы Clotho Filaments,
- систему менеджмента 3D-печати Diaprint Suite.

Линейка 3D-принтеров Hercules Series включает в себя как десктопные принтеры с пассивной каме-

Основная идея новой стратегии

Создание экосистемы

Imprinta Additive Manufacturing Platform

Что такое Imprinta Additive Manufacturing Platform

В Imprinta AMP входят:

FDM 3D-принтеры Hercules Series

Расходные материалы Clotho Filaments

Система менеджмента 3D-печати Diaprint Suite

Ключевые поинты

Полная внутренняя
совместимость

Широкий выбор
решений под 95%
FDM задач

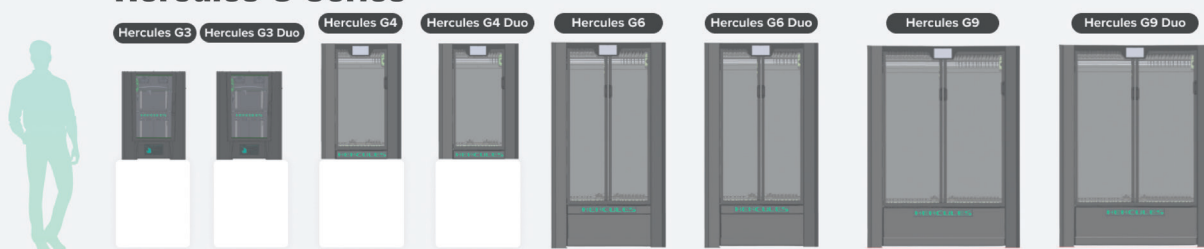
Открытый вход
для сторонних
материалов для
спец.задач клиентов

Кастомизация
материалов внутри
бренда для
спец.задач клиентов

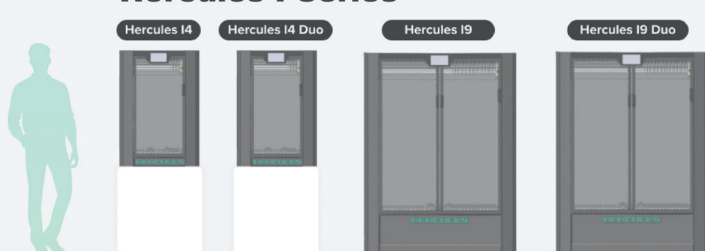
Upgrade железа
«bolt-on»

Продуктовая серия Hercules Series

Hercules G Series



Hercules I Series



FDM 3D принтеры Hercules Series — модели и особенности

Серия G Genius

Материалы печати

ABS PLA PETG TPU SEBS CF&GF Filaments Small PEEK & PEKK

Модели 3,4,6,9 — размер по X PRO — два экструдера

Hercules G3 (300x200x300)	Hercules G4 (400x300x600)	Hercules G6 (600x400x900)	Hercules G9 (900x600x900)
Hercules G3 Duo (300x200x300)	Hercules G4 Duo (400x300x600)	Hercules G6 Duo (600x400x900)	Hercules G9 Duo (900x600x900)

Ключевые отличия и особенности

Пассивная камера без подогрева	Активная камера до 65°C	Активная камера до 200°C
60% единообразных конструктивных решений		
Точность не менее 0.002 мм/мм		
95% повторяемость изделий		

Общие решения

Экструдер UniHot v.4 или TwinHot v.3	Системы автоматизации	Hercules Control Board и др.электроника	Hercules Host	Пром. дизайн	Автокалибровки
--------------------------------------	-----------------------	---	---------------	--------------	----------------

Серия I Industrial

Материалы печати

PSU PEEK PEKK PEI PPSF PC PA POM

Hercules I4 (400x300x600)	Hercules I9 (900x600x900)
Hercules I4 Duo (400x300x600)	Hercules I9 Duo (900x600x900)

рой, так и профессиональные с активной термокамерой. Модели отличаются размером рабочего поля и количеством экструдеров.

Линейка расходных материалов Clotho Filaments состоит из классических филаментов (технических, эластичных, конструкционных) и из специально разработанных. Все предлагаемые материалы совместимы с оборудованием, имеют отработанные шаблоны, что минимизирует брак.

Diaprint Suite — система для подготовки моделей к 3D-печати, последующей печати и контроля.

До конца этого года планируется выпуск всего модельного ряда 3D-принтеров серии G, в следующем году планируется выпуск принтеров серии I.

Первые модели из серии G уже доступны для заказа — Hercules G3 и Hercules G4 и G4 DUO. ■

С подробными характеристиками можно ознакомиться на сайте imprinta.ru

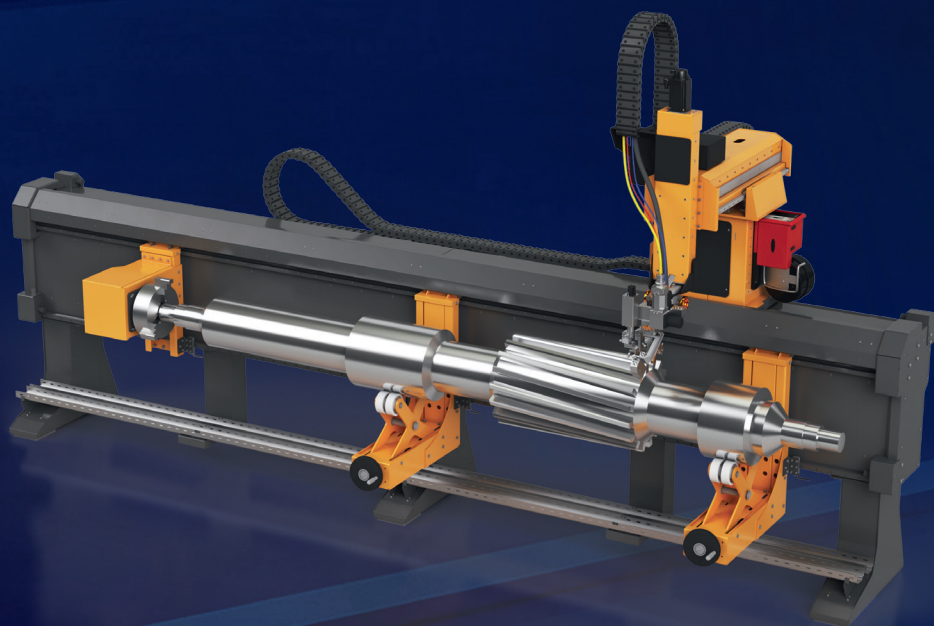


8-800-222-90-20
sales@imprinta.ru

ПОЛНОСТЬЮ УНИВЕРСАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ FL-CPM



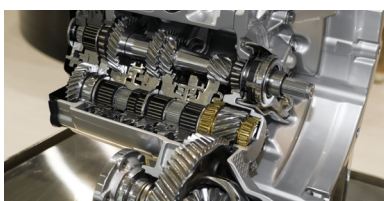
FL-CPM — это универсальная многоосевая система станочного типа для обработки деталей — тел вращения. **Модульная конструкция** координатной системы и **широкий выбор** съемных навесных элементов крепления заготовок дают возможность создать вашу **уникальную конфигурацию станка**.



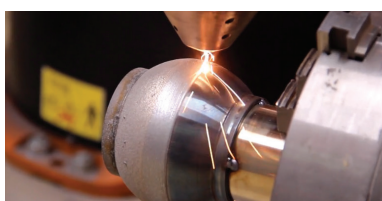
**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР IPG
ПОЗВОЛЯЕТ СОКРАТИТЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РАСХОДЫ**

Примеры применений

Сварка деталей вращения,
профильных изделий, валов



Наплавка валов, наплавка
шестерен



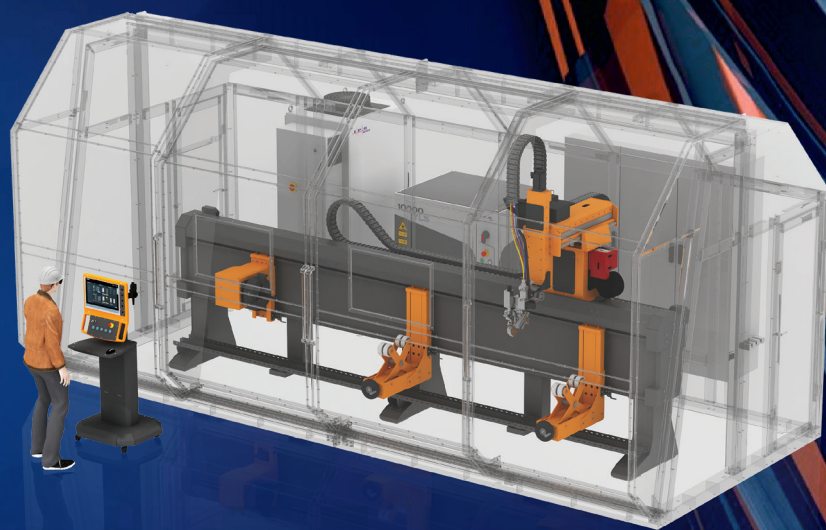
Термоупрочнение резьбы,
валов, зубчатых колес



ЛЮБАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ПОД ЛАЗЕРНУЮ СВАРКУ, НАПЛАВКУ ИЛИ ТЕРМООБРАБОТКУ

Система **FL-CPM** обеспечит
вашему производству
**высоколиквидный автома-
тизированный процесс**
обработки различных
деталей.

Возможность смены
оптических голов позволяет
осуществлять **различные
техпроцессы на одной
установке.**



ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ РАЗРАБОТКИ С УДОБНЫМ И ПОНЯТНЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ

СВАРКА. Экономия времени и электроэнергии: скорость лазерной сварки 1–10 м/мин, сварной шов не требует дополнительной обработки, зона термического влияния лазерной сварки не более 0,5 мм, возможность полной автоматизации. Эффективность и гибкость в использовании: наименьший размер сварного шва и зоны термического влияния, высокая повторяемость процесса, быстрая перенастройка при переходе на изготовление нового изделия.

НАПЛАВКА. Высокий коэффициент использования материала: в случае наплавки проволокой – 100% (до 90% при наплавке порошком). Локальная обработка поверхности, минимальная постобработка, стабильная высота наплавляющего слоя, минимальное перемешивание основного и наплавляемого материалов. Отсутствие деформации изделия в процессе обработки.

ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕ. Локальный нагрев поверхности — термообработка не всей детали, а ее локальных участков, подверженных износу. Быстрый термический цикл — высокая скорость нагрева и охлаждения обрабатываемых поверхностей — уменьшение размера зерна материала. Высокая твердость поверхности и однородность структуры. Твердость обрабатываемых изделий/участков повышается более чем в 2 раза (толщина слоя 0,5–1,8 мм). Деформация при лазерном термоупрочнении более чем на порядок меньше, чем при термоупрочнении традиционными способами.

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

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



Зинаида Сацкая

Становление стартапа «ОНСИИТ» было стремительным. В 2018 году начали разрабатывать и проектировать оборудование, в 2019 году зарегистрировали компанию, в 2020-м начались продажи и участие в статусных выставках по аддитивным технологиям и был получен статус резидента «Сколково».

Макет первого 3D-принтера соучредители Владимир Дубовцев и Артем Лобач создавали на свои деньги, продвигали свое детище, зарабатывали на дальнейшее развитие и сегодня позиционируют ООО «ОНСИИТ» как производителя принтеров промышленного класса.

Опора на лучшее

Технический директор компании Артем Лобач увлеченно рассказывает о развитии бизнеса. Изначально ориентировались на технологию послойного лазерного спекания пластиковых порошков (SLS), которая известна высокой точностью, отсутствием поддержек и высокой производительностью. Сначала делали только настольные принтеры с маленькой камерой построения, потому что не требовалось больших средств на создание прототипа, и подобный формат принтера привлекал внимание из-за низкой стоимости. Сейчас в линейке SLS-принтеров «ОНСИИТ» три модели — SM200, SM300, SM400. Отличаются они габаритами камеры построения и производительностью.



Маленькая SM200 больше предназначена для опытных образцов, когда речь идет о необходимости исследовать технологию. Она очень подходит для лабораторий, конструкторских бюро, которые занимаются прототипированием.

В машинах SM300 и SM400 есть нестандартное решение. Это выкатной модуль, который, образно говоря, время превращает в деньги. Традиционно процесс печати включает в себя подготовку, нагрев камеры, сутки-двое самой печати, потом длительный период охлаждения, когда почти сутки порошок нужно плавно охлаждать. Преимущество решения в том, что пока один модуль охлаждается, можно загрузить новый, что позволяет осуществлять непрерывную круглосуточную работу. Машины SM300 и SM400 укомплектованы исключительно промышленными компонентами, включая многомиллионные лазеры и оптику.

Не секрет, что компонентная база изделий во всех отраслях содержит значительную импортную составляющую. «ОНСИИТ» в нынешней ситуации чувствует себя уверенно, потому что может обойтись без европейских комплектующих. Сегодня импортнезависимость — это критерий устойчивости компании, поэтому «ОНСИИТ» плотно работает с российскими компаниями, постоянно исследует доступные на рынке комплектующие и проводит проверку для использования в своих машинах.

С заботой о потребителе

Изначально «путеводной звездой» «ОНСИИТ» была настольная версия. Именно с машиной SM200 компания участвовала в выставках. На тот момент пара фирм делала машины похожего формата. Но никто не делал настольные установки с маленьким полем на промышленных компонентах, на промышленном лазере. Особая ситуация с порошками для печати. Например, у одной известной европейской фирмы под специальный лазер идут только собственные специальные порошки, не очень дешевые и лишаящие свободы маневра из-за привязки только к ним. «Наша установка, — говорит Артем Лобач, — позволяет использовать наиболее распространенные для использования порошки со стандартными параметрами печати. Иными словами, мы

даем рынку эффективный продукт под отработанную технологию SLS, но только в маленьком формате и по разумной, лояльной к потребителю цене».

«ОНСИИТ» хорошо чувствует рынок и гибок в применении того, что он предлагает. Сначала «ОНСИИТ» использовал немецкие порошки и пока продолжает их использовать. Параллельно пробовали различные порошки других производителей, в том числе китайские, но сейчас продвинулись в поисках порошков под SLS от российских производителей. «До конца прошлого года в России не делали порошков под SLS, — рассказывает Артем. — Сейчас несколько фирм озаботились этим, тем более в связи с нынешними санкциями. Российские порошки мы уже попробовали, но массово на них пока не переходим, потому что нужно время на тестирование порошка, нужно посмотреть, как он ведет себя при многократном повторном использовании. Это просто диктуется пониманием ответственности перед нашими потребителями. Но, как бы грустно это ни звучало, российские порошки дороже европейских в полтора раза, то есть с зарубежными они пока не могут конкурировать по цене». Тем не менее своим спросом на отечественные порошки «ОНСИИТ» продвигает разработки российских производителей, давая им обратную связь. «Мы смотрим, как порошок ведет себя в печати, — объясняет Артем. — Например, зная, как ведет себя немецкий порошок, мы оцениваем качество российского. Испытали партию, результат получили удовлетворительный, похожий на тот, что мы имели с немецким порошком. Наша задача — подобрать режим под этот порошок, посмотреть, соответствует ли он тем режимам, на которых работали зарубежные порошки. Если соответствует, то мы можем с чистой совестью рекомендовать их нашим потребителям».

Команда небольшая, динамика впечатляющая

Сегодня «ОНСИИТ» — это небольшая профессиональная команда из 6 человек. Исследовательская работа лежит сейчас на соучредителях компании. Они отвечают за разработку конструкции принтеров, элек-



троники и ПО, ведется разработка других конструкторских решений, различного дополнительного оборудования, модернизируется ПО.

Управляющий софт у «ОНСИИТ» свой, софт подготовки частично тоже свой, но были налажены хорошие контакты с производителями иностранных софтов. Сейчас ситуация осложнилась, и в планах компании организовать отдельное направление по разработке ПО.

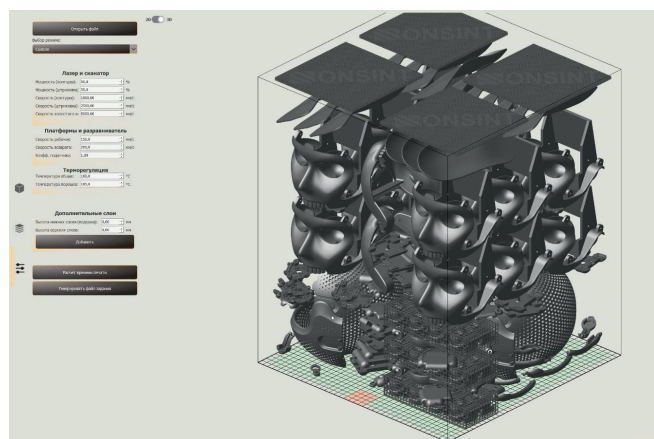
Ответ Артема на вопрос о динамике продаж ошеломил: «В 2021 году оборот вырос в 6 раз по сравнению с 2020 годом». Ситуация сейчас складывается благоприятная для отечественных производителей, и можно ожидать не менее впечатляющего роста объемов продаж, учитывая что «ОНСИИТ» сейчас единственный российский производитель такого оборудования.

Что впереди

Сейчас мы видим, что «ОНСИИТ» разрабатывает, делает, продает свои 3D-принтеры. А в планах на будущее — создание полноценного производственного участка, где будет стоять полная линейка принтеров, на которых специалисты «ОНСИИТ» намерены постоянно отлаживать работу с порошками, обрабатывать тестовую печать, делать детали под заказ, что и сейчас периодически происходит. В компании серьезно настроены постоянно наращивать объемы поставок. Заявив о себе как о серьезном поставщике промышленного оборудования, «ОНСИИТ» намерен по максимуму использовать появившийся шанс, чтобы увеличить свою долю рынка.

В планах также получение сертификата российского производителя, что является одним из обязательных условий участия в закупочных процедурах. Как мы знаем, экспертиза продукции весьма строго относится к «российскости» начинки оборудования. В «ОНСИИТ» к этому готовы. И здесь появляется дополнительный стимул отработать программно-аппаратный комплекс, чтобы сделать свои системы управления полностью на своих компонентах.

Успешного бизнеса без амбиций не бывает. Судя по всему, амбиций команде «ОНСИИТ» не занимать. ■



Технологическая подготовка аддитивного производства в ПО «Глайсер»



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

Компания ООО «Аддитивные технологии» представляет отчетственное программное обеспечение для технологической подготовки аддитивного производства (среда технологической подготовки аддитивного производства) — «Глайсер».

Развитие технологий 3D-печати в мире всегда привязано к успехам и решениям в нескольких предметных областях, например, это материаловедение и приборостроение, технологии автоматизации и цифровизации. В этом аддитивные технологии не являются уникальными, но абсолютно точно, требуют специальных решений и гибкости для получения максимального эффекта от их применения. Десятилетиями реализация таких решений была привязана к общемировым глобальным трендам, где самые продвинутые и функциональные системы являются интеллектуальной собственностью корпораций лидеров рынка. В таком сочетании факторов, очевидно, есть и положительные, и отрицательные стороны. Глобальные и масштабные решения — это широкий, иногда избыточный функционал, который обеспечивает универсальность при его применении; обратной стороной таких подходов является закрытая архитектура и сложная адаптация для новых производственных ре-

шений. ООО «Аддитивные технологии» изначально делало ставку на создание гибких и быстрых решений для компаний, которые хотят вывести на рынок полноценный продукт. В связи с этим была выбрана архитектура, которая позволяет такой подход осуществить (рис. 1), — собственное графическое ядро и возможность подключения к нему модулей для реализации необходимых и удобных пользователю функций:

- проектирование и генерация структур поддержек,
- слайсинг,
- расчет сканирования,
- контроль заполнения,
- экспорт/импорт (G-code, CLI, и др.).

Также архитектура продукта позволяет гибко менять графиче-

ский интерфейс пользователя, в тех случаях, когда базового функционала недостаточно. Второй особенностью архитектуры продукта является вывод особенностей каждой технологии и, соответственно, оборудования в отдельные конфигурационные файлы, которые можно подключать и осуществлять настройку через инженерное меню. Модульный принцип построения системы позволяет полностью обеспечивать этапы технологической подготовки для технологий: **FDM, SLA, SLS, SLM, BinderJet**.

От идеи создания до появления первой версии ядра в 2014-м прошел год, от первой версии ядра до создания продукта, верифицированного вместе с группой промышленных партнеров, прошло 5 лет. Сегодня уже нет ни тени сомнения,

Рис. 1. Единая информационная среда технологической подготовки аддитивного производства в ПО «Глайсер». Электронная модель изделия представлена компанией AddSol.

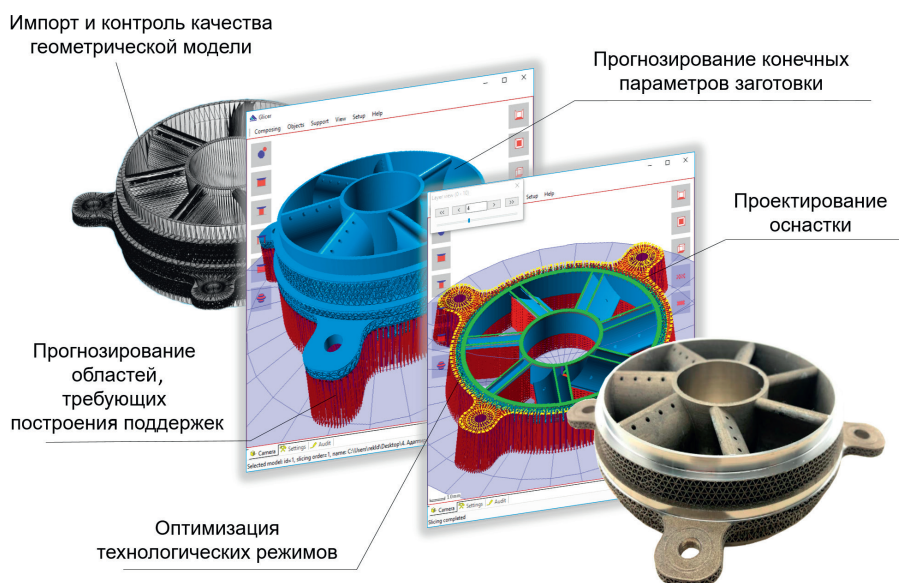
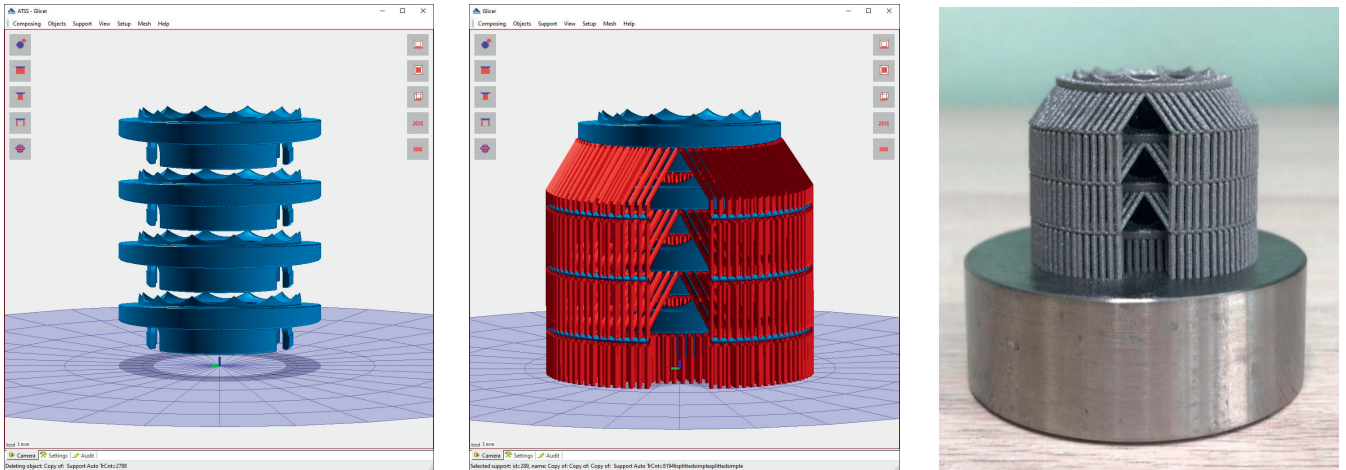


Рис. 2. Пример многоуровневого компоновочного решения и вариант построения поддерживающих структур в ПО «Глайсер». Фото представлены компанией AddSol



что для этапов технологического проектирования под любую технологию 3D-печати наша компания может найти лучшее решение.

Анализ мирового и собственного опыта позволяет уверенно классифицировать функционал ПО, необходимый для полного цикла технологического проектирования промышленной 3D-печати. В этой классификации приоритетными являются этапы, отвечающие за целостность данных на всех «участках», требующих их импорта/экспорта и трансляции. Почему это так важно? В любых технологиях аддитивного производства, начиная от настольных систем и заканчивая промышленными многолазерными установками, доля человеческого фактора по-прежнему остается высокой. Сегодня в большинстве существующих производственных площадок человек осуществляет:

- обработку и проверку электронных моделей;
- компоновку деталей и проектирование поддержек;
- загрузку/Выгрузку материала и заготовок;
- термообработку и механическую постобработку.

В связи с этим необходимо автоматизировать и контролировать такие этапы. Один из подходов, который наша компания заложила и реализовала на уровне ядра, — единая информационная среда тех-

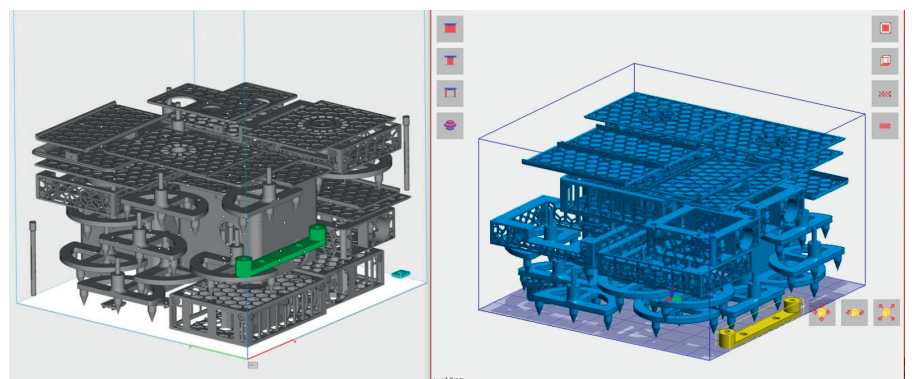
нологического проектирования, где от импорта электронной модели до генерации управляющей программы — реализуется в едином интерфейсе и может быть сохранено в собственном формате, обеспечивающем целостность данных.

Один из важных и необходимых инструментов технологического проектирования — это компоновка электронных моделей в объеме зоны печати (рис. 2–9). Инструменты компоновки должны предусматривать и возможность тонкой ручной настройки, и потенциал для автоматизации этого процесса. В зависимости от используемой технологии инструменты компоновки могут быть зависимы и от других этапов технологического проектирования, например, от проектирования поддерживающих структур (рис. 2). В любом случае показателем эффективности процесса компоновки

всегда будут как машинное время 3D-печати, так и успешность всего процесса.

Тут для каждой технологии применяются свои методики и критерии, определяющие успешность. Так, для оптимизации печати из порошковых неметаллических материалов применяются алгоритмы автоматизированной и автоматической компоновки, позволяющие экономить время оператора станка, а в некоторых случаях находить решения, близкие к оптимальному, и экономить машинное время и материал. В ПО «Глайсер» такие алгоритмы автоматической компоновки создавались совместно с разработчиками российского оборудования и верифицировались как на реальных запусках печати изделий, так и бенчмарках с решениями лидеров рынка ПО для таких задач. Результаты можно увидеть на рис. 3.

Рис. 3. Сравнение автоматической компоновки ПО Materialise Magics (слева) и ПО «Глайсер» (справа)



Для проектирования поддерживающих структур реализован широкий набор инструментов (рис. 5–6). Интерактивный режим позволяет задавать зоны для подведения поддержек и их геометрию, а за формирование сотовой структуры отвечает аппарат настраиваемых паттернов.

Инструменты проектирования поддерживающих структур являются одним из важнейших функционалов современного аддитивного производства. Как уже упоминалось, к сожалению, сегодня проектирование поддержек для большинства технологий — это время и труд инженера-технолога. В зависимости от его опыта, квалификации, внимательности зависит успех каждого запуска, который и стоит немало, и при большой плотности печати занимает не одни сутки. Поэтому мы считаем нашей задачей нарабатывать опыт и понимание в этих задачах совместно с промышленными партнерами, а это и производители, и пользователи оборудования. Тот опыт, который накопился за пять лет, реализован в текущих версиях ПО и по договорным обязательствам существует либо в базовом функционале, либо выведен в специальный модуль, права на который принадлежат заказчику.

Стратегии заполнения слоя отвечают большинству современных технологий печати и настраивают-

Рис. 5. Пример проектирования бионических оптимизированных поддерживающих структур для печати из титановых МПК в ПО «Глайсер». Фото представлены НИТУ МИСИС.

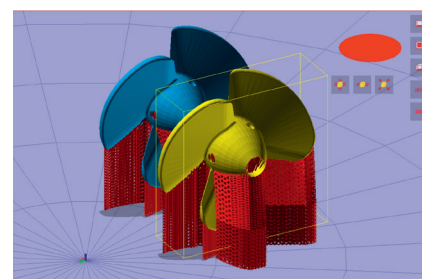
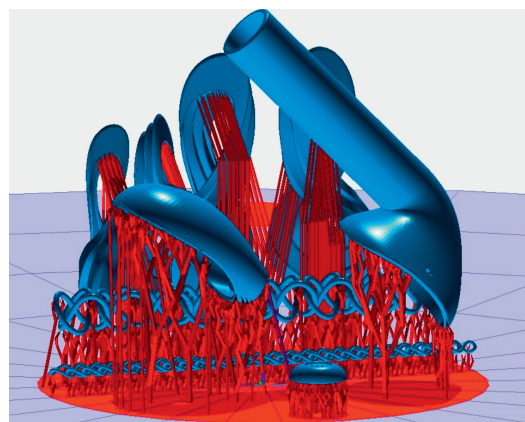


Рис. 4. Схема технологической подготовки аддитивного производства для отечественного оборудования в ПО «Глайсер»

ся под конкретное оборудование (рис. 7). Реализованы множественные эквидистантные обходы периметров и различные стратегии штриховки.

Ландшафт технологической карты мировых достижений в области внедрения и использования промышленной 3D-печати об-

Рис. 6. Реализуются перспективные подходы к проектированию поддержек и управлению пересечением поддержек с телом модели в ПО «Глайсер». Фото представлены компанией AddSol

Рис. 7. Различные стратегии заполнения слоя, реализуемые в ПО «Глайсер»

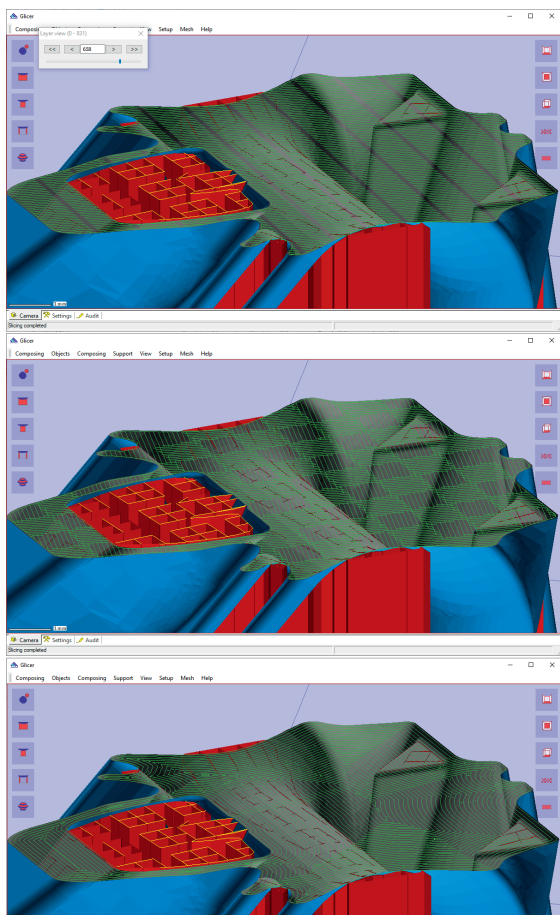


Рис. 9. Импорт и компоновка изделия для технологии UV LCD в ПО «Глайсер». Материал изделий – фотополимер. Фото представлены компанией «ЗД-Медуза».

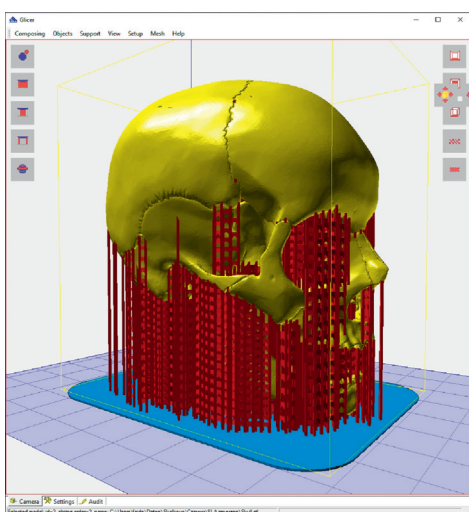
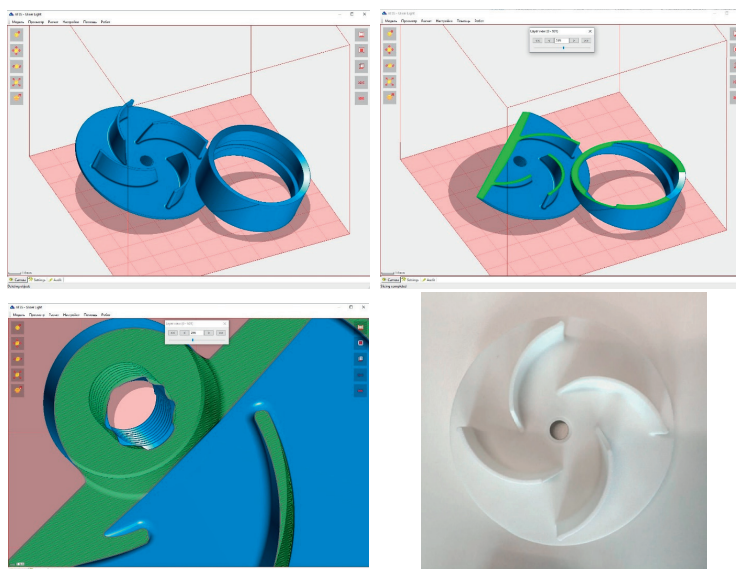


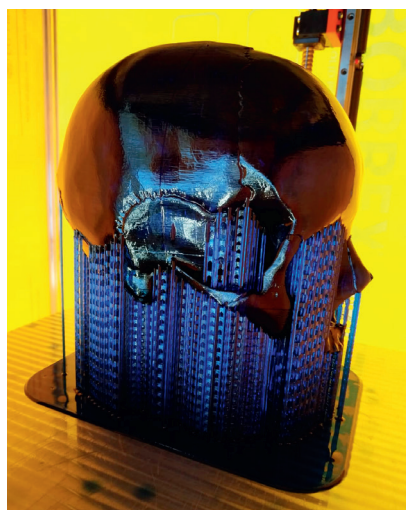
Рис. 8. Компоновка изделий и визуализация управляющей программы в ПО «Глайсер» для технологии SLS. Материал изделий – полиамид. Фото представлены компанией On sint.



ладает своими особенностями. Всплески на этом ландшафте обусловлены комплексными условиями, которые были сформированы корпорациями, и проектами, масштаб которых позволяет это сделать. Необходимо масштабировать задачи и решения в нашей стране, чтобы они вышли на свой пик этого ландшафта.

На сегодняшний день ПО «Глайсер» доступно в комплекте поставки с боль-

шинством отечественных промышленных 3D-принтеров. Так же ПО может быть использовано на этапах технологической подготовки и генерации управляющих программ для зарубежного промышленного оборудования. В заключение хочется обозначить стратегию и миссию нашей компании и команды – доступные и надежные решения для развития рынка 3D-печати в России. ■



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



ВОЗМОЖНОСТИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИЗДЕЛИЯМ ОТВЕТСТВЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Э.Ю. Колтишон, д.т.н., проф., И.А.Иванов, к.ф.-м.н.,
В.В. Орлов, д.т.н., проф. ОАО НПО ЦНИИТМАШ,
Н.Г. Разумов, к.т.н., зав. лаб., СПбПУ, Ю.А. Кириллов, к.т.н., АО «ЛЦ ЯТЦ»,
А.А. Марченко, АО «АЭМ-технологии», М.В. Родин, i3D НПО «3D-Интеграция»,
В.М. Режимчук, ООО «Керамакс»

Аддитивное производство (АП) ускоренно внедряется во все отрасли промышленности, и нашей группе соавторов было важно отметить место аддитивных технологий (АТ), которое они на данный момент занимают и могут занять в ближайшем будущем. **Целью** данной статьи является описание возможностей АТ применительно к изделиям ответственного машиностроения в различных отраслях промышленности: от аэрокосмической до энергомашиностроительной.

Чтобы правильно использовать преимущества АТ при изготовлении изделий ответственного назначения, необходимо правильно разработать **методику применения АТ**. В данной статье авторами предложена следующая схема: предварительно сделаем обзор состояния АП в мире и России, затем остановимся на производстве материалов для АП в России; из всего многообразия методов АП выберем направления для удешевления 3D-печати и, далее, остановимся на особенностях внедрения АТ в энергетическом машиностроении.

Обозначения в тексте статьи

АП — Аддитивное производство

АТ — Additive technologies/АТ — Аддитивные технологии

AMP — Additive manufacturing processes/АТП — Аддитивные технологические процессы

AAW — Argon arc welding/АДС — Наплавление методом аргоно-дуговой сварки

ESW — Electroslag welding/ЭШС — Наплавление методом электрошлаковой сварки

НIP — Hot isostatic pressing/ГИП — Горячее изостатическое прессование

UEC — United Engine Corporation/ОДК — Объединенная двигателестроительная корпорация

USBC — United Shipbuilding Corporation/ОСК — Объединенная судостроительная корпорация

DLG — Direct Laser Growth/ПЛВ — Прямое лазерное выращивание из газопорошковой струи

PSP — Plasma surfacing with powders/ПНП — Плазменная наплавка порошками, лентой, проволокой

MAW — Manual arc welding/РДС — Наплавление методами ручной дуговой сварки

SLF — Selective laser fusion/СЛП — Селективное лазерное сплавление из слоя порошка

TTP — Traditional technological processes/ТТП — Традиционные технологические процессы

DT — Digital twin/ЦД — Цифровой двойник

PDT — Product digital twin/ЦДИ — Цифровой двойник изделия

EBM — Electron Beam Melting/ЭЛПП — Электронно-лучевое плавление порошка или проволоки

DED — Direct Energy Deposition/ПЭР — Прямое воздействие энергии расплава

DLP — Digital Light Processing/ЦОЛ — Цифровая обработка луча света для полимеризации фотополимера

DMD — Direct Metal Deposition/ПНМ — Прямое нанесение металла

FDM — Fused Deposition Modeling/МПН — Метод послойного наплавления

MJ — Material Jetting/ЧНК — Струйное нанесение капель материала

LMD — Laser Metal Deposition/ЛОМ — Лазерное осаждение металлом

PBF — Powder Bed Fusion/СНП — Синтез на подложке (тоже самое, что SLM и СЛП)

PLM — Product Lifecycle Management/УЖЦИ — Управление жизненным циклом изделия

SLA — Stereolithography/СЛИГ — Стереолитография

SLM – Selective Laser Melting/СЛПМ – Селективное лазерное плавление металла

SLS – Selective Laser Sintering СЛС – Селективное лазерное спекание

WAAM – Wire-Arc Additive Manufacturing/ДАСМП – Дуговое автоматизированное/роботизированное сплавление металлической проволоки, дуговая сварка проволокой для аддитивного производства

PAR – Plasma-arc remelting/ПДП – Плазменно-дуговой переплав

ESS – electroslag smelting/ЭШВ – Электро-шлаковая выплавка

Состояние АП в мире и России

На сегодняшний день аддитивное производство преодолело путь от простого прототипирования деталей, сконструированных для традиционного способа производства, до реального использования технологии в производстве сложных, многофункциональных деталей. АП объединяет совместную работу конструкторов, производителей материалов для АП, создателей программ обеспечения, производителей инновационного оборудования, конечных пользователей. Развитие новых программных продуктов и разработка новых материалов позволяет внедрять АП в различные отрасли промышленности. Так, в 2012 году АП выросло за счет использования настольных 3D-принтеров, работающих на основе технологий FDM, DLP, показавших простоту использования и ценовую доступность [1]. А их новые возможности позволили создать высококачественные продукты для аэрокосмической и медицинской промышленности. Технология SLA, которая стояла у истоков АП, успешно применяется в различных отраслях промышленности, от автомобильной до аэрокосмической, за счет различных уникальных материалов, технологии по выжигаемым моделям и т.д. Технология SLS позволила заменить различные металлические детали на инженерный пластик. АП металлических принтеров развивается не так стремительно, как 3D-принтеров, использующих пластиковые материалы, за счет сложностей в постобработке, качестве конечного изделия. Но в настоящее время, с развитием новых программных продуктов и появлением нового инновационного оборудования, можно уверенно говорить, что проблем с качеством деталей, производимых на промышленных 3D-принтерах, не существует. На данный момент АП может предоставить любое решение для качественного производства конечной продукции, быстрого выхода на создание и производство нового продукта в кратчайшие сроки, что в конечном итоге привлекает больше компаний к применению АП.

Важной группой аддитивного оборудования являются металлические 3D-принтеры, которые по скорости

печати можно разделить на «медленные» со скоростью построения $171 \text{ см}^3/\text{ч}$ с 4 лазерами и «быстрые» со скоростью построения до $3084 \text{ см}^3/\text{ч}$. К медленным относятся 3D-принтеры, использующие технологию SLM. Несмотря на то, что уже широко представлены 3D-принтеры с большой площадью построения и большим количеством используемых лазерно-оптических систем (например, SLM Solution представила 3D-принтер с двенадцатью лазерно-оптическими системами NXG XII 600 со скоростью построения $855 \text{ см}^3/\text{ч}$ [2], они уступают по скорости 3D-печати по технологиям DED, WAAM в различных их вариациях с использованием проволоки как материала в нейтральном газе или проволоки в вакуумной среде с применением электронно-лучевого источника подачи энергии. Эти технологии позволяют производить заготовки деталей с большой скоростью построения, но требуют большего объема механической обработки поверхности.

Рис. 1. Рост объемов продаж оборудования (голубой) и услуг (серый) [3]

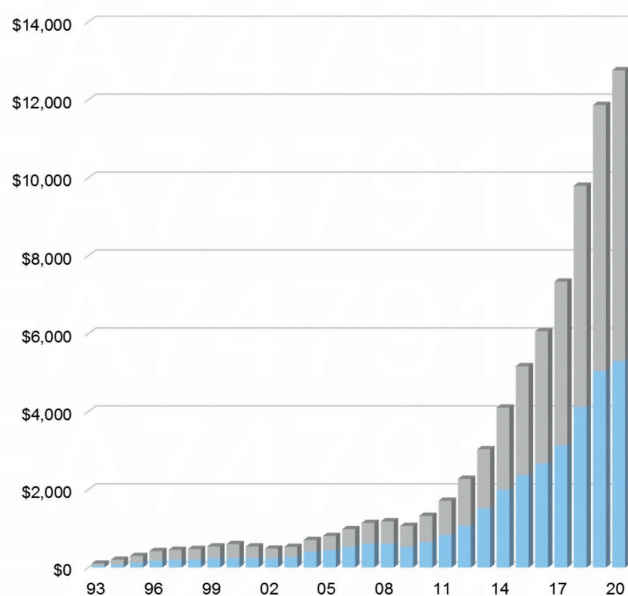
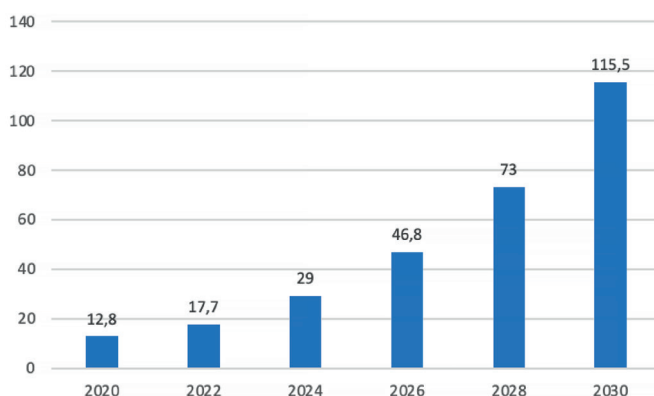


Рис. 2. Прогноз до 2030 г. (от выручки) [3]



По данным отчета Wohlers Report 2021 [3], общий объем продуктов и услуг АП во всем мире вырос на 7,5% до \$12 758 миллиарда долларов в 2020 году. Этот рост замедлился по сравнению с 21,2% в 2019 году, когда отрасль достигла \$11 867 миллиарда долларов (рис. 1), и в 2018 году, когда он составил 33,5% с суммой — до \$9 795 млрд долларов (рис. 2).

Показатели роста на 7,5% в 2020 году основаны на данных, полученных от 261 поставщиков услуг, производителей систем АП и производителей материалов по всему миру (рис. 3).

Общая выручка за продажи 3D-принтеров и оказания услуг 3D-печати показала рост, несмотря на слабые продажи 3D-принтеров. Это обусловлено высокой стоимостью оборудования и тем, что компании покупали запчасти и другие услуги вместо закупок нового оборудования.

Показатели Stratasys и 3D Systems, двух крупнейших компаний отрасли, были относительно низкими с 2016 по 2020 годы. Они сообщили о снижении финансовых показателей в 2020 году на 18,61% и 12,4% соответственно [4]. Показатели других признанных производителей 3D-принтеров тоже снизились в 2020 году. Так, 8 крупнейших производителей 3D-принтеров в совокупности показали капитализацию в 2 036 миллиарда долларов (16%) от капитализации всех компаний индустрии АП в 2020, а год назад Stratasys и 3D Systems имели 8,5% от капитализации всех компаний индустрии АП, что составило снижение на 10,7% в 2019 и 13,8% в 2018. Рост прибыли растет у производителей, менее известных ранее на рынке АП.

Рис. 4. Структура рынка АТ по странам на 2019 г. и на 2020 г. [3]

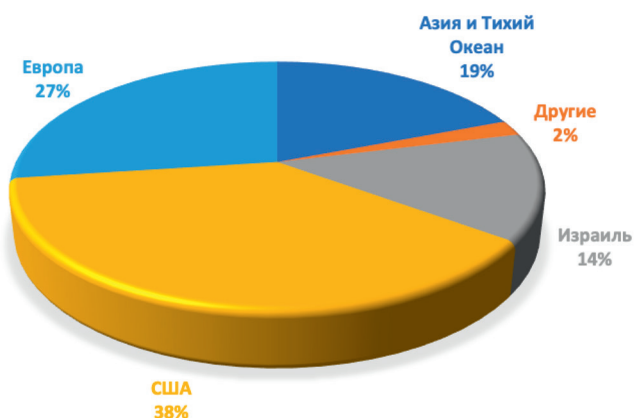
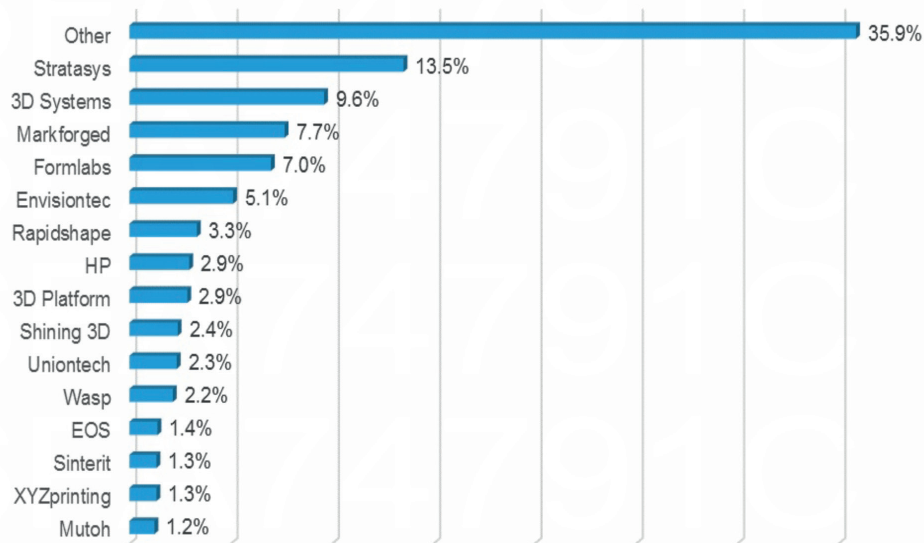


Рис. 3. Мировой рынок производителей 3D-принтеров 2020 г. [3]



На основе двадцатилетней статистики [3] продажи 3D-оборудования, печатающего металлом, снизились в 2020 году (рис. 4). По оценкам [3], в 2020 году было продано 2 169 единиц металлических 3D-принтеров для АП, что на 7,0% меньше, чем в 2019 году.

Снижение продаж металлических 3D-принтеров в значительной мере связано с пандемией COVID-19, которая способствовала снижению спроса на данное оборудование и временному насыщению рынка. Тем не менее, потребность в производстве металлических деталей для АП оставалась высокой, несмотря на снижение темпа исследовательских и конструкторских работ в аэрокосмической и других отраслях в 2020 году за счет удаленного режима работы сотрудников (рис. 5). Несмотря на падение, в 2020 году объем продаж металлических 3D-принтеров и модернизации систем составил \$1 089 миллиардов долларов, при этом средняя цена продажи единицы оборудования выросла до \$501 844 долларов в 2020 году по сравнению с \$467 635 долларами в 2019 году и \$413 043 долларами в 2018 году [3].

Рынок АТ в России составляет 0,5% от мирового, равного \$12,8 млрд долларов [5] Отрасль аддитивных технологий в России в 2010–2020 годах показала положительную динамику развития и достигла следующих показателей в 2020 году:

- объем российского рынка аддитивных технологий (аддитивного оборудования и комплектующих, материалов для аддитивной печати, услуг и программного обеспечения) — 3 560 млн рублей;
- объем российского рынка аддитивного оборудования и комплектующих — 2 053,8 млн рублей;
- объем продаж российских компаний на внутреннем рынке аддитивного оборудования и комплектующих — 804,3 млн рублей;

Рис. 5. Структура мирового рынка аддитивного производства по отраслям на 2020 г. [3]



• объем продаж российских компаний на внешнем рынке аддитивного оборудования и комплектующих — 40,3 млн рублей [6].

При этом, по словам заместителя министра М.И. Иванова, 60% рынка РФ в области АТ — это оборудование, и только 40% — продукция, что свидетельствует о крайне низком использовании дорогостоящего оборудования. В соответствии с утвержденной правительством дорожной картой, наш рынок должен вырасти к 2030 году более, чем в 30 раз — до 170 млрд рублей и достигнуть 3% мирового. Для этого планируются затраты на уровне 80 млрд рублей, из которых чуть менее половины даст госбюджет, а остальное — другие инвесторы [7].

Основным драйвером развития аддитивных технологий в РФ является госкорпорация «Росатом», которая

объединила усилия с другими участниками российского рынка, чтобы при поддержке государства ликвидировать отставание в этой сфере и нарастить отечественные компетенции. Следует отметить, что госкорпорация «Росатом» стояла у истоков разработки промышленного аддитивного оборудования, работающего по технологии SLM [7]. Так, в 2016 году в АО «НПО «ЦНИИТМАШ» разработан и в настоящее время широко эксплуатируется российский 3D-принтер MeltMaster^{3D}-550 с самой большой на территории РФ рабочей зоной построения (540×440×440). А в 2017 году совместно АО «НПО «ЦНИИТМАШ» и ООО НПО «Центротех» разработали и ввели

в эксплуатацию инновационный двухпорошковый 3D-принтер. Следует отметить, что АО «НПО «ЦНИИТМАШ» является одним из ведущих разработчиков аддитивного оборудования, поставляющих на рынок линейку 3D-принтеров, работающих по технологии SLM, с разным размером рабочей зоны и широким спектром других характеристик (табл. 1).

За период 2019–2021 гг. интенсивность и качество работ в области аддитивных технологий госкорпорации «Росатом» вышли на новый уровень. Был реализован ряд ключевых проектов, среди которых следует отметить следующие:

- запущен в эксплуатацию в ПАО «РУСАЛ» первый в РФ промышленный атомизер для получения алюминиевых порошковых материалов [8];

Таблица 1. Базовые характеристики металлических 3D-принтеров, произведенных в ЦНИИТМАШ [11]

Параметр	Melt-Master3D-160	Melt-Master3D-250M/ Melt-Master3D-250HT	Melt-Master3D-550
Максимальные габаритные размеры изделий (ДхШхВ), мм	150×150×150	240×240×240	540×440×440
Скорость построения, см ³ /ч	1–25	До 100	15-100
Лазер, кол-во, шт. / мощность, кВт/тип	1 / 0,2 / Волоконный лазер	2 / 400 Вт / Волоконный лазер	1/1/ Волоконный лазер 2/0,4/ Волоконный лазер
Толщина одного слоя, мкм	20–50	20–50	20–250
Наличие станции просеивания порошка	Есть, не встроенная	Есть, не встроенная	Есть, не встроенная
Материалы	Коррозионностойкие стали; титан и его сплавы	Коррозионностойкие стали; титан и его сплавы	Коррозионностойкие стали; цветные сплавы; сплавы на основе Ni-Co; титан и его сплавы

- разработан и введен в эксплуатацию на площадке ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» уникальный 3D-принтер по технологии SLM, оснащенный системами контроля температуры всей рабочей зоны и качества формирования порошкового слоя, а также системой ультразвукового уплотнения [9];

- для серийного производства медицинских имплантов в интересах Минздрава РФ изготовлены два медицинских 3D-принтера MeltMaster^{3D}-250M по технологии SLM [10];

- при участии ВИАМ создан технический комитет по стандартизации «Аддитивные технологии» (далее ТК 182), который является формой сотрудничества заинтересованных представителей федеральных органов исполнительной власти, ГК по атомной энергии «Росатом», иных государственных корпораций, органов исполнительной власти субъектов РФ и муниципальных образований, научных организаций, исполнителей, общественных объединений потребителей [11];

- создана программно-аппаратная платформа,
- изготовлена серия крупногабаритных изделий для ГК «Ростех»;

- изготовлен сепаратор;

- изготовлены детали корпуса реактора с НИКИЕТ.

В настоящее время в России бурно развиваются независимые производители промышленных 3D-принтеров, печатающих металлом, которые за основу взяли технологию SLM. В том числе:

АО «Лазерные системы» разработало 3D-принтер M250 с рабочей площадью построения 250×250×250 с изменением мощности лазера от 200 до 1000 Вт, как важная опция заявлено, что принтер проводит вакуумирование металлического порошка перед началом работы. Принтер имеет собственное ПО с системой контроля качества.

В 2020 году был создан 3D-принтер M350 с рабочей камерой построения 350×350×350 и с двумя лазерами с возможностью перекрытия, работающими одновременно, для нужд ПАО «Северсталь». Заявлено, что они получили возможность регулировать свойства будущего изделия и выбирать в соответствии с геометрией детали различные технологические режимы печати и сплавы, задаваемые ПО [9].

AddSol — компания-стартап, повторила созданный SLM Solutions малогабаритный 3D-принтер S90 с зоной построения 90×90×90. Было продано несколько принтеров в образовательные учреждения [12].

3DLAM (ЗАО «Биоград») — компания производит 3D-принтеры по технологии SLM с цилиндрической зоной построения 90–100 мм и средний 3D-принтер с цилиндрической зоной построения 150 мм, высотой 220 мм, с программным обеспечением на базе ПО Materialise и Autodesk Netfabb. За счет небольшой стоимости было реализовано одиннадцать 3D-прин-

теров в частные компании РФ, из них девять с зоной построения 90–100 мм и два с зоной построения 150 мм [13].

3DSLА — компания-производитель 3D-принтеров по технологии SLM с цилиндрической рабочей камерой 170 мм, с программным обеспечением Triangulatica. Машины поставлены для стоматологических клиник. 3D-принтеры больших размеров являются коммерческим предложением [14].

ГК «Лазеры и аппаратура» — компания предлагает 3D-принтеры по технологии SLM и DMD. Разработаны и изготовлены 3D-принтеры с рабочими камерами построения 100×100×200 и 250×250×280. Также компания предлагает 3D-принтеры для наплавки порошковым материалом по технологии DMD с возможными рабочими платформами 400×400×400 и 600×400×400 с трех или пятикоординатной кинематической системой [15].

ИЛИСТ — предлагает 3D-принтеры прямого выращивания (LMD) с прямым подводом энергии и материала в зону построения и наплавки по технологииDED. Были реализованы проекты для ОДК и ОСК [16].

ТЭТА — производит оборудование для электронно-лучевой (EBM) наплавки и прямого выращивания в вакууме с использованием проволоки для аддитивного производства с внутренними размерами вакуумной камеры 2500×2500×2500 мм [17].

Как мы видим, в РФ технология SLM (PBF — Powder Bed Fusion) является доминирующей в производстве металлических 3D-принтеров. Однако, по данным Wohlers Report 2021, самым востребованным металлическим 3D-принтером в мире признан HP Metal Jet, использующий «грин-технология» Binder Jetting. Производство подобных принтеров в РФ является сложным процессом по причине отсутствия разработанного связующего материала, который наносится на слой металлического порошка с последующим утверждением.

Мировым лидером по применению титановых сплавов Ti-6AL-4V в 3D-печати для аэрокосмической и медицинской промышленности являются 3D-принтеры GE Arcam, использующие технологию электронно-лучевого плавления металлического порошка в вакууме (EBM). В 2021 г. уже более 10 мировых компаний объявили о выпуске порошковых установок по EBM-технологии. В самое ближайшее время ожидается значительный рост продаж за счет удешевления самих устройств и значительных усовершенствований технологии.

В РФ технология EBM тоже востребована, в рамках импортозамещения был объявлен тендер на создание 3D-принтера по этой технологии, который выиграла компания-производитель титанового сплава Ti-6AL-4V АО «Композит» госкорпорации «Роскосмос».

Кроме оборудования, производимого компанией «ТЭТА», особо хочется отметить опытную установку EBM-наплавки в вакууме от компании «ТЕКСЕНТ».

Таблица 2. Производство изделий для авиастроения

Изделие	Начало промышленного производства, год
МС-21	2021
Ил-276	2026
Ми-26	2026
ШФДМС (ПД-35)	2028

Ее преимуществом является печать без рентгеновского излучения, с высоким КПД луча, низким количеством пробоев и высокой детализированностью самой 3D-печати [18].

В части ответственного машиностроения технология 3D-печати металлом нашла применение в производстве различных газотурбинных двигателей и установок. Так, в двигателях семейства ПД-35 и ПД-14 предполагается производство порядка 50 наименований изделий 3D-печати (табл. 2). Двигатели будут устанавливаться на самолетах МС-21 и военно-транспортном самолете Ил-276, вертолетах Ми-26, при выполнении ремонтно-восстановительных работ воздушных судов Ту-214, Ил-76 и Sukhoi Superjet 100 [19]. В ходе работ были внесены изменения в конструкторскую и технологическую документацию для производства центрального и периферийных завихрителей жаровой трубы в выпускаемых энергетических установках ГТД-110.

В 2017 г. на предприятии ПАО «ОДК-Сатурн» были успешно завершены опытно-конструкторские работы по разработке деталей под 3D-печать для производства корабельных ГТД с применением АТ: ОКР «М70ФРУ-Р» («реверс»), ОКР «Агрегат ДКВП» и ОКР «М90ФР». Предприятие ПАО «ОДК-Сатурн» готово к серийному изготовлению силовых агрегатов морского назначения. Предприятие ПАО «Протон-ПМ» с 2025 года планирует производить около 50 двигателей РД-191 в год для ракеты-носителя «Ангара» и других перспективных жидкостных ракетных двигателей с деталями, произведенными по 3D-печати. Ведутся работы по отработке технологии 3D-печати алюминиевых деталей для приборов СВЧ и связи (АО «НПП «Исток» им. Шокина»). Для нужд МО России ведутся работы в области применения АТ при производстве ракет и БПЛА. Производитель насосного и компрессорного оборудования ООО «Алнас» приобрел установку EOS M290 для 3D-печати опытных образцов ступеней ЭЦН. В перспективе можно прогнозировать постепенное развитие данного сектора рынка.

Следует отметить, что при использовании 3D-печати на 3D-принтерах, работающих по технологии SLM, производительность изготовления деталей уступает

традиционной, но трудозатраты на изготовление деталей уменьшаются. Например, синтез комплекта фронтальных завихрителей для двигателя ПД-14 займет около 70 часов. Соответственно, для производства всей запланированной номенклатуры потребуются значительные производственные мощности, по экспертным оценкам, к 2025 году только для закрытия нужд ОДК парк 3D-принтеров должен составить 250–300 штук. Для достижения этих целей планируется развитие и оснащение объектов инфраструктуры [19]:

- строительство лабораторно-производственного комплекса аддитивных и литейных технологий для производства деталей горячего тракта в ФГУП «ВИАМ» площадью 4000 кв. метров и его оснащение 3D-принтерами;
- техническое перевооружение площадей демонстрационно-технологического Центра аддитивных технологий в строении 75а АО «МЗП» (12 ед./год оборудование для 3D-печати).

Производство материалов для АП в России

В мире выручка от продажи металлических материалов для АП выросла на 15,2% в 2020 году до примерно \$383,4 миллиона долларов по сравнению с \$332,7 в 2019 году [3]. Этот сегмент вырос на 27,8% в 2019 году и на 41,9% в 2018 году. Оценки выражены в миллионах долларов. Материалы, используемые для АП, в основном представляют собой порошки, но также включают проволоку, нити, листы и ленты [3].

Основными российскими производителями металлических порошков для АП являются:

АО «Полема» имеет производство металлических порошков мощностью 3000 тонн в год. На данный момент предприятие выпускает материалы импортных марок: 316L, РН-1, 17–4РН, Inconel 625, 718, 738, НХ, МР-1, а также ряд отечественных сплавов. Так как потребность российских пользователей АП небольшая, качество производимой продукции находится на среднем уровне [20].

АО «СМК» производит металлические порошки жаропрочных и никелевых сплавов, титановых сплавов в защитной атмосфере. За счет использования в качестве исходного материала электрода, получаемого путем вакуумно-индукционной плавки с тонкой фильтрацией металла с последующим вакуумно-дуговым переплавом, фракционный состав гранул и низкое содержание газов обеспечивают высокое качество металлического порошка, но процесс является трудоемким, и, как следствие, цена на металлический порошок является высокой [21].

АО «Композит» производит металлические порошки в интересах госкорпорации «Роскосмос». Техническое производство порошков жаропрочных, титановых и интерметаллидных сплавов с помощью вращающегося

электрода с плазменным нагревом. Данное производство порошков является специализированным для космической промышленности и не используется сторонними организациями, цена на порошок за счет трудозатрат является высокой [20].

Также металлические порошки производят **ПАО «Русполимет» («Гранком»)** [20] и **АО «ЧМЗ»** [23].

Направления удешевления 3D-печати

Цены на изделия 3D-печати и ТПТ в настоящее время не являются сопоставимыми. Массовое производство изделий 3D-печати требует как снижения себестоимости исходных материалов, так и удешевления 3D-оборудования. Наиболее перспективным направлением удешевления продукции 3D-печати является использование в качестве исходного материала проволоки вместо порошка, т.к. цены на проволоку толщиной от 0,3 мм из сталей типа 316 не превышают 15 долларов/кг, на проволоку из сталей типа X18H10T — не более 7 долларов/кг, на никелевую, молибденовую и вольфрамовую проволоку толщиной 0,05–0,08 мм — на уровне 1500–4500 руб./кг (20–60 долларов/кг). Таким образом, использование проволоки вместо порошка может существенно снизить себестоимость 3D-печати, например, для изделий из нержавеющей стали — до 30–32 долларов/кг [19].

Другим перспективным направлением может быть получение порошка из стружки нержавеющей стали. Проблема связана с увеличением содержания кислорода, азота и водорода в наплавленном металле, т.к. повышенное содержание этих элементов наблюдается в пленке оксидов на поверхности стружки, особенно при высокоскоростном точении. Как известно, в качественном порошке/проволоке для АТ должно быть не более 0,01% кислорода.

Можно рассмотреть возможность замены для плавления проволоки лазерных установок на более мощные (электронные пушки (ЭЛП), плазматроны). Преимуществом электронных пушек является высокий тепловой КПД (85%), малый расход энергии на плавление (до 0,5 кВт*час/кг). Мощность ЭЛП может достигать нескольких МВт. В РФ есть ЭЛП мощностью более 1200 кВт. Скорость плавления — сотни кг/час. Недостаток — необходимость рабочего вакуума в камере наплавления: в прикатодной части давление не более $7 \cdot 10^{-3}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.), у изделия — не более 0,8 Па (10^{-2} мм рт. ст.), что требует большого расстояния от катода ЭЛП до плавящегося металла (желательно не менее 1 м) и высокой степени герметизации рабочей камеры.

Более простыми и дешевыми являются плазматроны с использованием защитного газа аргон, используе-

мые для сварки и плавления металла (ПДП). Цены на них — на уровне сотен тысяч рублей, не более \$150 тыс. долларов США. Высокий тепловой КПД, регулируемая скорость плавления и размера капель, компактность устройства, плавление в атмосфере аргона при компенсации недостаточной герметизации повышенным давлением аргона — основные достоинства ПДП. Расход электроэнергии на стадии плавления — 0,65 кВт*час/кг. Возможно использование ПДП с приспособлением для введения порошка или проволоки в струю для предварительного подогрева и затем введения в точку плавления. Схема управления не нуждается в изменении при замене лазера на более экономичные устройства ЭЛП или ПДП.

Проблемой при использовании этих мощных устройств для высокопроизводительных 3D-принтеров являются многократно возрастающие тепловложения. Высокие термические напряжения потребуют введения промежуточных термических обработок для снятия напряжений или проведения 3D-печати с подогревом в области высокотемпературной пластичности, релаксации напряжений за счет пластических деформаций с последующим их исправлением. Но эти же ограничения действуют и сейчас для лазерного сплавления изделий сечением более 500 мм.

Применение высокопрочных сталей аустенитного класса представляется перспективным в связи с отсутствием фазовых превращений при охлаждении, высоком уровне высокотемпературной прочности и пластичности.

Для повышения прочности малогабаритных изделий за счет наклепа можно использовать ГИП — изостатическое прессование, для крупногабаритных — контейнерную компоновку под штамповку или 3D-печать в кристаллизаторе/форме, создающей сжимающие напряжения [19].

Вместе с тем, необходимо разрабатывать принципиально новые конструкции изделий, предназначенных для изготовления с применением 3D-печати. Например, основной объем изделия изготавливается по традиционным технологиям из материала с высокой свариваемостью, вязкостью разрушения и достаточной конструкционной прочностью. Поверхностная зона изделия, имеющая сложную геометрию, изготавливается по 3D-модели, требующей минимальной пластической, термической и механической обработки для снятия напряжений и обеспечения требуемых свойств (коррозионная стойкость, износостойкость, высокая твердость). Такие конструкции могут обеспечить не только снижение себестоимости механической обработки, но и минимальную стоимость ремонтов в процессе эксплуатации.

Реализация АТ и АП крупногабаритных изделий идет с участием предприятий госкорпорации «Росатом», в том числе ЦНИИТМАШ [24], что подтверждает реалистичность высказанных выше положений. Важно отметить, что «РусАТ» и «ЦЭЛТ» принимают участие в работах по созданию оборудования и технологии прямого выращивания крупногабаритных изделий из титановой проволоки плазменной дугой. Установка 3D-позиционирования позволит изготавливать изделия с габаритами 4000×1000×200, установка 5-осевого позиционирования рассчитана на габариты 2000×600. Первые изделия, планируемые к производству это сотовая панель 2720×17×200 и колпак 530×265×290 из сплава ВТ6ч [19].

Решения существенно упрощаются для таких крупногабаритных осесимметричных изделий, как роторы турбин и генераторов, валы, обечайки, крышки и эллипсоиды, прямые участки трубопроводов, патрубки. Именно для них перспективна разработка таких АТ, как функциональная наплавка, прямое выращивание с использованием проволоки, ЭЛП, ПДП, ЭШВ.

Заключение

АТ, обеспечивающие новые возможности для конструирования изделий с заданными свойствами и геометрией, получили широкое признание в наиболее передовых отраслях промышленности и странах мира, имеют достаточную базу для развития в РФ и нуждаются в совершенствовании, распространении, популяризации и изучении.

АП успешно применяется там, где высокие цены изделий оправданы их уникальными потребительскими свойствами: сложная конструкция изделий с невозможностью сделать традиционными методами; не слишком ответственная область применения; единичное производство; возможно уменьшение количества деталей конструкции.

Снижение стоимости материалов АП — главная задача при внедрении АТ в энергетическое и тяжелое машиностроение. Новые технологии получения металлических порошков, использование электронных пушек и плазмотронов вместо лазеров — наиболее очевидные направления развития АТ.

Важным моментом внедрения АП в существующие производства с максимальной эффективностью является изменение конструкции производимых деталей при соблюдении всех преимуществ АП, с использованием топологической оптимизации, сетчатых структур, с облегчением конструкции, объединением узлов и сокращением количества деталей, с увеличением жизненного

цикла производимой детали. Использование АП для деталей, которые были сконструированы для традиционного производства, является прототипированием и не является эффективным с точки зрения себестоимости продукта. Только детали, сконструированные для АП, могут быть эффективными и экономически обоснованными.

Существующие АТ могут быть интегрированы в технологическую подготовку производства, усовершенствованы методами цифрового моделирования, симуляции, использования новых технологий термомодеформационного воздействия на промежуточный и конечный продукт.

Важную роль в повышении качества и эксплуатационных свойств изделий АП должны сыграть методы комплексного сдаточного и эксплуатационного контроля, сочетающие неразрушающий контроль структуры и статистические методы контроля механических и эксплуатационных свойств. ■

Литература

1. Джон Нейсбит. Мегатренды (2003) — футуролог.
2. <https://www.slm-pushing-the-limits.com>
3. <https://wohlersassociates.com/>
4. J'son&Partners Consulting: Текущая ситуация и прогнозы развития аддитивного производства, перспективы применения 3D-печати в промышленности и нефтегазовой отрасли в России и в мире. 2018. 814 с.
5. <https://www.itweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=199520>
6. <http://static.government.ru/media/files/ogvdrJAzZEx7roHJAZwVEGZw6yTxBaJu>
7. <https://conf.viam.ru/conf/345/1319>
8. <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rusal-ustanovil-oborudovanie-cniitmasa-po-proizvodstvu-metallicheskiporoskov-dlya-3d-pecati>
9. <https://ria.ru/20180903/1527723204.html>
10. https://www.cmk-group.com/technology/granular_metals/
11. <http://webportalsrv.gost.ru/portal/TKSUGGEST/TK2006.nsf/84eb0d5919ea20bac325653100289c4a/8d065cea4cf427cf43257ebc00372c62?OpenDocument>
12. <https://addsol.ru/slm-3d-printer-pechat-metallom>
13. <https://ru.3dlam.com/models>
14. <https://www.3dsia.ru/3d>
15. <https://www.laserapr.ru/lazernoe-oborudovanie>
16. <https://www.smtu.ru/ru/viewunit/158/>
17. <https://tetacom.ru/>
18. <https://www.ge.com/additive/ebm>
19. <https://conf.viam.ru/conf/345/1319>
20. <http://www.polema.net/poroshki-dlja-3d-pecati.html>
21. <https://www.kompozit-mv.ru/index.php/ru/metallicheskie-materialy-i-metallurgicheskie-tehnologii/35-granuly-iz-titanovykh-i-nikelevykh-splavov>
22. <https://vz-nn.ru/ruspolimet/42567/>
23. <https://www.metaltorg.ru/n/9AF607>
24. «Лазерные системы»: комплексный подход в области разработки, производства и реализации серийного аддитивного оборудования // Аддитивные технологии. 2021. № 4.

Определение направлений применения технологии селективного лазерного сплавления при создании изделий РКТ

А.М. Зайцев, к. т. н., главный конструктор – начальник отдела, ПАО РКК «Энергия»; alexey.zaitsev@rsce.ru
С.Ю. Шачнев, к. т. н., заместитель генерального директора ЗАО «ЗЭМ» РКК «Энергия»; sergey.shachnev@rsce.ru

В статье рассматриваются основные технологические возможности современного оборудования для селективного лазерного сплавления. Формулируются основные критерии выбора деталей изделий ракетно-космической техники (РКТ) с учетом специфики предприятия. Определяются основные направления применения технологии селективного лазерного сплавления при технологической подготовке производства и изготовлении изделий РКТ.

Несмотря на активное развитие композитных технологий, алюминиевые, титановые сплавы и на сегодняшний день являются основными при создании ракетно-космической техники из-за их совокупности массовых и прочностных свойств. А с учетом развития аддитивных технологий, появления производителей российских металлических порошков в промышленных масштабах для изготовления деталей из сплавов, в том числе с повышенной прочностью и коррозион-

нотойкостью, открываются новые конструкторско-технологические возможности и решения.

Применение аддитивных технологий (АТ) как на сложнообрабатываемых материалах, так и на отдельных направлениях при изготовлении изделий из алюминиевых сплавов является актуальным направлением развития технологий производства аэрокосмической продукции.

В ГОСТ Р 57558–2017 [1] аддитивное производство (АП) определено как процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки).

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время на различных предприятиях вы-

явился определенный ряд технологических направлений, по которым целесообразно проводить работы в части внедрения аддитивных технологий в зависимости от вида деятельности предприятия.

В данной статье рассмотрим выявленные в ходе проведенного анализа основные направления применения технологии селективного лазерного сплавления при изготовлении космических кораблей грузовой и пилотируемой тематики, а также некоторые результаты апробации по отдельным направлениям.

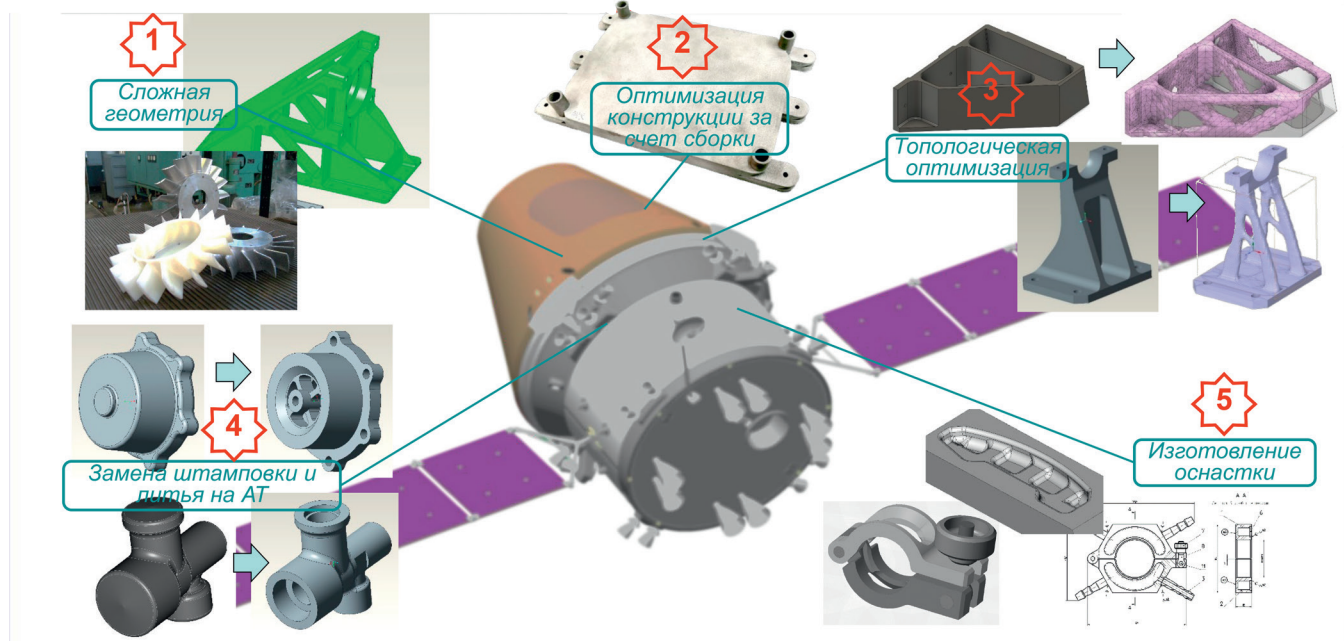
Для того, чтобы начать анализ существующей перспективной номенклатуры деталей и сборок для применения при их изготовлении аддитивных технологий, необходимо понимание основных технологических возможностей, которые позволяют достичь современного уровня оборудования селективного лазерного сплавления. В результате проведенного анализа и изучения опыта эксплуатации оборудования

Рис. 1. Свойства порошковых алюминиевых сплавов производства «РУСАЛ»

Материал/ толщина слоя/ скорость печати		AlSi10Mg		AlSi7Mg	
		30 мкм / 26,7 см ³ /ч	60 мкм / 41 см ³ /ч	80 мкм / 60,3 см ³ /ч	60 мкм / 40,2 см ³ /ч*
Предел прочности σ_b , МПа	XY	350	350	320	300
	Z	350	350	320	310

Механические свойства после отжига		RS -553 (0,3% Sc)
E, ГПа	XY	72
	Z	
σ_b , МПа	XY	505
	Z	500

Рис. 2. Направления применения селективного лазерного сплавления



последнего поколения, из наиболее важных возможностей можно выделить:

- точность линейных размеров — не менее 0,05 мм;
- шероховатость поверхности — Ra 12,5 (на части поверхностей до Ra 6,3);
- максимальные размеры рабочей зоны (SLM): около 500×500×500 мм;
- скорость процесса — для металлов это 72 н/ч для полного заполнения рабочей зоны 500×500×500 мм при печати с максимальными характеристиками;
- толщина слоя при печати — от 30 мкм;
- возможность приобретения атомизера — установки для изготовления порошков любых сплавов из прутков и проволоки прямо на предприятии, что особенно важно при проектировании и изготовле-

нии перспективной номенклатуры деталей;

- смена материала с помощью простой смены палеты, когда никакой очистки установка не требует.

Также стоит отметить, что за последние годы существенно снизилась стоимость порошков, например, для алюминиевых: 2016 г. — 300 евро/кг, 2020—5 евро/кг.

Предприятиями нашей страны освоена достаточно широкая номенклатура промышленно производимых порошков, например, стали («Полема»): 12X18H10T, 09XH2MД, 40X13, 07X18H12M2, 20X13H2, 07H18K9M5T и др.; алюминиевые сплавы («РУСАЛ»): более 10 различных сплавов, в том числе RS-300, RS-356, которые по прочностным характеристикам являются аналогом популярного АМг6, и высокопрочного RS-553

(рис. 1) [2], а по своим прочностным характеристикам их даже превосходят. Часто применяемые АК6 и АК8 сильно склонны к остаточным деформациям и вызывают трудности при изготовлении с механической обработкой.

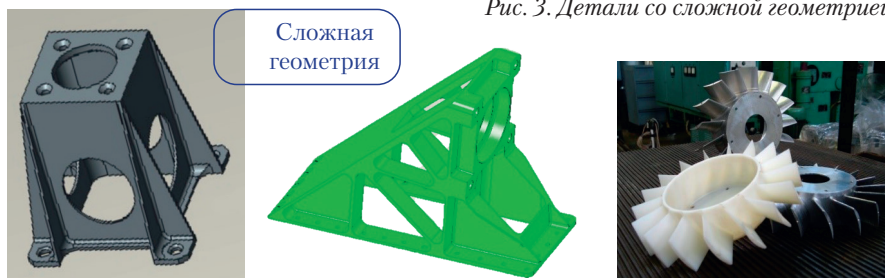
Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать основные критерии выбора номенклатуры деталей:

1. Детали, имеющие большое количество переустановок, требующие обработки на разных типах оборудования.
2. Детали, имеющие высокую трудоемкость изготовления (большое машинное время).
3. Детали, имеющие низкий коэффициент использования материала (КИМ).
4. Детали, требующие изготовления штампов и пресс-форм при

Рис. 4. Оптимизация конструкции за счет сборки



Рис. 3. Детали со сложной геометрией

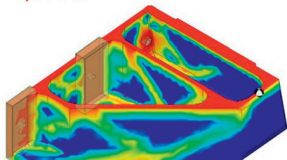


Топологическая оптимизация кронштейна 372ПЭ01.1300-113 и результаты

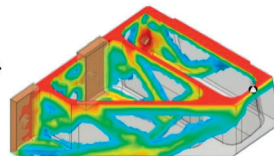
1. Кронштейн 372ПЭ01.1300-113



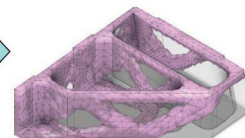
2. Анализ напряжений при нагружении. Масса детали 0,541 кг



3. Программно удаляются части детали, не участвующие в работе конструкции. Масса детали 0,245 кг

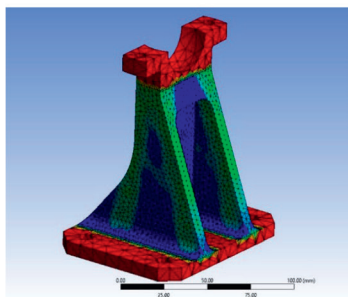


4. Деталь кронштейн после топологической оптимизации

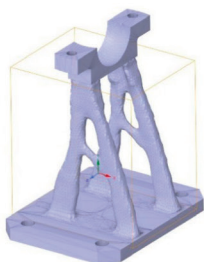


Топологическая оптимизация кронштейна 372ПЭ01.В0350-21 и результаты

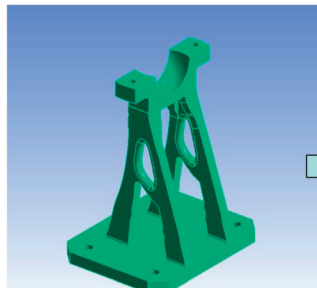
2. Анализ напряжений при нагружении. Масса детали 0,475 кг



3. Программно удаляются части детали, не участвующие в работе конструкции.



4. Деталь кронштейн после топологической оптимизации. Масса детали 0,330 кг



5. Образец из пластика, полученный АТ



единичном или мелкосерийном производстве.

5. Сборочные единицы, которые невозможно изготовить как единую деталь традиционными методами, но позволяет это сделать аддитивная технология.

6. Снижение массы изделия при сохранении прочностных свойств конструкции.

Исходя из перечисленных критериев, технологических возможностей современного оборудования для селективного лазерного сплавления, учитывая специфику проектирования и изготовления космических кораблей грузовой и пилотируемой тематики, сформулируем направления применения (рис. 2) данного вида АТ:

1. Изготовление деталей, имеющих сложную геометрию (рис. 3). Это могут быть группы деталей типа кронштейн, фитинг, корпус и т.д., отбирающиеся по критерию № 1, с шероховатостью поверхностей Ra 6,3 или хуже, кроме присоединительных/базовых поверхностей с последующей их чистовой

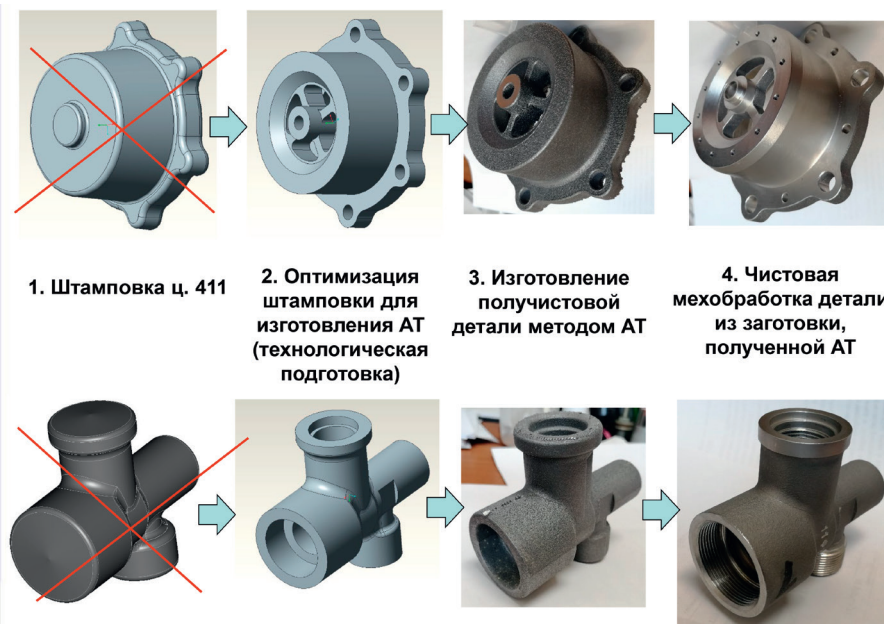
обработкой, а также детали с элементами 5-координатной обработки, имеющие большое машинное время (критерий № 2).

2. Оптимизация конструкции изделия за счет сборки (рис. 4). Это могут быть теплообменники, термоплаты и другие узлы. Здесь необходимо изменение конструк-

торской документации либо проектирование перспективных изделий заранее с учетом применения АТ (критерии № 3 и № 5).

3. Топологическая оптимизация деталей как перспективного, так и существующего конструктива с перевыпуском конструкторской документации (рис. 5). К этому

Рис. 6. Изготовление полуставовых деталей АТ вместо штамповок



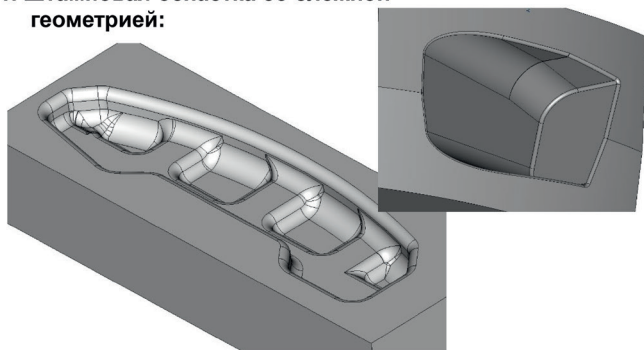
1. Штамповка ц. 411

2. Оптимизация штамповки для изготовления АТ (технологическая подготовка)

3. Изготовление полуставовой детали методом АТ

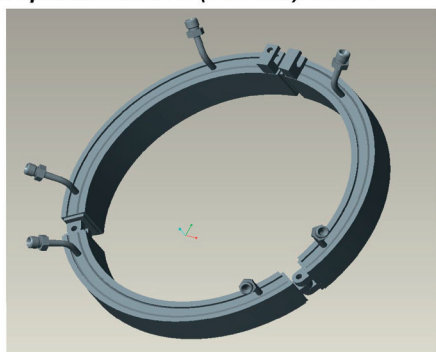
4. Чистовая мехобработка детали из заготовки, полученной АТ

1. Штамповая оснастка со сложной геометрией:



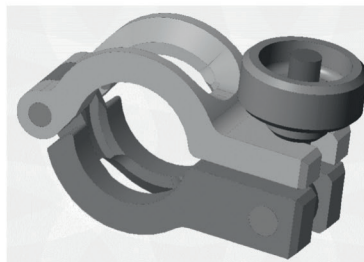
Хомут для охлаждения при сварке трубопроводов ВК787-40402:

- по существующей технологии (4 шт). 104 н/ч
- с применением АТ (4-20 шт). 28 н/ч



2. Изготовление сборочных единиц в сжатые сроки: Стяжное приспособление для сварки(прихватки) трубопроводов ВК0872-18729:

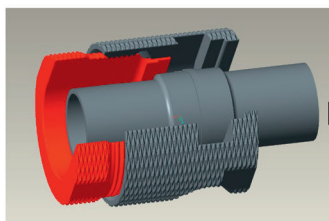
- по существующей технологии (4 шт). 92 н/ч
- с применением аддитивной технологии (4-20 шт). 36 н/ч



Стяжное приспособление для сварки(прихватки) трубопроводов ВК0872-18792:

- по существующей технологии (4 шт). 86 н/ч
- с применением аддитивной технологии (4-20 шт). 34 н/ч

Электронная модель



Образец из пластика, полученный АТ



направлению могут относиться детали типа опора, кронштейн, ложемент и т.п., в которых проведение топологической оптимизации дает существенный эффект по снижению веса (критерий № 6 и № 1).

4. Замена штампованных и литых заготовок на детали, изготовленные методом АТ (рис. 6). Этому направлению соответствует большое количество корпусных деталей, преимущественно приборного и арматурного производств, где при переходе от штамповки и литья к заготовке АТ можно добиться существенных увеличения КИМ и снижения объема механической обработки (критерии № 3 и № 4).

Кроме того, работа по этому направлению при проектировании перспективных изделий может существенно сократить объем технологической подготовки производства в части отсутствия необходимости проектирования и изготовления штампов и пресс-форм,

в особенности с учетом единичного и мелкосерийного производства изделий РКТ.

5. Изготовление оснастки (рис. 7). По этому направлению возможно оперативное изготовление сложнопрофильных видов оснастки, таких как оправки для формовки, элементы пресс-форм (критерий 2). Приспособления типа хомутов для охлаждения при сварке, имеющие существенную трудоемкость ввиду сборной конструкции и полости для циркуляции жидкости, могут быть изготовлены как единая деталь (критерий 5). Хомуты для стяжки трубопроводов требуют при изготовлении нескольких видов оборудования и переустановов (критерий 1).

Выводы

1. Технологические возможности оборудования селективного

лазерного сплавления на текущий момент позволяют получать детали с точностью порядка 0,05 мм и шероховатостью до Ra 6,3 в отдельных направлениях.

2. Сформулированные критерии выбора деталей позволили определить направления применения технологии селективного лазерного сплавления при изготовлении изделий РКТ. ■

Литература

1. ГОСТ Р 57558–2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2018. 16 с.
2. Королев В.А. Новые материалы и цифровизация аддитивного производства. https://metal3d.ru/upload/Korolev%20Vladimir_Новые%20материалы%20и%20цифровизация%20аддитивного%20производства%20-%20опыт%20ИЛМиТ.pdf

3D-печать полиметаллами. Вы готовы?



*Дмитрий Трубашевский,
руководитель подразделения «Аддитивные технологии»
ООО «Современное оборудование»*

Введение

Мир цифрового аддитивного производства (АП) с начала своего рождения изменился настолько, что производимые с его помощью изделия, возникающие при 3d-печати вопросы и способы их решения, и даже функциональность оборудования перешли в совершенно иную область взаимодействия с потребителями предприятий. Казавшиеся недавно фантастическими области применений, а также сама «бионическая» или топологически оптимизированная форма изделий сегодня уже воспринимаются как данность за счет интенсивного развития таких технологий. Все меньше приходится убеждать скептиков и общественность в пользе аддитивных технологий (АТ) и их возможностей не только для быстрого прототипирования, но и для производства ответственной кастомизированной продукции и оснастки. Тем не менее, для многих очевидно, что у АТ еще есть огромное поле для совершенствования и воплощения в жизнь некогда фантастических возможностей. И одно из них — это многоматериальность, ММ (англ. Multimaterial additive manufacturing, ММ-АМ).

В чем же суть таких возможностей? Если говорить простым языком, то это способность оборудования печатать изделия из двух и более материалов. Многие из специалистов, давно знакомых с 3d-печатью нитевидными и порошковыми термопластами, реактопластами (фотополимерами, жидкими смолами), пастообразными материалами, знают о способности технологий экструзии материала FDM/FFF, PЕМ, струйного нанесения материала MJM, струйного нанесения связующего VJ/3DP и даже синтеза на подложке SLS работать одновременно с двумя и более материалами. Известно, что такие возможности элегантно решены у технологий MJM и VJ, позволяющих строить полноцветные изделия в цветовом пространстве СМУК с миллионами ярких цветов. Начинают появляться в 3d-печати также экзотические проекты с металломатричными композитами, ММС (англ. Metal matrix composite) и так называемыми функционально-градиентными материалами, FGM (англ. Functionally gradient materials). Но речь сегодня не о них. Рассмотрим в этом обзоре максимально близкие к коммерческой эксплуатации АТ, работающие с металлопорошками и даже проволокой, их успехи в 3d-печати биметаллической и полиметаллической продукции.

Сегодня некоторые требовательные и наукоемкие отрасли промышленности всерьез озабочены разработкой полиметаллических изделий с уникальными

свойствами, а также упрощением и удешевлением технологий их получения. Производство какой же ММ-продукции и каких свойств для современных промышленников представляет особый интерес?

- Теплопроводность: теплообменники, радиаторы, трубки, пресс-формы, форсунки, воспламенители ракетных двигателей, ракетные сопла, тормозные суппорта.
- Электропроводность: разъемы батарей, элементы спутников.
- Антифрикционность: тефлоновые, латунные или прочие втулки/покрытия на поверхностях подшипников скольжения.
- Износостойкость: вставки для сверл, износостойкие пластины, напаиваемые на режущий инструмент.
- Магнитная эффективность: двигатели, приводы.
- Эстетические качества: предметы роскоши (часы, модные аксессуары), кастомизация спортивных товаров.
- Электромагнетизм: оптимизация распространения волн, антенны.
- Радиационная защита: защита мест установки датчиков.
- Вибрации: модальная оптимизация.
- Коррозионностойкость: химические реакторы, каналы конформного охлаждения.

Полный цикл традиционного производства получения серийных полиметаллических изделий включает в себя несколько распространенных процессов с высокой трудоемкостью и малой гибко-

стью для мелкосерийного производства:

1. Плавка сырья: здесь, как правило, применяется высокая температура, большое количество энергии и времени.

2. Литье в песок, гипсовые формы, штамповка, центробежное литье и др.

3. Придание формы заготовке: горячий или холодный прокат, экструзия, пултрузия и др.

4. Финишные операции: шлифовка, полировка, ЧПУ-механообработка, травление и др.

5. Соединение: сварка, пайка, склейка, штамповка, крепеж, а также их комбинации.

В результате на весь цикл могут уходить дни, часто недели, а на некоторых производствах с учетом неэффективной логистики — даже месяцы. В современных условиях, в которых оказалась Россия, это непозволительно долго. О разработке новой продукции при такой трудоемкости и речи быть не может!

Стоит отметить, что одним из самых слабых мест полиметаллической продукции при использовании устоявшихся методов производства принято считать область соединения разнородных материалов. Зачастую соединяют детали сваркой, пайкой или склейкой, как правило, с резким разделом материалов. Материалы, используемые для соединения металлов, могут быть концентраторами напряжений и приводить к растрескиванию компонентов под действием сил и температурного градиента среды эксплуатации. На примере напряжений по фон Мизесу микроструктуры клапана двигателя внутреннего сгорания можно сравнить особенности соединения нержавеющей стали AISI 304L с инконелем 625 в двух вариантах: 1) градиент, полученный с помощью АТ (рис. 1, изображение слева) и 2) жесткий раздел, полученный сваркой трением (рис. 1, изображение справа).

Другой подход заключается в локализованном изменении химии — использовании FGM или создании микроструктур, например, закалке стали, селективной термообработке. Несмотря на кажущуюся более сложную природу этого подхода, он широко распространен в промышленности и используется веками.

Разработчики аддитивного образования LB-PBF или DED-P прекрасно знают, что материалы одного класса могут быть сплавлены между собой с очень похожими или равными параметрами процесса без реальной потери качества. Главное, чтобы материалы были совместимы друг с другом (другими словами, качественно сваривались) и не давали трещин на границах, заметно ослабляющих прочность получаемых деталей. Например, можно оставить одинаковыми параметры мощности лазера для каждого слоя или даже не прерывать вектора сканирования. Типичные примеры: нержавеющая сталь + кобальт-хромовые сплавы, нержавеющая сталь + инконель, алюминиевая бронза + инконель, медь + серебро, вольфрам + тантал, и другие. Поэтому полиметаллические детали — это не проблема для технологий газопорошковой наплавки, проволочной наплавки,

холодного газодинамического напыления сверхзвуковым газовым потоком.

Казалось бы, возможность быстрой и качественной 3d-печати полиметаллических деталей уже решает главную задачу для многих инноваторов, разработчиков, позволяя уже через несколько часов увидеть деталь без необходимости задействования полного технологического цикла традиционного производства. И вот с приходом АТ и их возможностей некоторые из предприятий — разработчиков высокотехнологичной продукции находят для себя, возможно, судьбоносные решения.

Прямой подвод энергии и материала DED-P. Металлопорошки

Одна из первых металлических АТ, которая громко заявила миру о возможности 3d-печати изделий из двух, трех и даже четырех материалов, — прямой подвод энергии и материала из металлопорошковых композиций, DED-P (англ. Powder direct energy deposition), или, как часто ее называют в России, газопорошковая наплавка (рис. 2). Такая возможность по-

Рис. 1. Сравнение напряжений по фон Мизесу микроструктуры клапана двигателя внутреннего сгорания при переходе от нержавеющей стали AISI 304L к инконелю 625, [1]

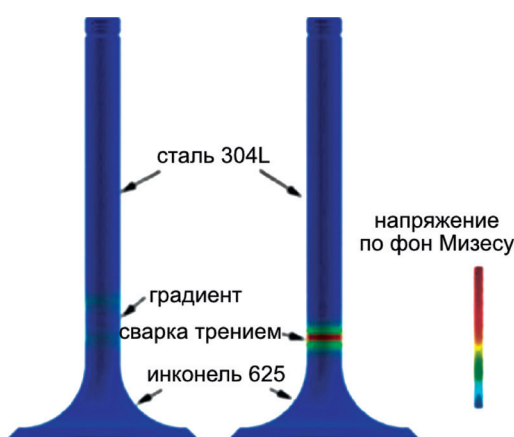


Рис. 2. Схема технологии газопорошковой наплавки

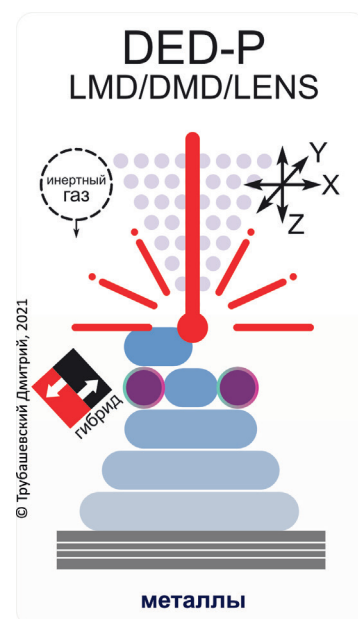
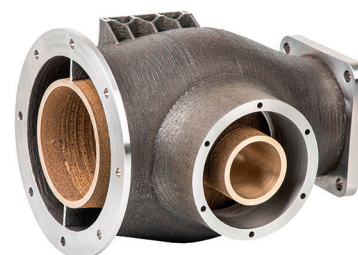


Рис. 3. Полиметаллическое ракетное сопло, напечатанное по технологии DMT/DED-P (фото: Insstek, Корея)



Рис. 4. Возможности гибридной обработки ММ двухканального теплообменника из меди (внутренняя часть) и алюминия (внешняя часть) на станке LASERTEC 3D (фото: DMG MORI, Германия)



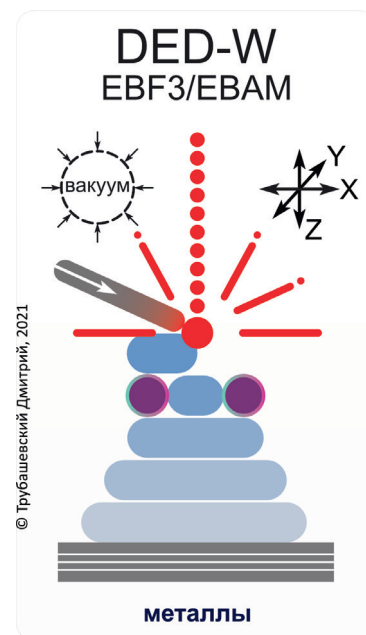
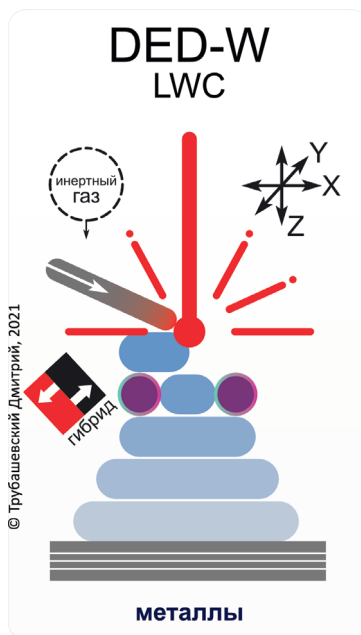
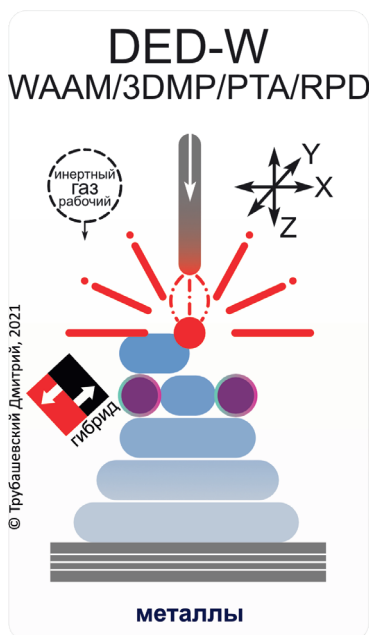
явилась благодаря использованию нескольких питателей, способных попеременно дозировать необходимое количество порошка для нанесения осаждающей головкой. Стоит отметить, что строить несколькими материалами с четкой границей или FGM в этой технологии получается достаточно просто. Данная технология успешно используется для технического обслуживания и ремонта (ТОиР); добавления конструктивных элементов деталям, полученным другими технологи-

ями; создания деталей сложных форм «с нуля». Правда, сложность получаемых по этой технологии изделий можно обозначить как среднюю, несмотря на то, что часто можно встретить оборудование в пяти и даже семиосевом исполнении, не говоря уже о полной свободе движения при использовании РТК. Дело в том, что при печати деталей по технологии DED-P не используются поддержки, а также внешняя среда для частичного отвода тепла. С этой технологией

не стоит переживать по поводу размеров получаемых изделий. Потребитель может выбрать для себя либо: компоновку фрезерного станка с предустановленной осаждающей головкой — этот вариант используется для высокой безопасности, точности и повторяемости, либо вариант с робототехническим комплексом (РТК), для которого в ущерб точности и повторяемости потребитель получает практически неограниченные размеры изготовления продукции.

Среди потребителей таких решений смело можно назвать машиностроение для авиационных и ракетно-космических применений (рис. 3), а также широкий ряд

Рис. 5. Схема технологии наплавки проволокой



применений для ремонта оснастки или износившихся ответственных деталей.

Иногда можно увидеть и гибридные станки, которые могут печатать детали большого размера и затем производить лезвийную механообработку ответственных поверхностей деталей под сборку или крепеж — и все это может происходить на одном станке (рис. 4).

Среди ярких представителей этой технологии стоит отметить компании, расположенные практически на всех континентах: VeAM группы AddUp (Франция), Meltio (США), ОРТОМЕС (США), Triumph (Германия), Insstek (Корея), DMG MORI (Германия), ИЛИСТ (Россия), и многие другие.

Прямой подвод энергии и материала DED-W.
Металлическая проволока

Вторая технология, которая решает вопрос с полиметаллической 3d-печатью, это DED-W (англ. Wire direct energy deposition), в которой осуществляется прямой подвод энергии и материала в виде проволоки (рис. 5). На сегодняшний момент наплавка проволокой

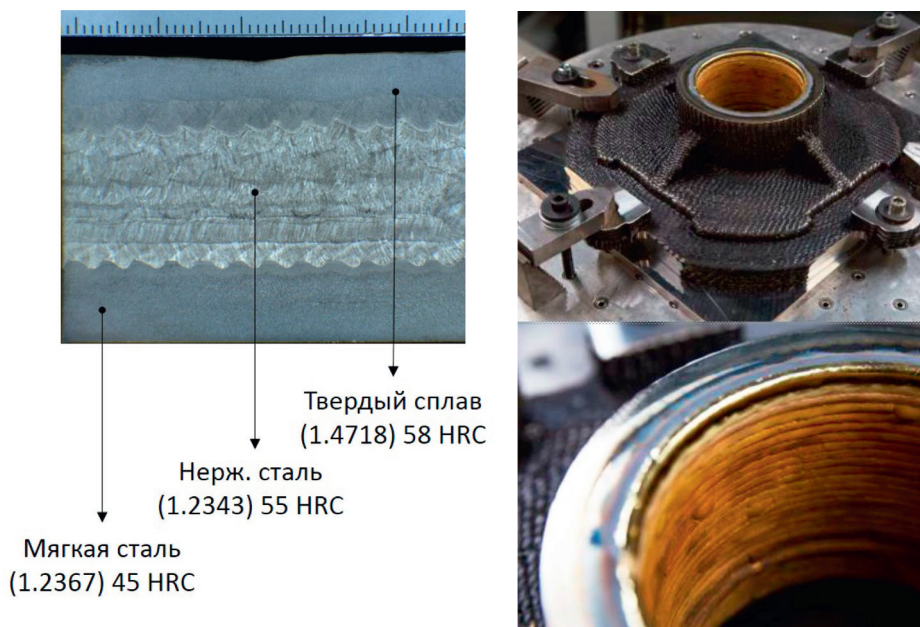
происходит с помощью лазера, плазмы (дуги), а также электронного луча. Здесь также при работе с несколькими проволоками стоит помнить о правиле совместимости материалов. За редким исключением (только в случае конструкции с двумя и более механизмами подачи) единовременная подача разных видов проволоки в зону плавки не применяется, как, например, это элегантно решено в технологии DED-P. По этой причине, если возникает необходимость в наплавке разной проволокой, то производят легкую и быструю переналадку на требуемый материал, и продолжают техпроцесс (рис. 6). В данном случае, очевидно, что можно говорить только о резких границах материалов по причине невозможности осуществления градиентных переходов. Сколько материалов в каждом изделии — решает сам потребитель, целенаправленно прерывая процесс построения и затем запуская его снова, но с новой проволокой и технологическими параметрами. Технология DED-W имеет выигрышные позиции по части скорости наплавки, безопасности (в меньшей степени это можно отнести к электронно-лучевой плав-

ке), стоимости 3d-печати (спасибо доступной сварочной улучшенной проволоке 3DPrint/AM) и даже размерам 3d-печати по отношению ко многим другим металлическим АТ.

С каждым годом появляется все больше компаний, проявляющих интерес к работе с проволокой. Это вполне объяснимо ранее озвученными преимуществами, а также стоимостью и доступностью на любых рынках импортируемой или произведенной в своей стране сварочной проволоки. Если работа с порошком всегда требует высоких компетенций производителя, исполнения требований по хранению и эксплуатации материала, периферийного оборудования для сбора и регенерации порошка, то для проволоки таких требований попросту нет. Более того, обеспечение постоянства качества по части морфологии, химического состава и т.п. от партии к партии на порошке крайне затруднительно. Проволока же всегда имеет единые стандарты, сертификаты, и четкое их исполнение производителями. Поэтому нет потребности в проверке качества проволочных материалов в соответствующей лаборатории на стороне потребителя.

Среди заметных представителей технологии DED-W стоит отметить такие компании, как Sciaky, Inc. (США), Gefertec GmbH (Германия), Norsk Titanium AS (Норвегия), Meltio (США), MX3D B.V. (Нидерланды), RAMLAB (Нидерланды), и другие. Также существует огромное количество некоммерческих проектов проволочной наплавки среди университетов и некоторых инженеринговых компаний, нацеленных на исследования, и, в некоторых случаях, на собственное позаказное производство, например, Центр сварочного инженеринга и лазерной обработки Крэнфилдского университета WAAM (Великобритания), S7 Technics (Россия),

Рис. 6. ММ 3d-печать по технологии 3DMP/DED-W. (фото: Gefertec GmbH, FIT Additive Manufacturing Group, Германия)



Южно-Уральский государственный университет (Россия), и многие другие.

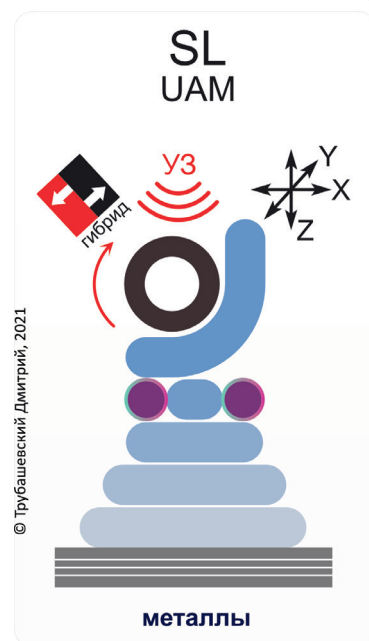
Важно помнить, что работа с технологией DED и ее разновидностями требует специальных знаний от инженеров и операторов, особой подготовки моделей к 3d-печати (часто упрощенной геометрии компонентов), понимания возможностей как АТ, так и программирования в G-кодах, обязательного при освоении фрезерных обрабатывающих центров.

Листовая ламинация SL

Технология листовой ламинации SL (англ. Sheet lamination) — нечастый гость в аддитивном сообществе (рис. 7–10). Ее распространение сдерживает отсутствие гибкости, присущей порошковым АТ. Наибольший интерес в SL представляет технология ультразвуковой ламинации UAM (англ. Ultrasound additive manufacturing). Как понятно из названия, соединение фольгированной металлической ленты в ней происходит

посредством ультразвука, причем структура материалов не изменяется, как в случае с PBF- и DED-технологиями и хрупкими интерметаллидами. Температура плавления алюминия для перехода в жидкое состояние составляет в среднем 660°C, а литейные сплавы с кремнием и магнием (часто используются в порошковых АТ) будут иметь температуру точки плавления 470°C [2]. Температура же сварки алюминия по технологии UAM соответствует 150°C, оставаясь ниже температуры превращения большинства металлов с неизменяющимися механическими свойствами. Очевидно, что из-за низкой рабочей температуры последующая термообработка требуется крайне редко. Эта особенность может быть использована для сварки различных металлов, встраивания датчиков/электроники, в том числе неметаллических. Например, комбинация алюминиевой и танталовой фольги способна защитить чувствительную электронику спутникового оборудования от вредного воздействия радиации. А комбинация слоев

Рис. 7. Схема технологии листовой ламинации



[3] из алюминия и титана позволяет производить броню с очень специфическими свойствами инженерного материала (комплексно рассматривается коэффициент теплового расширения, модуль упругости, прочность на растяжение), которые меняются в зависимости от его толщины.

Рис. 8. UAM позволяет соединять разнородные металлы без образования хрупких интерметаллидов (фото: Fabrisonic LLC, США)

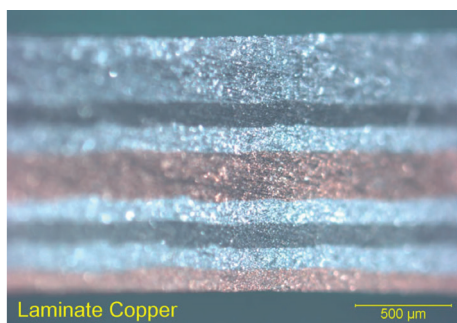


Рис. 9. Демонстрационный ММ образец возможности 3d-печати тремя материалами по технологии UAM (фото: Fabrisonic LLC, США)

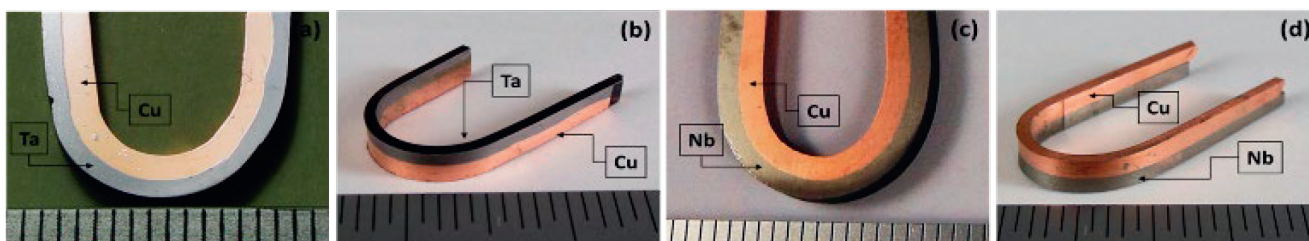


Рис. 10. Успешно апробированные парные варианты свариваемых соединений по технологии UAM (изображение: Fabrisonic LLC, США)

	Al	Be	Cu	Ge	Au	Fe	Mg	Mo	Ni	Pd	Pt	Si	Ag	Ta	Sn	Ti	W	Zr
Al Alloys	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Be Alloys		●				●										●		
Cu Alloys			●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●
Ge				●							●							
Au	●	●			●	●		●	●	●	●	●	●			●	●	●
Fe Alloys					●				●	●	●		●	●		●	●	●
Mg Alloys							●									●		
Mo Alloys								●	●		●			●		●	●	●
Ni Alloys									●	●	●			●		●	●	
Pd										●			●	●				
Pt Alloys											●	●		●		●	●	
Si												●	●					
Ag Alloys													●	●				●
Ta Alloys														●		●	●	
Sn															●			
Ti Alloys																●	●	
W Alloys																	●	
Zr Alloys																		●

Material pair proven for ultrasonic welding

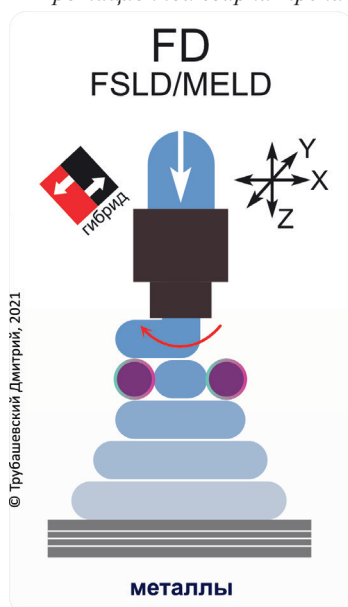
Рис. 12. Соединение тантала (Ta) и ниобия (Nb) с медью по технологии MELD (фото: Aeroprobe Corporation/MELD Manufacturing Corporation, США)



Экструзия материала FD

Технология экструзии материала, или ротационная сварка трением, FD/AFSD (англ. Friction deposition, Additive friction stir deposition), осторожно врывается в аддитивное производство благодаря давно известному и стабильному техпроцессу (рис. 11). Многих производителей должен заинтересовать факт отсутствия сильного термического воздействия на металл в этой технологии в противовес многим АТ, оперирующим высокоэнергетическими источниками. Технология FD является отличным выбором для создания покрытий и полиметаллических соединений, поскольку она создает сильную металлургическую связь, не отличимую от цельного материала.

Рис. 11. Схема технологии ротационной сварки трением



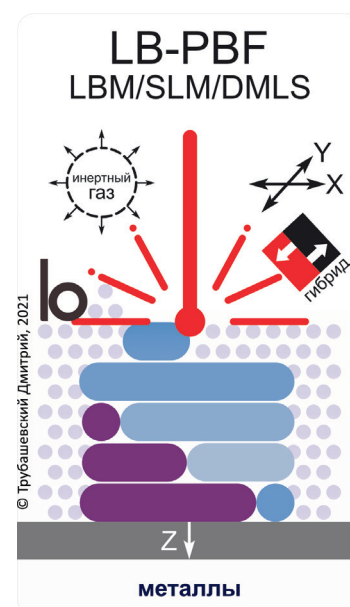
С помощью этой технологии можно соединять широкий спектр металлов, включая алюминиевые сплавы (даже те, с которыми не могут работать технологии LB-PBF, DED), титан, магний(!), сталь, жаропрочные сплавы, нестандартные механически легированные материалы, например, алюминий-молибденовый сплав, разработанный компанией Aeroprobe Corporation (MELD Manufacturing Corporation), и многие другие. На рис. 12 продемонстрирован пример соединения тантала (Ta) и ниобия (Nb) с медью по технологии MELD. Образцы были произведены в 3-х осевом режиме работы на плоскости, а потом были согнуты в U-образную форму. Никаких трещин или расслаивания в изделиях не было обнаружено. Также в качестве ММС можно добавлять армирующие материалы и менять их концентрацию. Технология FD более безопасна, чем многие другие АТ. Станки на ее основе потребляют меньше электричества, а в качестве сырья может использоваться как металлопорошок (что используется крайне редко ввиду высокой стоимости), так и бруски и даже станочная стружка!

Синтез на подложке LB-PBF

Вот мы и дошли с вами до нашего последнего «героя», покоровшего мир благодаря своей способности 3d-печати сложнейших изделий за один технологический цикл, — синтеза на подложке LB-PBF, часто именуемого в Рос-

сии SLM (рис. 13). К сожалению, данная технология хоть и имеет, пожалуй, самое большое количество вовлеченных в разработку и производство компаний, но все же не может похвастаться завидным количеством ММ-проектов. Все дело именно в особенности процесса, не позволяющего классическим рекоутером и ножом/скребком/роликом легко реализовать одновременную работу с несколькими материалами. По этой причине хотелось бы выделить нескольких разработчиков, единицы из которых нашли в себе силы запустить коммерческое производство ММ-принтеров. Несмотря на некоторые отличия запатентованных решений, их объединяет то, что конструкция дозирующего и выкладывающего устройства позволяет наносить порошок в строго определенное место, в отличие от роликовых и скребковых.

Рис. 13. Схема SLM-технологии



Среди популярных схем многоматериальной LB-PBF-печати можно отметить следующие (рис. 14) — [4]: а) двойной дозатор с распределением порошка ракелями, б) двойной дозатор с ультразвуковым преобразователем, в) двойной дозатор с электрофотографическими барабанами, г) гибридная система распределения порошка с ультразвуком и ракелем.

Первый шокирующий проект, по завершению которого весь мир воодушевился высоким потенциалом технологии LB-PBF для работы с несколькими материалами, был выполнен компанией Aerosint SA (Бельгия) в тесной коллаборации с Aconity3D GmbH (Германия). В Aerosint SA разработали уникальное подающее устройство с прецизионной подачей (дозацией) порошка для изготовления деталей из двух материалов (рис. 15), а Aconity3D GmbH предоставила свой модульный 3d-принтер AconityMIDI+ в качестве донора для успешной реализации биметаллической 3d-печати.

Растущий интерес к ММ-печати проявляют и знаменитые институты с передовым многолетним опытом научных разработок, выполняя свои работы порой на не предназначенных для этого 3d-принтерах ведущих брендов. Одним из них является, например, проект перепроектирования медного теплообменника и его изготовления по обычной технологии DMLS/LB-PBF (слева на

Рис. 14. Популярные варианты схем ММ 3d-печати по технологии LB-PBF

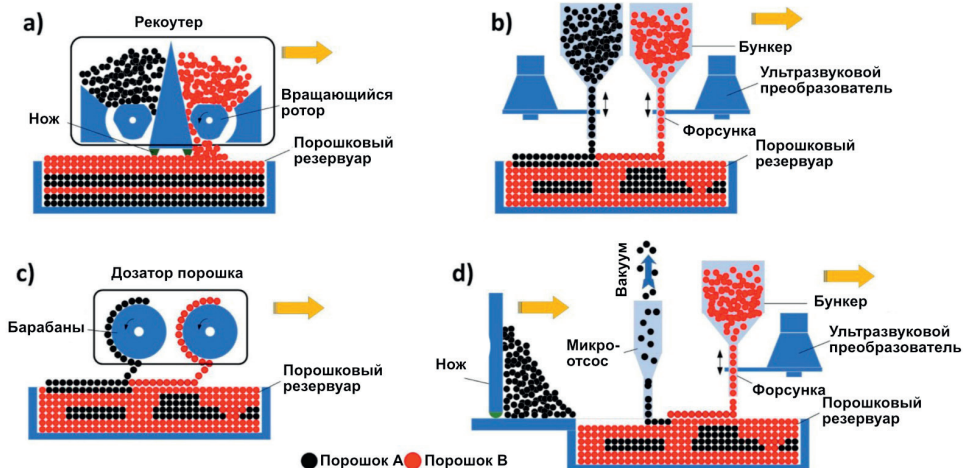


рис. 16) исследовательской группой по аддитивному производству функциональных материалов (AMFM) Бристольского университета. Продукт проведенной модернизации — многоматериальный теплообменник-демонстратор с уменьшенными габаритами и более высокими эксплуатационными показателями, состоящий из нескольких элементов и материалов: медь — серебро (входные и выходные трубки), чистое серебро (теплообменник), медь (змеевик). Сложно себе представить, сколько времени и сил было затрачено учеными для

реализации этой идеи на не предназначенном для этого 3d-принтере! Примечательно, что разработчики в проекте часто использовали эффективные элементы трижды периодической минимальной поверхности, ТПМП (англ. Triply periodic minimal surface, TPMS).

Подобные продвинутые системы АП разрабатываются не только в Европе. Китайский производитель SLA и LB-PBF-принтеров, пока малоизвестная в России компания Bulltech Technology Co., Ltd., уже несколько лет серийно выпускает свою флагманскую для

Рис. 16. Экспериментальные работы с 3d-печатью теплообменника, выполненные на обычном LB-PBF 3d-принтере компании EOS GmbH (фото: исследовательская группа по аддитивному производству функциональных материалов (AMFM), Группа управления электроэнергетикой Бристольского университета, Великобритания)

Рис. 15. Биметаллическая 3d-печать теплообменника из материалов CuCrZr и AISI 316L (фото: Aerosint SA (ныне Desktop Metal, США))

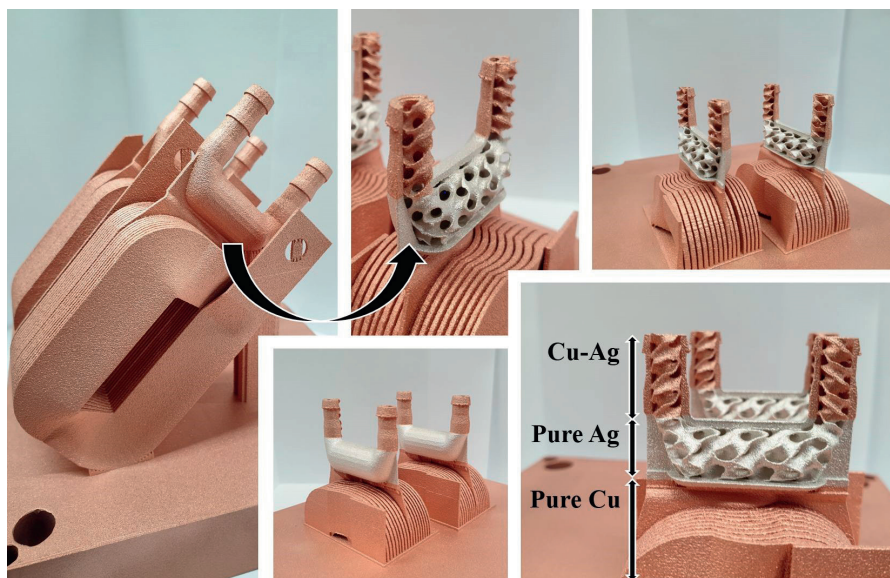




Рис. 17. Примеры ММ 3d-печати по модернизированной технологии LB-PBF (фото: Bulltech Technology Co., Ltd., Kumaii)

НИОКР систему для ММ-производства — M300-Multiple, способную осуществлять 3d-печать одновременно с четырьмя металлическими порошковыми композициями (рис. 17)!

Одним из основных вызовов, стоящих перед технологией LB-PBF, можно считать сложность сортировки отработанного расходного материала (фильтрация, повторное использование, утилизация). Если не заниматься этим вопросом, то себестоимость изготовления продукции будет заметно выше, чем при работе с одноматериальным процессом. Однако уже сейчас ведутся работы по сокращению использования дорогих металлопорошков. Например, в технологии LB-PBF это возможно при использовании материала-наполнителя, такого как более дешевый металлический порошок, керамический порошок, или даже растворимый материал. В результате количество порошка, требующегося для 3d-печати, можно рассчитать по простой

формуле: полезный объем модели + 10–15%. Остальное пространство будет заполнено более доступным материалом-наполнителем. Согласитесь, это гораздо выгоднее, чем использование дорогих материалов для всего объема 3d-печати.

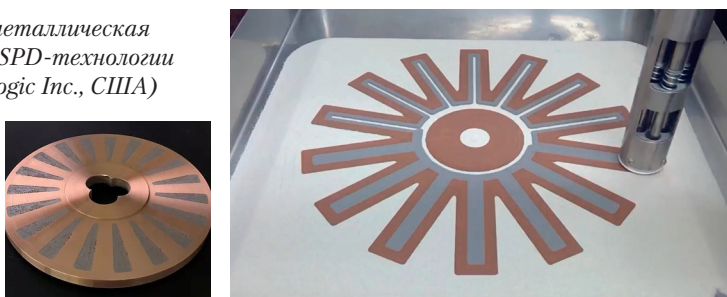
Рассмотрим еще один любопытный проект от американской компании Grid Logic Incorporated. Их технология выборочного осаждения порошка SPD (англ. Selective Powder Deposition/Multi-Material Powder Bed) достаточно оригинальна и похожа одновременно на такие популярные технологии, как PBF, FDM, PEM, VJ. В технологии SPD не требуется связующее, как в VJ, а порошки, включая дорогостоящие, выборочно наносятся там, где это требуется, а не по всей зоне построения, как, например, в PBF. К преимуществам этой технологии также можно отнести отсутствие напряжений. Что касается ММ, то суть SPD сводится к тому, что последовательно из металлопорошка печатается весь объем требуемого

изделия, а «пустоты» заполняются вспомогательным материалом за один технологический цикл. Вся полученная форма потом подвергается температурной обработке в печи для спекания частиц металла и насыщения заготовки бронзой. Работать можно с такими порошками металлов, как стальные сплавы, медь/медные сплавы, Ti-6Al-4V, никелевые сплавы, вольфрам и его сплавы, инконель 625, и другими. В качестве материала-заполнителя можно использовать циркониевые, хромитовые порошки, глинозем, карбид и оксид кремния, и даже хлорид натрия. Слева на рис. 18 продемонстрирована напечатанная заготовка, полученная из стали и меди, а справа показан процесс построения медно-стальной заготовки в окружении вспомогательного материала — циркония.

Программное обеспечение

Новые возможности и расширение сфер применения АТ за счет ММ невозможно представить себе без соответствующей подготовки файлов в программном обеспечении (ПО). Зачастую стандартное ПО не позволяет качественно работать с ММ, по этой причине многие из компаний вынужденно разбивают компоненты на элементы, в последующем назначая

Рис. 18. Полиметаллическая 3d-печать по SPD-технологии (фото: Grid Logic Inc., США)



материалы и режимы для каждого такого элемента. Другими словами, работать легко и просто с ММ-геометрией, как это реализовано в векторных или растровых редакторах 2d-графики сегодня, пока чаще исключение, чем правило. Тем не менее стоит надеяться на то, что в скором времени будут разработаны соответствующие модули для ряда нативного ПО или абсолютно самостоятельные и уникальные решения по аналогии с ММ-предложениями ПО для подготовки многоструйной фотополимерной MJM/PolyJet-печати или печати связующим VJ/3DP.

Обобщение

Подытожим ниже в табл. 1 возможности аддитивных технологий для ММ 3d-печати. В настоящий обзор не вошло описание некоторых АТ, присутствующих в данной таблице. Их потенциал в ММ

3d-печати может быть раскрыт уже в ближайшие годы при соответствующем запросе и готовности рынка, а также достойных научных разработках производителей и помогающих им в этом профильных институтов.

Заключение

Зачем же мы столько времени рассуждаем о многоматериальных возможностях АП? Успешные АТ позволяют заметно сократить путь разработки и цикла производства, имея в арсенале фактически сам 3d-принтер и сопутствующее оборудование [5]. При отлаженном технологическом процессе на выпуск требуемого изделия могут уходить всего лишь часы или считанные дни.

При текущем развитии АТ сложно найти уникальные, доступные только для них ММ-применения. Тем не менее можно с боль-

шой ответственностью признать растущий интерес к ММ-изделиям у следующих отраслей промышленности и сфер применений: инструментальное производство, энергетика, включая атомную промышленность, машиностроение, авиация, космос, транспорт, военно-промышленный комплекс, спорт, ювелирные мастерские, и др. Также стоит понимать, что только благодаря большим фундаментальным исследованиям современной науки станут доступны инновационные изделия и методы их получения. А пока лишь можно довольствоваться существующими применениями, которые были буквально «подсмотрены» у классических технологий: сложных, дорогих, и безальтернативных. До настоящего времени, конечно. В наших силах приблизить высокотехнологичное будущее! ■

Таблица 1. Возможности аддитивных технологий для многоматериальной 3d-печати

Параметр/технология	LB – PBF	MBJ	Metal FDM/ Metal Pellet FDM	DED – W	DED – P	SL	FD
Материал	П	П	Пр/Г	Пв	П	Ф	Б
Энергия	*	**	***	*	*	***	**
Сложность изделий	***	***	**	*	**	*	*
Скорость	*	***	*	***	**	*	***
Разрешение	***	***	**	**	**	**	*
Выбор материалов	**	**	**	***	**	*	**
Функциональность	***	***	***	**	***	*	*
Стоимость оборудования	*	**	***	**	**	*	*
Размеры изделий	**	**	*	***	***	***	***
Интеграция компонентов во время цикла печати	X	X	*	X	X	***	***
Требования к помещению	*	**	***	**	*	**	**

Условные обозначения: * – наихудшие показатели, ** – средние показатели, *** – лучшие показатели, Б – бруски, Г – гранулы, П – порошок, Пв – проволока, Пр – пруток, Ф – фольга, X – недоступно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Amit Bandyopadhyay, Bryan Heer, Additive manufacturing of multi-material structures, Materials Science and Engineering: R: Reports, Volume 129, 2018, Pages 1–16, ISSN 0927–796X, DOI: 10.1016/j.mser.2018.04.001
2. <https://ismith.ru/metal/temperatura-plavleniya-alyuminiya/>
3. <https://additivemanufacturing.com/2015/06/05/fabrisonic-patented-solid-state-ultrasonic-additive-manufacturing-welding-technology-to-bond-layers/>
4. Chao Wei & Lin Li (2021) Recent progress and scientific challenges in multi-material additive manufacturing via laser-based powder bed fusion, Virtual and Physical Prototyping, 16:3, 347–371, DOI: 10.1080/17452759.2021.1928520)
5. Трубашевский, Д. С. Аддитивные зарисовки / Д. С. Трубашевский. – Воронеж: Умное Производство, 2021. – 206 с.

Автоматизированная постобработка полиамида: новый подход к 3D-производству медицинских изделий

TopStanok, <https://topstanok.ru/>

Полиамид отлично подходит для создания ортопедических изделий, в том числе серийным методом. Однако при печати полиамидом возникает проблема, сужающая сферу ее применения. Она объясняется особенностями технологии: модель формируется путем точечного спекания частиц порошка между собой. В результате готовое изделие имеет шероховатую поверхность, которая сильно пачкается, сложно моется, впитывает жидкости и имеет недостаточные механические свойства. Для достижения требуемых характеристик модели требуется ее постобработка.

Существовавшие ранее методы обработки занимали до 70% времени, затраченного на весь процесс аддитивного производства. Большая часть их этапов осуществлялась вручную. Все это усложняло использование данного метода печати.

Технология PostPro выводит 3D-производство на новый уровень

Решением стала постобработка по технологии АМТ. В 2019 году компания презентовала установку PostPro для автоматического сглаживания и герметизации поверхностей специальным раствором. Она позволила добиться качества изделий, аналогичного литью под давлением.

В 2021 году компания выпустила модернизированную установку PostPro SF50 с камерой обработки на 50 литров. Также на рынок вышли две версии для массового производства еще большего размера, на 100 и 150 литров. Главным нововведением стало отсутствие чиллера, который использовался для образования конденсата на изделиях и охлаждения установки. Чиллер имел большой расход электроэнергии и занимал много места. Обновленные установки получили более дружелюбный интерфейс и позволили обеспечить лучшее качество поверхности и стабильность процесса.

Благодаря использованию метода автоматического сглаживания удалось добиться значительного совершенствования механических характеристик напечатанных изделий.

Относительное удлинение при разрыве для обработанных образцов составило порядка 355% по сравнению с 93% для необработанных (рис. 1). Таким образом, технология позволила улучшить данный показатель почти в три с половиной раза.

Относительное удлинение при разрыве для обработанных образцов составило порядка 355% по сравнению с 93% для необработанных (рис. 1). Таким образом, технология позволила улучшить данный показатель почти в три с половиной раза.

Рис. 1. Сравнение относительного удлинения при разрыве (%) для деталей из полипропилена, произведенных методом SLS-печати, до и после обработки

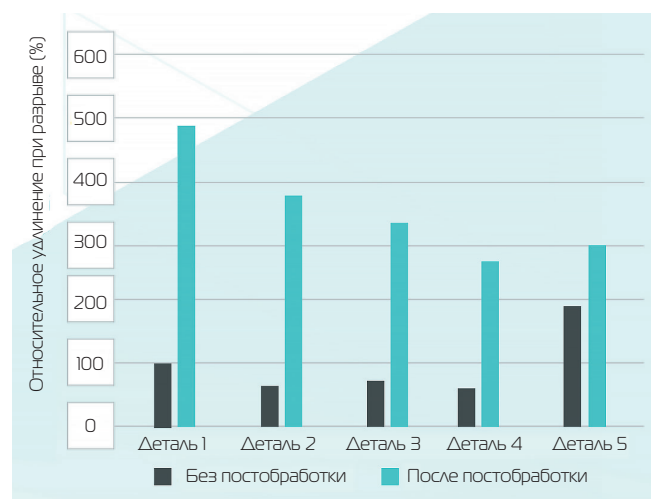
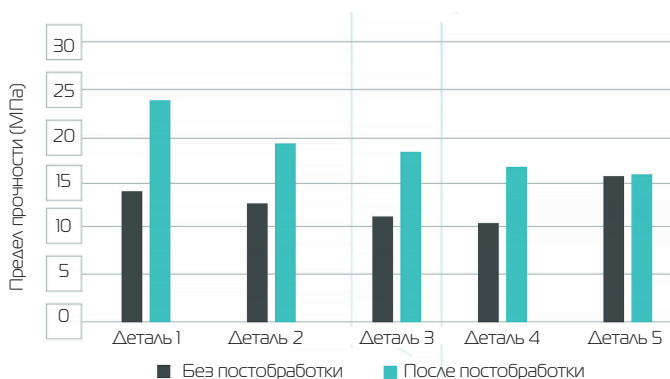


Рис. 2. Предел прочности (МПа) для деталей из полипропилена, произведенных методом SLS-печати, до и после обработки



- Улучшение также зафиксировано при сопоставлении значений напряжения при разрыве (рис. 2). Обработанные образцы продемонстрировали средний показатель 19 МПа, а необработанные — 13 МПа.

- Наблюдалось небольшое увеличение предела прочности на растяжение у обработанных деталей, в то время как модуль Юнга не показал каких-либо существенных изменений.

Указанные параметры имеют большое значение при производстве протезов, о котором мы хотим рассказать.

Влияние PostPro на механические свойства и комфортность напечатанных протезов

Компания, специализирующаяся на 3D-печати искусственных конечностей, изготовила для пациента протез бедра по технологии SLS. Протез адаптировали под сложную форму культы (рис. 3): из-за перенесенной реампутации имелись определенные трудности при создании подходящей лунки. Однако он все еще оставался недостаточно удобным.

Мужчина планировал продолжать занятия велоспортом и футболом. Но протез после ручной полировки не соответствовал бы необходимым характеристикам прочности. Кроме того, обработанный таким образом протез невозможно качественно промыть из-за пористой структуры, в результате чего на его поверхности создается идеальная среда для размножения бактерий.

Для улучшения удобства, стабильности и долговечности изделия в компании применили систему химического сглаживания PostPro. Технология совместима с широким спектром полимеров и позволяет обрабатывать 3D-печатные изделия MJF, SLS, SAF и FDM.

Процесс постобработки проходил следующим образом. Протез поместили в эргономичную герметичную

камеру, где использовалась запатентованная рабочая жидкость. Она подавалась в парообразном виде в систему с замкнутым контуром. Раствор оплавлял поверхность полимера, тем самым удаляя неровности, такие как места зарождения трещин. А также герметизировали изделие до получения требуемой гладкости.

В результате применения метода химического сглаживания удалось достигнуть следующих результатов (рис. 4):

1. **Повысилась прочность и долговечность** за счет улучшения механических свойств протеза, таких как удлинение при разрыве. Кроме того, увеличилась гибкость внутреннего гнезда TPU, что обеспечило больший комфорт при использовании.

2. **Решилась проблема размножения бактерий.** Воздействие специальным раствором позволило изолировать протез от проникновения жидкости. При физической нагрузке капли пота не проникали внутрь, а скатывались по стенкам. Также улучшилась стерильность: тесты демонстрируют уменьшение количества бактерий на обработанной поверхности.

3. **Сохранились вес и точные размеры протеза.** В процессе использования технологии PostPro происходит перераспределение материала по поверхности, а не удаление его, как при полировке. В результате изначальные характеристики изделия остаются неизменными. Это было особенно важно, поскольку протез имел сложную конфигурацию лунки для культы.

4. **Улучшился вид изделия.** Ровная, гладкая поверхность позволила создать эстетически привлекательный облик искусственной конечности.

По оценке пациента, прошедший обработку PostPro протез стал удобнее в носке. При этом он оказался прочным, гибким и достаточно устойчивым для привычных занятий спортом.

Важно отметить, что изделия, которые подверглись процессу химического сглаживания, не проявляют цитотоксического эффекта и полностью соответствуют требованиям к медицинским изделиям и компонентам ISO 10993-5, ISO 10993-1 и ISO 10993-12. Поэтому они легко проходят сертификацию для медицинского применения.

Применение технологии PostPro в других отраслях

Система финишной обработки поверхности PostPro3D успешно применяется и при изготовлении других сложных изделий.

В авиационной промышленности ее используют при производстве элементов управления и обшивки летательных аппаратов (рис. 5). Постобработка запечатывает детали и исключает влагопоглощение. Особенно важно это для военного вертолетостроения, где аппараты не обладают герметичностью и подвержены высокой влажности внутри салона.

Рис. 3. Печать протеза для пациента осложнялась сложной формой культы

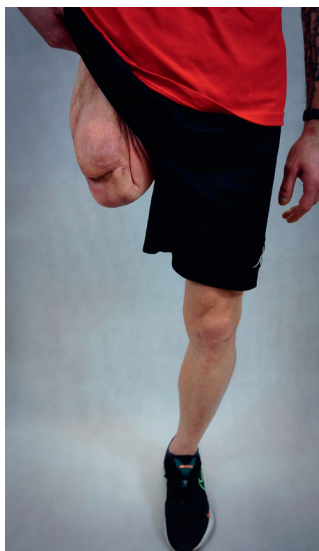


Рис. 4. Внешний вид протеза после обработки методом PostPro3D



Рис. 5. Финишная обработка особенно важна при печати компонентов для авиационной техники



В электронной промышленности обработка PostPro незаменима при 3D-печати корпусов (рис. 6). Она обеспечивает герметичность, делая их непроницаемыми для воды и пыли.

В сфере FMCG (производстве изделий массового спроса) постобработка позволяет расширить возможности производства. Благодаря ей улучшаются механические свойства конечных изделий, появляется возможность их мыть. Это особенно актуально при изготовлении очков, шлемов и ряда других товаров бытового назначения (рис. 7).

Таким образом, технология AMT PostPro3D является полностью автоматизированным, безопасным и экологически чистым способом финишной обработки. Она обеспечивает конку-

Рис. 6. Постобработка корпусов электронных устройств обеспечивает их герметичность

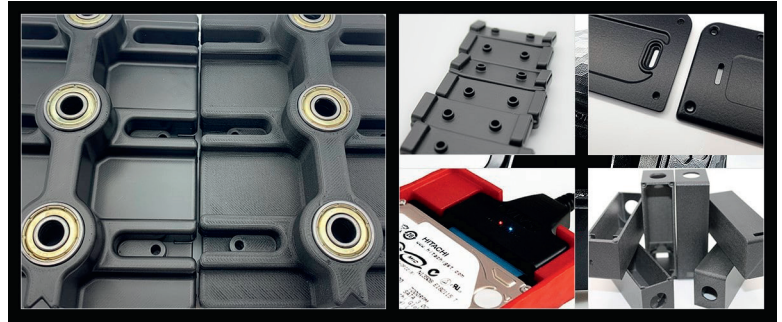


Рис. 7. Благодаря постобработке напечатанные на 3D-принтере изделия можно мыть



рентоспособную стоимость и скорость сглаживания поверхности изделий для крупносерийного производства. Технология успешно применяется во всех сферах промышленности и позволяет получать чистоту верхнего слоя с Ra менее 1 микрона. ■

ОПТИМИЗИРУЙ ПРОЦЕССЫ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ИНВЕСТИЦИЙ



- ▶ Запечатанная поверхность, которая не впитывает газ и влагу
- ▶ Снижение роста бактерий на деталях
- ▶ Увеличение относительного удлинения при разрыве (EAB) без потери предела прочности при растяжении
- ▶ Чистота поверхности, соответствующая технологиям литья под давлением, с RA менее 1 микрона.
- ▶ После обработки детали меняют размер не более чем на 0,4%

Одобен и сертифицирован для медицинского применения
ISO 10993-5/10

ТЕСТОВАЯ ОБРАБОТКА БЕСПЛАТНО

 **TopStanok**

stanok@topstanok.ru
8 (800) 500-33-91



3D-печать в строительстве: что нового?



Николай Михайлович Максимов

Пять лет назад автор опубликовал статью о новом направлении в строительстве [1, 2] — применении 3D-печати. Помимо описания технологии были приведены многочисленные опыты отдельных энтузиастов по созданию и использованию различных типов принтеров для строительной печати. В основном это были проекты, в которых определяющим были слова: в перспективе, ожидается, будет и т.д. Сейчас строительная 3D-печать стала реальной быстрорастущей отраслью, и в новом обзоре будет показано ее нынешнее состояние и дан новый прогноз на следующие пять лет.

Основные вызовы, стоящие перед мировой экономикой, — глобальное потепление и рост населения Земли, которое нужно обеспечить доступным жильем [3]. Строительство совместно с эксплуатацией жилого и нежилого секторов ответственно примерно

за 39% мировой эмиссии окислов углерода, которая дает основной вклад в глобальное потепление и изменение климата [4, 5]. В то же время растет спрос на новое жилье. По оценке ООН, к 2050 году 6,7 млрд населения Земли будут проживать в городах, и еще 3,1 млрд будут жить в трущобах. Это означает переселение в города почти 200 000 людей ежедневно в этот период. Чтобы обеспечить их жильем, нужно строить примерно по 13 000 домов ежедневно. Нынешняя стройиндустрия не может обеспечить такие темпы строительства. Только в США потребность в доступном жилье составляет около 7 млн домов [6]. Другая проблема — нехватка рабочей силы в строительстве. Решение нужно искать в автоматизации строительства, что, в дополнение снизит огромное количество несчастных случаев на производстве, 90% которых определяется человеческим фактором [5, 6]. Любопытное сопоставление уровня цифровизации (рис. 1) в различных приложениях человеческой деятельности представил доклад McKinsey&Company [7].

Автоматизация в строительстве предполагает использование инновационных технологий в виде строительных 3D-принтеров, систем сквозного моделирования в строительстве (BIM — Building Information Modeling), новых подходов к архитектурному конструированию.

Совокупный среднегодовой темп роста рынка строительной печати бетоном составит 106,5% в период с 2020 по 2027 годы и возрастет с \$310,9 млн до \$40,6 млрд.

Источники роста:

- высокая стоимость работ, требующих квалифицированных кадров в развивающихся странах;
- традиционное строительство производит много отходов, которые увеличивают себестоимость строительства и создают проблемы с их сбором и последующей утилизацией;
- строительная печать производит незначительное количество отходов и позволяет легко реализовывать сложные по форме архитектурные проекты;
- строительный бизнес восстанавливается после COVID-19;
- быстрая урбанизация в развивающихся странах требует быстрого массового строительства доступного жилья с минимизацией строительных отходов.

Основные ограничения широкого распространения строительной печати:

- высокая стоимость оборудования и его обслуживания;

Рис. 1. Уровень цифровизации в различных видах деятельности

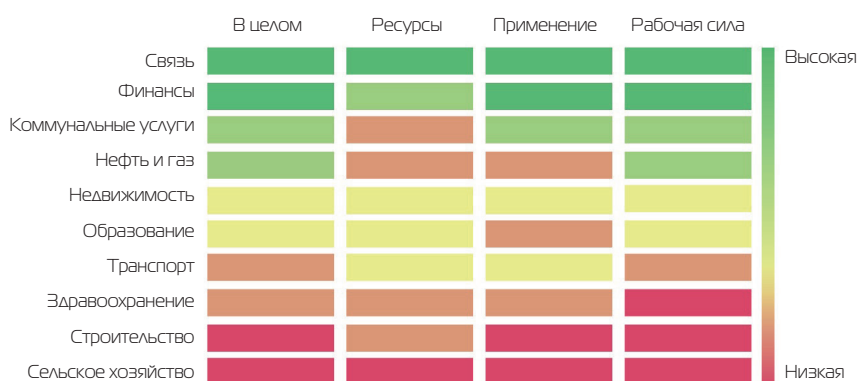




Рис. 2. Берок Хошневис — основатель строительной 3D-печати, президент и генеральный директор компании Contour Crafting Corporation



Рис. 3. Ма Ихэ — председатель совета директоров компании WinSun



Рис. 4. Александр Маслов — основатель и генеральный директор компании AMT

- ограниченные размеры рабочей зоны печати по площади и по высоте;
- для печати объектов больших размеров требуется большой объем дополнительного пространства для установки принтера и перемещения портала с печатающей головкой;
- для установки принтера для печати нескольких этажей необходимо использовать дополнительную технику — кран, подъемник, что удорожает строительство.

К достоинствам строительной печати нужно отнести следующее:

- свобода конструирования для архитекторов;
- отсутствие ошибок при печати — принтер напечатает то, что задано в рабочем файле с высокой точностью (до 2 мм в пределах рабочей зоны 12×12 м, принтеры AMT);
- снижение уровня травматизма на 90%;
- в целом снижение затрат на строительство на 15% (при этом экономия на рабочей силе — 30–50%, на времени строительства — 30–80%, на материалах — 20–60%; цифры даны условные, зависят от страны);
- практически нет строительных отходов;
- возможность использования б/у материалов;
- уменьшение эмиссии окислов углерода.

Технологии

В обзоре [8] справедливо указаны основатели строительной печати — школа доктора Берока Хошневиса (Behrokh Khoshnevis, компания Contour Crafting, профессор университета Южной Каролины, США, рис. 2), его ученика Ма Ихэ (Ma Yihe) — создателя китайской компании WinSun, ныне председателя совета директоров (рис. 3) и российской компании «AMT-Спецавиа» (основатель и генеральный директор Александр Маслов, рис. 4), технологию которой «позаимствовал» владелец датской компании 3D Printhuset

(ныне компания Peri с принтерами COBOD).

Если список компаний, работающих с 3D-строительными принтерами, в 2017 г. состоял из 10 компаний, то на начало 2022 г. известно свыше 40 производителей строительных принтеров [9] и около 50 компаний [10], которые оказывают услуги строительной печати. Естественно, есть пересечения обоих списков. Более того, часть производителей оборудования была куплена крупными компаниями-производителями строительных материалов, они легко привлекают большие инвестиции в развитие. Так, например, компания ICON получила \$185 млн и достигла оценки бизнеса в \$2 млрд в 2022 г. Основными игроками являются: Apis Cor, Cobod International A/S, CyBe Construction, D-shape, Heidelbergcement AG (Italcementi SpA), LafargeHolcim, Sika AG, Skanska, Yingchuang Building Technique (Shanghai) Co., Ltd. (Winsun), XtreeE, AMT.

Согласно принятой в AM, производстве классификации, строительная печать использует следующие технологии:

1. Экструзия строительной смеси через печатающую головку (материал на основе цемента, геополимер и еще десятки других материалов). Это наиболее освоенная технология.

2. Печать с жидким связующим, использующая гранулированные материалы, например, песок. Технология имеет хорошие перспективы для быстрого роста в следующие 5 лет.

3. Экструзия расплавленной пластиковой нити через головку (FDM), имеет ограниченное применение.

4. Фотополимеризация нанесенного слоя полимера при печати с последующим финишным отверждением. Пока есть единичные примеры применения, например, компанией Mighty Building (USA).

Наибольшее распространение получили порталные строительные принтеры из-за простой конструкции, легкости в работе и в обслуживании. Портал перемещается вертикально

Рис. 5. Портальный 3D-принтер S-300 (AMT)



Рис. 6. Принтер ICON на строительной площадке



по нескольким опорным стойкам (обычно 4, но бывает и больше), а печатающая головка перемещается в плоскости XY по направляющей балке и вместе с балкой. Так устроены, например, 3D-принтеры AMT, COBOD, Winsun (рис. 5).

Другое инженерное решение реализовано в принтерах Black Buffalo и ICON, где опорные стойки перемещаются по направляющим рельсам (рис. 6).

Black Buffalo, созданная автомобильным гигантом Hyundai из Южной Кореи, строит собственное производство строительных принтеров на территории более 40 гектаров в Пенсильвании. Компания работает в рамках межправительственного соглашения между Южной Кореей и США и потому является своеобразным гарантом в продвижении инновационных аддитивных технологий в очень консервативную отрасль — строительство, тем самым ускоряя процесс перехода к массовому использова-

нию АМ. Пока компания предлагает к использованию свой первый порталный 3D-принтер NEXCON с модульным вариантом жилья для туристических зон (рис. 7).

Портальные принтеры обычно имеют модульную структуру и сменные головки с различной производительностью. Модульная структура позволяет собирать принтер на месте под конкретный объект в зависимости от его площади и высоты. Для печати больших по площади объектов будет целесообразнее разбить модель объекта на несколько частей и строить затем каждую по отдельности с перестановкой принтера. Перестановка принтера занимает несколько часов. После завершения печати всего объекта и его армирования происходит заливка бетона в полости стен, что фактически напоминает монолитную технологию строительства. При этом важно понимать, что принтер строит всего лишь несъемную опалубку для

стен и перегородок с полостями для армирования, утепления и прокладки технологических коммуникаций (электрики, воды и прочее). Требования по прочности, тепло- и влагозащитности, заложенные в строительном проекте применительно к конкретному региону, выполняются выбором материала для печати и заливки, установкой арматуры по проекту, заливкой бетона (пенобетона) в полости стен. Отличие от традиционного монолитного строительства в том, что в нем опалубка снимается после отвердения бетона, а при печати она остается. Многочисленные испытания напечатанных образцов показали, что непосредственный вклад напечатанной несъемной опалубки в механические и защитные свойства стены незначителен, при этом характеристики напечатанной опалубки не сильно отличаются от проектных.

Если печать со связующим в промышленности, где используются керамика, металлы и сплавы, хорошо отработана и является приоритетной по своим возможностям (в частности, печать интерметаллидными сплавами, например, компания Desktop Metal + ExOne), то в строительстве одним из первых начал ее использовать E. Dini (D-shape). Принтер D-shape использует технологию печати из гранулированных материалов (песок, глины, вулканические породы)

Рис. 7. Модульное жилье для туристов



со связующим. Размер гранул от 0,1 до 4 мм и более, иногда с добавками фиброволокна. Принтер имеет две порталные системы на четырех колоннах: одну для нанесения материалов при построении слоев, другую с матрицей сопел для нанесения связующего.

Технология D-Shape® позволяет печатать практически все компоненты объекта от фундамента до крыши, включая потолки, лестницы, накладные элементы фасадов, стены и перегородки. Это стало возможным благодаря особому методу нанесения материала, который делает конструкцию самонесущей во время ее возведения. Таким образом, теоретически можно строить здания любой формы.

В отличие от порталной системы принтеров (с тремя осями координат) для строительной печати домов и сооружений на строительной площадке или отдельных элементов в цехе с последующей сборкой на месте, использование роботов (КУКА, АВВ и др.) позволяет печатать изделия более сложных форм. Вместе с тем роботизированные принтеры имеют ограниченную рабочую зону, при этом их нужно часто переставлять, а при печати внешних стен изнутри объекта невозможно напечатать внутренние перегородки.

Большинство компаний, создавших свои конструкции принтеров для 3D-печати, имеют единичные экземпляры оборудования и используют их для оказания услуг по печати домов строительным компаниям, либо для печати собственными силами. Две компании: Black Buffalo и Peri — выпускают 3D-принтеры для продажи и одновременно оказывают услуги по печати. Компания Winsun (Китай) только выполняет заказы по строительству объектов. Компания АМТ (РФ) придерживается другой стратегии — обеспечить массовое производство линейки строительных 3D-принтеров, когда появится огромный спрос на оборудование

для строительной печати в ближайшие годы. Это недорогое, отлаженное и надежное оборудование (ресурс работы 60 000 часов), простое в обслуживании и освоении, разного назначения — от небольших цеховых принтеров для обучения и подготовки специалистов строительной печати и печати отдельных деталей и элементов домов до принтеров для печати целых домов (до трех этажей) на строительной площадке. Уникальное решение компания предложила для высотного строительства — порталные принтеры серии S-500, практически без ограничения высоты застройки (условно указана максимальная высота 80 м).

Компания Aris Cor (из РФ переехала в США) получила разрешение Федеральной комиссии по ценным бумагам на привлечение инвестиций в объеме до \$70 млн с последующим выходом (в течение трех лет) на биржу Nasdaq. Компания получила грант от NASA на разработку технологии на основе робота для строительства объектов на других планетах и открыла свой офис во Флориде.

Aris Cor предполагает начать свой собственный строительный бизнес на территории США в 2023 году с использованием своих роботизированных принтеров.

При этом компания предлагает различные услуги, связанные со строительной 3D-индустрией: онлайн-курсы, семинары и учебные мастер-классы.

Компания Peri с 2019 по 2022 г. продала более 35 порталных 3D-принтеров, способных строить одно-, двух- и трехэтажные дома (рис. 8). Глава офиса компании в США Philip Lund-Nielsen заявил, что для них рынок США является приоритетным, и их задача показать, что строительная печать — это реальная живая альтернатива традиционному строительству. Компания разработала приложение-тренажер, для выбора габаритов объекта из своей библиотеки, количества этажей (до трех) с возможностью размещения объекта виртуально в окружении соседей (<https://cobod.com>). Приложение позволяет симулировать процесс печати (рис. 9). Максимальные размеры объекта, который можно загрузить: 12,1×47,5×9,1 м с площадью печати 574 м².

Основной трудностью для строительных компаний, планирующих использовать строительную печать, было получение разрешений от местных властей на застройку, поскольку на эту новую технологию не было соответствующих СНИИПов или строительных

Рис. 8. Компания Peri с принтером COBOD на строительной выставке в Лас-Вегасе (февраль 2022)

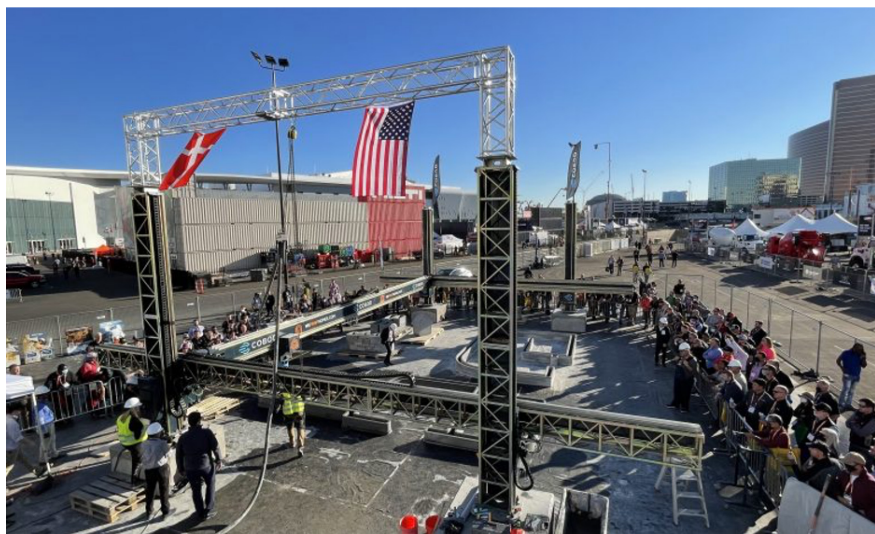


Рис. 9. Строительство компанией Beckit в Германии в 2020 г. трехэтажного дома с помощью тренажера 3D печати COBOD



кодов. Сейчас во многих странах появились соответствующие нормативные документы как на оборудование, так и на материалы для печати.

Например, в РФ в 2020 году были приняты следующие ГОСТы:

- ГОСТ Р 59095-2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Термины и определения»;
- ГОСТ Р 59096-2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Методы испытаний»;
- ГОСТ Р 59097-2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Технические требования».

Дорожная карта по строительной отрасли на 2022–2023 годы (распоряжение правительства РФ № 3719р от 20.12.2021) включает в себя:

- использование технологий информационного моделирования при проектировании и строительстве объектов капитального строительства;
- стимулирование применения энергоэффективных и экологических

материалов, в том числе с учетом необходимости их производства в Российской Федерации;

- внесение изменений в федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» в целях наделения Минстроя России полномочиями по разработке типовых образовательных программ, в том числе программ высшего образования и программ дополнительного профессионального образования для подготовки специалистов в области строительства, применения, контроля качества и оценки соответствия новых строительных материалов, изделий, конструкций и технологий, а также для применения аддитивных технологий (3D-печати) в строительстве;

- национальный стандарт «Технологии аэромониторинга с использованием беспилотных воздушных судов на этапах выполнения строительства и эксплуатации объекта капитального строительства, а также с использованием дополненной реальности»;

- подготовка плана до 2030 года по разработке документов по

стандартизации при технических комитетах по стандартизации ТК 366 «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности и «зеленая» инновационная продукция» и ТК 465 «Строительство» для внедрения «зеленых» технологий в области строительства.

В отдельных штатах США разрешения на жилищное строительство с использованием аддитивных технологий начали выдавать в 2020–2021 годах. Появился новый стандарт от TÜV SÜD ISO/ASTM 52920 standard, который относится к АМ из категории перечисленных в ISO 52900, и определяет меры по обеспечению качества в процессе производства.

Материалы для строительной печати

Подробный и тщательный анализ материалов для строительной печати дан в работе [11]. Прослеживается главная идея — как сделать строительство более экологичным. Для этого предложены многочисленные заменители классического

портландцемента, при производстве которого выбрасывается 5% мирового загрязнения CO₂. Рекомендуется снизить потребление речного песка при производстве строительных смесей на использование переработанных отходов, а также на применение природных местных материалов, которые явно в избытке (например, песок в пустынях) [12].

Другой способ снижения вреда для экологии — это так называемая оптимизация топологии печати [13], которая заключается в построении элементов в виде сотовых структур с меньшим потреблением материалов, но без потери качества (механических характеристик, теплозащитных и гидрофобных свойств).

Типы материалов для печати:

1. На основе цемента — базовый материал. Главные игроки: LafargeHolcim, HeidelbergCement, The Home Depot, Martin Marietta Materials, U. S. Concrete, Vulcan Materials Company, Fastenal, Geberit, Sika.

2. Материал, в котором цемент частично заменен на более экологичные связующие материалы: летучий пепел, мелкие стеклосферы (диаметром 150 нм), получаемые

при производстве кремния или феррокремния, измельченный гранулированный шлак от производства стали, зола от сжигания рисовой шелухи, глина, гипс, мел и другие [11].

3. Геополимеры — еще один класс материалов для строительной 3D-печати без использования цемента, в котором имеется основа: смесь сырьевых материалов (на базе шлака, пепла и стеклосфер из кремнезема) — и полимерное связующее на базе щелочных активаторов $\{(\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3), (\text{KOH}+\text{K}_2\text{SiO}_3), (\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3; \text{KOH}+\text{K}_2\text{SiO}_3)\}$. В результате химической реакции создается длинная цепочка молекул: гидроксид натрия (щелок) смешивают со стеклом (кремнеземом), получают силикат натрия (жидкое стекло), а затем берут реактивный минерал (глину), смешивают его для создания бетона (связующего). Геополимер больше похож на камень, чем на бетон. Геополимерный цемент основан на неорганических материалах с полимерной структурой молекул. Геополимерные вяжущие и бетоны отличаются высокой прочностью и обладают рядом специфических свойств. Они называются «геополимерами», потому что сырье, используемое для их производства,

в основном представляет собой полезные ископаемые геологического происхождения [14, 15, 16].

Геополимерный цемент химически инертен к целому ряду агрессивных веществ и сохраняет прочность в суровых климатических условиях. По сравнению с традиционной технологией производства бетона на основе портландцемента геополимер значительно превосходит его по прочности, долговечности, морозостойкости, огнеупорности, теплоизоляции, устойчивости к коррозии и агрессивным веществам, в том числе к некоторым видам кислот (таблица 1). Кроме того, использование геополимера снижает выбросы CO₂ до 90% по сравнению с производством портландцемента. Геополимер также может быть разработан для повторного использования и переработки промышленных побочных продуктов в виде заполнителей.

Основатели компании Renca — Андрей и Марина Дудниковы (РФ) и Alex Reggiani (Италия) — вывели продукт на рынок США [17] — рис. 10 (www.renca.org).

Геополимерный бетон, используемый в качестве конструктивного раствора при 3D-печати бетона, превосходит раствор на основе портландцемента, поскольку геополимер будет химически сплавляться, в то время как цемент на основе портландцемента будет иметь тенденцию к созданию холодного шва и будет трескаться от усадки. Благодаря этим фактам геополимер несравним ни с каким другим материалом по стабильности и прочности при 3D-печати.

Материал представляет собой некую основу, в которую, медленно замешивая, вводят полимерное связующее. Полученный материал можно использовать как в традиционном строительстве, так и в строительной печати. Эксплуатационные характеристики г/п во много раз превосходят традиционные материалы на основе цемента, а срок жизни составляет тысячи лет. Г/п

Таблица 1. Сравнительные характеристики материалов на основе цемента и геополимера

ПОРТЛАНДБЕТОН	ГЕОПОЛИМЕР
Отвечает за 12–15% загрязнения Земли	Геополимер на 88%+ более устойчив
• Использует более 1 триллиона литров пресной воды в год	Можно использовать повторно (без отходов)
• Срок службы 80–20 лет	Срок службы 10 000 лет
• Требуется вода для смешивания и очистки	Для очистки использует обратную или соленую воду
Не водонепроницаемый	Водонепроницаемый
Не пожаробезопасный	Огнеупорный
Не кислотостойкий	Кислотостойкий
Низкая прочность, высокая стоимость	Высокая прочность, низкая стоимость
Требуются заполнители из камня и песка	Использует широкий спектр заполнителей и переработанных отходов
	Можно использовать в морозную погоду

Рис. 10. Геополимер – сухая смесь + связующее



Рис. 11. Геополимер на основе древесных опилок и стружки



Рис. 12. Геополимер на основе легкого пенобетона



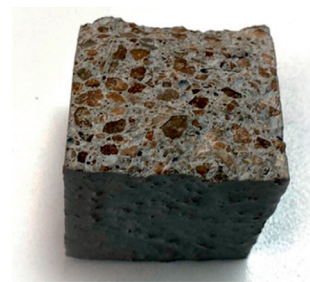
Рис. 13. Геополимер для использования переработанной пробки и придания ей огнестойкости



Рис. 14. Напечатанный блок черепицы с нанесенным огнезащитным слоем



Рис. 15. Геополимер на основе крошки гранита и базальта



можно изготавливать на основе древесных волокон, отходов производства пластмасс, переработанной резины и т.д (рис. 11–15). При этом за счет специальной пропитки материал получается негорючим и влагонепроницаемым, а наличие пор в материале делает его теплозащитным. Материал можно обрабатывать и окрашивать в любой цвет. Г/п на основе гранитной или базальтовой крошки (рис. 2) обладают огромной прочностью (127–137 Мпа).

Компания AZURE (Калифорния, США) предложила использовать при печати домов пластиковые отходы в виде добавок к строитель-

ному материалу (до 60%). В основном это отходы в виде пластиковых бутылок и пищевой упаковки. Сейчас компания использует роботизированный принтер (КУКА) для цифровой печати отдельных элементов дома, которые потом собираются на месте.

Примеры интересных проектов с использованием строительной печати

Примерами использования строительной печати являются: мосты, пешеходные переходы, фонтаны, обустройство прибрежных стенок на водоемах, заборы, мебель,

детские, спортивные и развлекательные площадки и многое другое.

1. К олимпиаде 2024 в Париже будет построен 40-метровый мост (рис. 16) консорциумом компаний (инженерная фирма Freyssinet, Levigne and Cheron Architects, Quadric – IT & AI, LafrageHolcim – строительные материалы, XtreeE – 3D-строительная печать).

2. Дизайнерское бюро Aectual (Нидерланды, <https://aectual.com>) совместно с высшей технической школой в Цюрихе предложили вариант акустических панелей для отделки интерьеров (рис. 17). В основу идеи положена форма морских волн. Напечатанные пане-

Рис. 16. Проект пешеходного моста в Париже

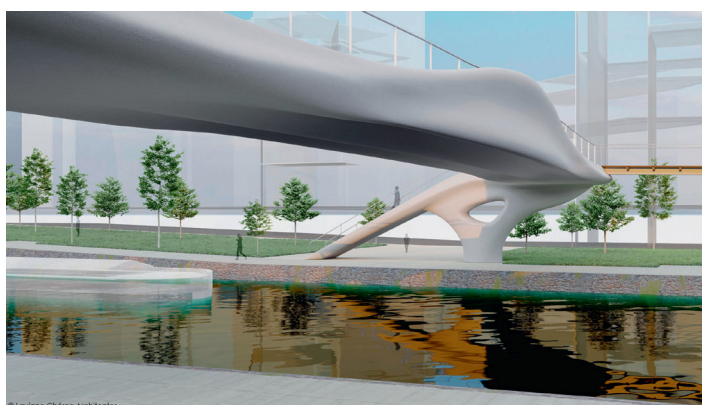


Рис. 17. Акустические панели



Рис. 18. Наборный напечатанный пол

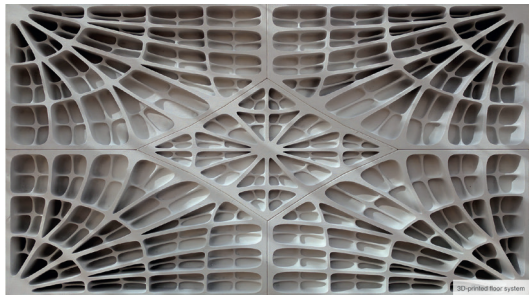


Рис. 19. Экран

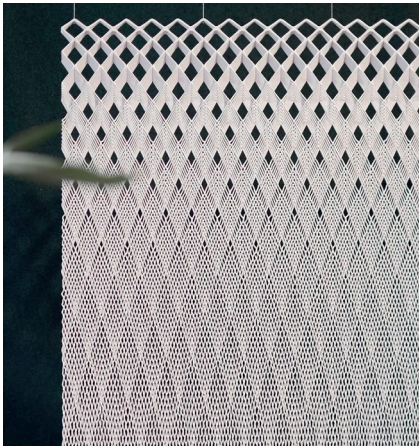
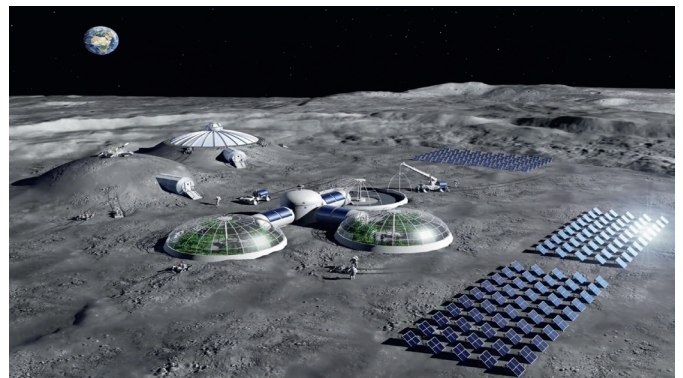
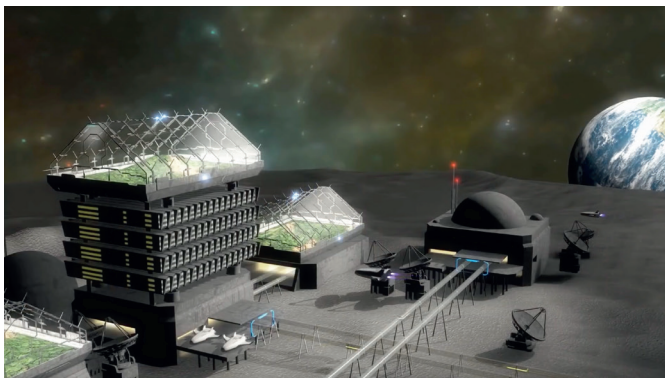


Рис. 20. Плавные колонны поддерживают волнистые формы потолка



Рис. 22. Проекты лунной базы



ли, выполненные в разнообразной цветовой гамме, кроме эстетического восприятия, также снижают уровень шума на 55–85% в диапазоне волн 250–4000 Гц, а материал для панелей можно использовать повторно. Это может найти свое применение в индустрии выставок, шоу и т.д. Интересные индивидуальные решения предлагаются для экранов и перегородок в интерьерах (рис. 18, 19).

3. Такая же идея печати отдельных элементов фасадов, входных групп показана на примере решения здания, предложенного архитектором Kellerhuis (рис. 20). 3D-печать позволила ему уйти от унылых прямоугольных форм и получить уникальный дизайн.

4. В 2024 г. NASA совместно с ESA планируют вернуться на Луну, где будет необходимо стро-

ить жилье для обитателей будущей станции. Требования достаточно жесткие — нужно защитить жителей от радиации, использовать местные материалы для строительства, обеспечить электричеством, водой и продуктами питания. Схема обустройства такого дома показана на рис. 21, а некоторые проектные варианты со сборкой жилых блоков из напечатанных элементов представлены на рис. 22.

5. Оформление фасадов домов. Компания Branch Technology реализовала архитектурную идею оформления городской среды за счет печати отдельных легких навесных элементов фасадов здания на производстве с последующей их установкой на месте. Ниже показаны несколько примеров оформления зданий (рис. 23).

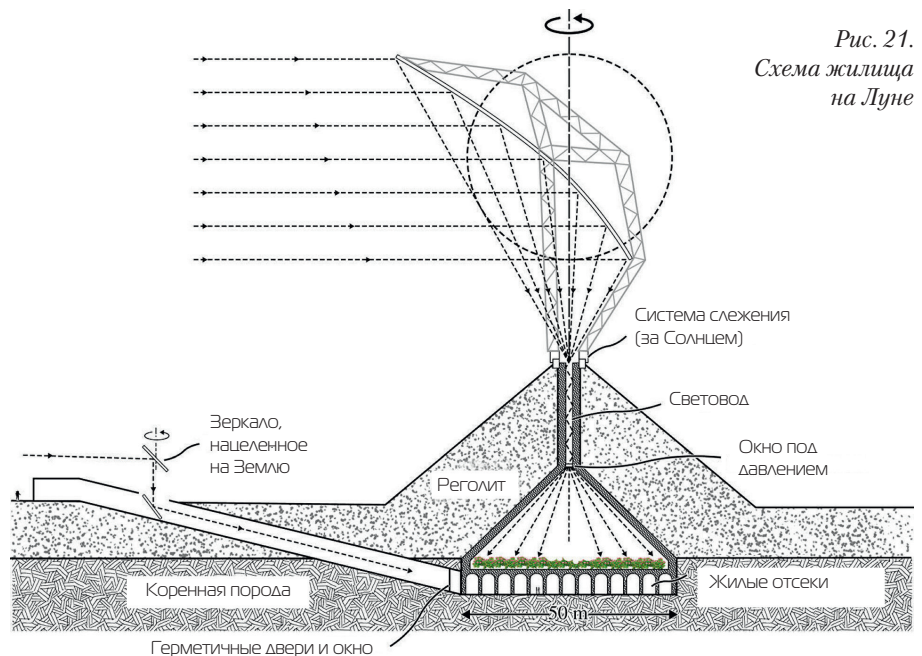
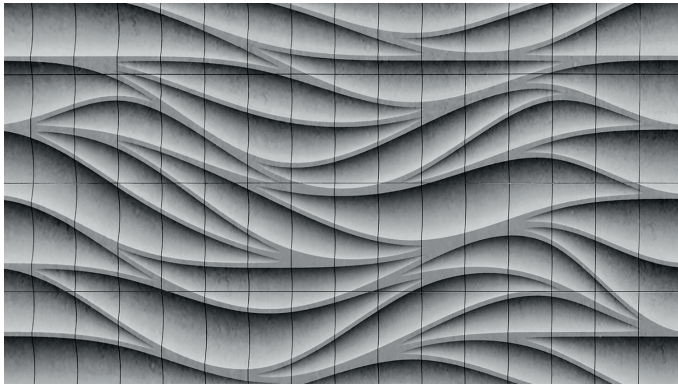


Рис. 21. Схема жилища на Луне

Рис. 23.
Примеры
оформления
фасадов
зданий



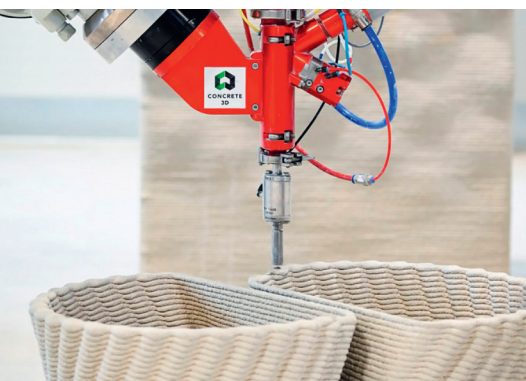
6. Печать малых архитектурных форм. Компания Concrete 3D с помощью своего 6-осного робота выполнила ряд интересных работ (рис. 24) – <https://clck.ru/eY5yS>.

7. Оформление тематического парка с помощью строительной печати компанией АИСТ (www.aicstbuild.com) – рис. 25. Используя 3D-печать, АИСТ может построить дом небольших размеров за несколько недель, а не месяцев. Строители, использующие 3D-печать, завершили создание парка, состоящего из более чем 2000 бетонных элементов, всего за два с половиной месяца, что быстрее

Рис. 25. Печать парковой архитектуры с помощью роботизированных принтеров смесями с использованием строительных отходов



Рис. 24. Примеры печати роботом



и в разы дешевле традиционных методов строительства.

8. Компания Digital Building Technologies с помощью роботизированного принтера строит из бетона элементы колонн для уличного оформления (<https://clck.ru/fbJVs>) – рис. 26.

Новый производственный процесс позволяет производить уникальные конструкции сложной геометрии без какой-либо опалубки полностью автоматизированным способом.

9. Проект D-Shape (<https://d-shap.com>).

Одним из первых у истоков строительной печати стоял инженер из Италии Энрико Дини (Enrico Dini) – рис. 27. Он пришел в строительство, имея за плечами опыт роботизации обувного производства. В 2005 г. он вместе с партнерами получил патент на метод и оборудование для автоматического построения сборных структур



Рис. 27. Enrico Dini

Рис. 28. Напечатанные рифы как пример восстановления прибрежной зоны моря (Reef Arabia, Bahrain)



Рис. 26. Роботизированная система, используемая для создания колонн Concrete Choreography



сначала на основе песка и эпоксидной смолы, поскольку первый патент на похожий автоматический процесс построения на основе цемента и песка был получен в 1997 г. Джозефом Пенья (Joseph Pegna). Главное отличие метода Дини было в свободе построения без использования дорогостоящей опалубки.

Переехав в Великобританию, Энрико Дини создал первую производственную компанию для строительства домов с использованием аддитивных технологий – Monolite UK, Ltd. Воодушевленный присутствием других предпринимателей и уверенный в превосходных возможностях своего подхода, он

продает свои права на технологию печати со связующим (binder jetting) и на вырученные деньги строит первую фабрику в Италии и свой первый широкоформатный 3D-принтер. На нем он напечатал знаменитую скульптуру радиолярии, созданную Андреа Морганте. Чтобы избежать возможного конфликта патентов с конкурентами, он использовал оксид магния в качестве порошка и хлорид магния в качестве связующего. Привлечь финансирование для продолжения проекта ему в тот момент не удалось из-за кризиса 2008 г. Тем не менее первый напечатанный дом, который назывался Una casa tutta

Рис. 29. Проект лунной базы из местного реголита, который будет напечатан принтером D-shape



d'un pezzo — дом из одного куска, был выполнен для музея Triennale в Милане по его технологии. Несмотря на ряд трудностей, многие 3D-печатные строительные проекты для обороны, искусства и других строительных сегментов (коралловые барьеры — рис. 28, общественные скамейки) были успешными как благодаря своему новаторскому подходу, так и с точки зрения экономики. В дальнейшем его идеи были использованы различными компаниями — Winsun в Китае, CyBe и COBOD в Нидерландах, XtreeE во Франции и другими.

Консорциум компаний Monolit UK совместно с архитектурным бюро Foster + Partners (Лондон), аэрокосмической компанией Alta и Scuola Superiore S. Anna (Pisa, Италия) выиграл тендер Европейского космического агентства (ESA) на разработку концепт-проекта лунной базы (рис. 29). Объекты базы предполагается построить с помощью 3D-печати (D-shape) из местного материала — лунного реголита со связующим, которое идеально подходит для прочного соединения таких природных материалов. Для отработки технологии был использован имитатор лунного реголита, найденный Энрико Дини в древнем потухшем

вулкане недалеко от озера Больсена в Италии.

10. Важное и интересное приложение строительной печати из бетона или геополимера — это оформление общественных пространств: парков, природных заказников, музейных открытых территорий, а также загородных дач, домов, детских площадок, спортивных и рекреационных зон, санаториев и других публичных мест (рис. 30). Напечатать изделия из бетона можно цеховым принтером очень быстро (лавочка печатается за 45 минут), практически любой геометрии, очень дешево (сопоставимо со стоимостью материала для напечатанного изделия), изделия антивандальные, поскольку их непросто унести (вес от 120 кг) и сложно сломать.

Заключение

По мнению многих специалистов наибольшее применение строительной печати ожидается в индивидуальном жилищном строительстве, причем как доступного жилья (дома в 1–2 этажа), так и в дорогом сегменте жилья по заказу. Для архитекторов и застройщиков открываются новые возможности разрабатывать и строить

Рис. 30. Оформление общественных пространств



новое поколение умных домов по желанию их будущих владельцев, при этом стоимость такого строительства будет значительно ниже традиционного. Чуть позже, по-видимому, произойдет широкое внедрение технологии строительной печати в высотное строительство. Уже сейчас есть технические решения такой печати. С учетом перспектив городского многоэтажного строительства и выгоды использования строительной печати (сокращение времени постройки, уменьшение привлекаемой рабочей силы, снижение себестоимости строительства и др.) этот сектор экономики становится чрезвычайно привлекательным. ■

Литература

1. Максимов Н. М. Аддитивные технологии в строительстве: оборудование и материалы // Аддитивные технологии. 2017. № 4. С. 54–62. <https://clck.ru/eY5yp>
2. Максимов Н. М. Аддитивные технологии в строительстве: примеры и перспективы применения // Аддитивные технологии. 2018. № 1. С. 36–42. <https://clck.ru/eY5z6>
3. National Low Income Housing Coalition Report: «The Gap: A Shortage of Affordable Homes March 2021» — NCSHA. <https://clck.ru/fbJNr>
4. Global Status Report 2018 | UNEP — UN Environment Programme. <https://clck.ru/eY5zM>
5. Delbeke, J. & Vis, P. Towards a Climate-Neutral Europe: Curbing the Trend 1–223 (2019) doi:10.4324/9789276082569.
6. Human Errors in Construction Can Turn Into Deadly Mistakes. <https://reports.nlihc.org/gap/about>
7. Imagining construction's digital future | McKinsey. <https://clck.ru/eY622>
8. <https://clck.ru/eY5wX>
9. <https://clck.ru/eY5uR>
10. <https://clck.ru/eY5vw>
11. Additive Manufacturing of Sustainable Construction Materials and Form-finding Structures: A Review on Recent Progresses Junli Liu, and others. <https://clck.ru/eY5xS>
12. Habert G., Miller SA, John VM, et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nat. Rev. Earth Environ 2020; 1:559–573.
13. Martens P., Mathot M., Bos F., et al. Optimising 3D printed concrete structures using topology optimisation. In: High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet. Cham: Springer, 2017. Pp. 301–309.
14. Panda B., Singh GVPB, Unluer C. et al. Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion-based 3D concrete printing. J Clean Prod 2019; 220:610–619.
15. Alghamdi H., Nair SAO, Neithalath N. Insights into material design, extrusion rheology, and properties of 3D-printable alkali-activated fly ash-based binders. Mater Des 2019; 167:107634.
16. Elahi MMA, Hossain MM, Karim MR, et al. A review on alkali-activated binders: Materials composition and fresh properties of concrete. Constr Build Mater 2020; 260:119788.
17. <https://geopolymerinternational.com/products/>

21-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ



weldex

0+

11-14
ОКТАБРЯ

2022

РОССИЯ, МОСКВА
КРОКУС ЭКСПО

Разделы выставки:

- Оборудование и материалы для сварки
- Оборудование для резки металла
- Промышленные роботы
- Нанесение защитных и упрочняющих покрытий
- Оборудование для контроля качества сварных соединений
- Инструменты и приспособления для сварочных работ
- Средства индивидуальной и коллективной защиты
- Оборудование для обработки кромок



weldex.ru

Официальная поддержка:



Свяжитесь с Организатором, чтобы узнать об условиях участия: weldex@hyve.group | +7 (499) 750-08-28

Формирование персонифицированных цифровых моделей для аддитивного производства в медицине

Михаил Михайлович Новиков, novikov@rambler.ru, тел.: (49645) 22200 доб. 459.

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

Введение

Внедрение в практику здравоохранения информационных технологий значительно изменяет способы диагностики и лечения, формы взаимодействия врачей с пациентами и коллегами, организацию лечения и восстановления здоровья. Современная цифровая медицина, позволяющая повышать доступность, качество и эффективность медицинской помощи, — один из приоритетных проектов стратегического развития российского здравоохранения, разработанных Минздравом РФ.

Развитие современного трехмерного моделирования и внедрение нового поколения спиральных компьютерных томографов значительно расширило возможности использования этих информационных технологий в реконструктивной хирургии [1–4]. Специализированное программное обеспечение позволяет оперативно производить обработку томографических данных пациента и создавать цифровые трехмерные модели любого дефекта или зоны патологии. Цифровые модели все активнее используются при подготовке и планировании оперативного вмешательства в челюстно-лицевой хирургии, хирургии шеи и позво-

ночника, торакальной хирургии, ортопедии и нейрохирургии. Их можно напрямую использовать для создания копий патологий и дефектов конкретного пациента с помощью аддитивных технологий [1]. Персонифицированные пластиковые копии анатомических структур позволяют проводить эффективное предварительное планирование сложных операций. На основе цифровых моделей дефектов или зон патологий конкретных заболеваний человека можно создавать единые базы данных для интеллектуальных систем поддержки принятия врачебных решений.

Сегментация томографических данных

Основное назначение томографического исследования — это медицинская диагностика, уточнение диагноза или отслеживание результатов лечения. Оно позволяет выявить наличие патологии и получить о ней дополнительную информацию. В большинстве случаев это делается путем последовательного визуального анализа изображения срезов, сформированных компьютерным томографом. В настоящее время с помощью специализированных программ уже доступно формирование трехмер-

ной реконструкции томографических данных, которая позволяет значительно улучшить выявление патологий и проводить предварительное планирование сложных хирургических операций. Однако создание трехмерной реконструкции требует решения целого ряда задач, поскольку интересующие структуры и окружающие их ткани имеют сходную плотность и плохо различаются на томографических изображениях. В подобных случаях возникает необходимость в такой операции, как сегментация — программное выделение интересующих структур в требуемых границах с последующей их визуализацией, анализом и экспортом в виде файла цифровой модели.

Цифровая модель открывает дополнительные возможности:

- предоперационное моделирование высокоточных шаблонов и имплантатов на основе томографических данных конкретного пациента,
- изготовление с помощью аддитивных технологий копий дефектов и патологий для дальнейшего анализа и планирования операции,
- 3D-печать биологических тканей и матриксов для непосредственного восстановления дефекта.

Описание основных алгоритмов сегментации сделано на основе анализа работы программы «Инобитек DICOM Просмотрщик» [5].

Основная задача сегментации заданной области и выделения требуемой структуры — это удаление всех остальных объектов на трехмерной реконструкции, полученной по томографическим данным [6]. В первую очередь устанавливаются пороговые значения плотности выделяемых тканей. В этом случае используются два алгоритма: цветовая таблица и маска видимости.

В томографическом изображении градация серого цвета соответствует конкретному значению плотности биологической структуры. Для цветовой сегментации реконструкции определенному диапазону плотности можно назначить конкретное значение цвета и видимости. Для этого формируется цветовая таблица, которая задает конкретной плотности значение цветового диапазона. В зависимости от выбранной цветовой таблицы плотности одного диапазона, соответствующие одному типу тканей, могут быть скрыты, а плотности других диапазонов, наоборот, сделаны видимыми и окрашены в выбранный цвет. Таким образом, разные цветовые таблицы позволяют проводить сегментацию и визуализировать разные органы и ткани (рис. 1).

Другим параметром, определяющим текущую сегментацию, является маска видимости. В этой маске каждому пикселю соответствует один бит, который, соответственно, может иметь значение: 0 — пиксель не отображается, 1 — пиксель отображается при визуализации. Следовательно, сегментация изображений определяется тремя основными параметрами: цветовой таблицей, окном плотности и маской видимости.

Основные инструменты сегментирования

1. Вырезание сегментированной структуры с помощью полигона. Инструмент применяется к трехмерной реконструкции. Возможны два варианта: удалить всё попавшее в выделенную область или, наоборот, удалить всё вокруг выделенной области.

2. Стирание или прорисовка требуемых структур изображения инструментом задаваемого размера в виде шара или цилиндра. Преимуществом этого инструмента является его локальность: всегда можно подобрать такой размер инструмента, чтобы удалить только то, что требуется. Кроме того, этот инструмент можно применять на двумерных срезах реконструкции, что позволяет выполнять посрезовую ручную сегментацию нужной структуры.

3. Выделение связанных областей. Для этого задается понятие

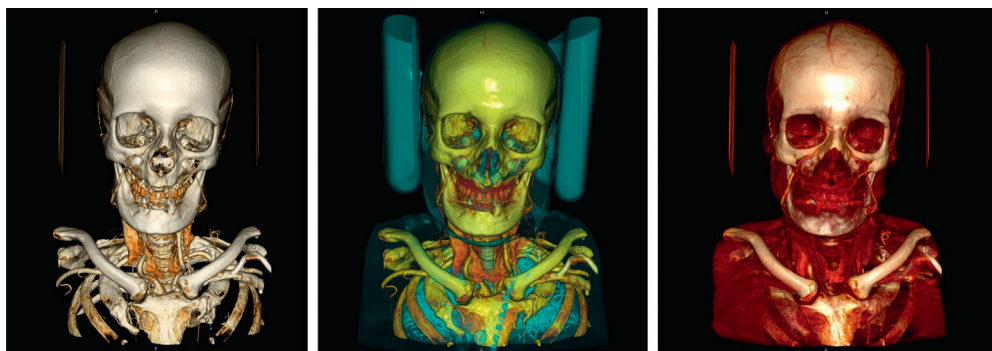
минимальной толщины структуры, делающей объект связным, т.е. если две части объекта связаны некоторой структурой, толщина которой меньше указанного значения, то эти две части не будут считаться связными.

4. Морфологические операции — наращивание или сокращение объема реконструкции, позволяющие нарастить или сократить текущую сегментацию на заданное количество вокселей. Для удобства пользователя величина наращивания/сокращения задается в миллиметрах.

5. Сегментированные структуры позволяют проводить между ними бинарные операции: вычитание, пересечение, объединение. В любой из этих операций участвуют две сегментированные структуры. При вычитании из маски видимости целевой структуры вычитаются все воксели маски сегментации дополнительной структуры, в результате все видимые воксели дополнительной структуры становятся невидимыми в целевой структуре. При пересечении в маске видимости целевой структуры остаются только воксели, присутствующие одновременно в маске сегментации целевой и дополнительной структуры. При объединении в маску видимости целевой структуры добавляются все воксели маски сегментации дополнительной структуры.

Сегментированная структура — это сохраненный результат сегментации, который можно редактировать и визуализировать независимо от других частей реконструкции. На основе любой сегментированной структуры можно построить ее цифровую модель — аппроксимацию поверхности сегментированной структуры полигональными элементами (треугольниками). Это один из самых важных результатов сегментации, так как экспорт результатов сегментации в виде полигональной модели позволяет работать с ними в большинстве

Рис. 1. Пример сегментации с использованием цветовой таблицы, программа «Инобитек DICOM Просмотрщик» [5]



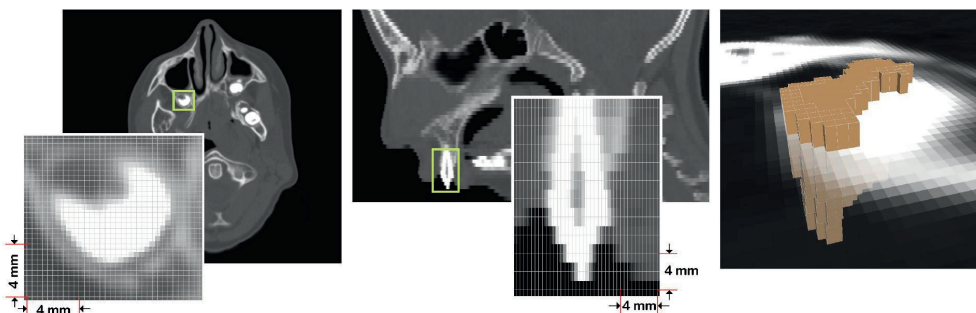
программ трехмерного моделирования и 3D-печати. Для построения сеток используется алгоритм «марширующих кубов», являющийся одновременно простым и наиболее эффективным для данной задачи (рис. 2).

Трехмерная модель, построенная на основе томографических изображений, состоит из кубических вокселей, и поэтому полигональная сетка, полученная при аппроксимации ее поверхности, выглядит ступенчатой. Сглаживание поверхности производится методом Лапласа, при котором координаты каждой вершины сетки заменяются усредненной координатой всех соседних вершин. Результат этой процедуры представлен на рис. 3.

Сегментация с использованием нескольких исследований

Интересным способом выделения нужных объектов, разработанным в программе «Инобитек DICOM Просмотрщик», является

Рис. 2. Данные томографического изображения: от пикселей до вокселей



использование данных, полученных в разных томографических исследованиях. Классическим примером такой задачи является отделение кровеносной системы с введенным контрастом от костных структур, так как рентгеновская плотность контрастного агента в КТ сравнима с рентгеновской плотностью костных структур. В этом случае задача сводится к сегментации костных структур в серии без контраста и дальнейшем вычитании полученной сегментации из серии с контрастом (рис. 4).

Основной проблемой в этом случае является пространственное

совмещение данных из разных исследований. Это метод может иметь большое значение для будущего развития сегментации при комбинации разных способов исследования: КТ, МРТ и ПЭТ-томографии.

Совмещение различных типов обследования в 3D-реконструкции

Новая технология ядерной медицины ПЭТ получает картину биохимической активности, детектируя в теле человека радиоактивные изотопы, и предназначена в основном для обнаружения раковых опухолей. Но, основываясь на ПЭТ, трудно понять, в какой части тела находится область с максимальной концентрацией радиоактивного вещества. КТ-исследование помогает получить анатомическую структуру человеческого тела. При соединении геометрии тела КТ (рис. 5а) и областей, насыщенных кровью с высокой концентрацией радиоактивного вещества ПЭТ (рис 5б),

Рис. 3. Сглаживание поверхности воксельной модели методом Лапласа

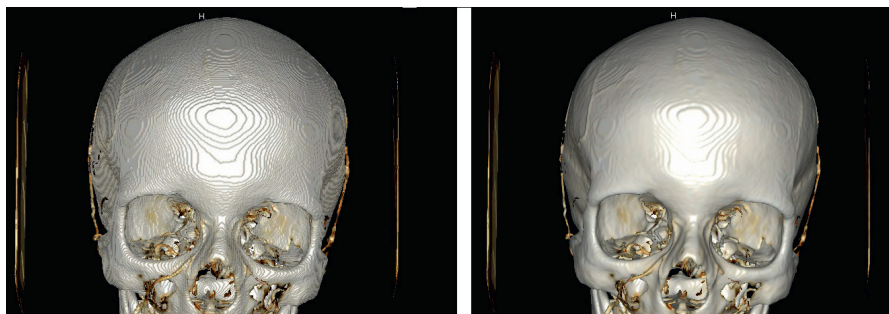


Рис. 4. Серия с контрастом, серия без контраста, вычитание



получаем объединенную трехмерную реконструкцию (рис. 3в).

Программы обработки и конвертация изображений формата DICOM в трехмерную модель формата STL

Для оценки возможностей таких программ были рассмотрены несколько коммерческих и свободно распространяемых продуктов (таблица 1).

Обработка томографических данных двух видов для оценки быстрой работы проводилась на компьютере со следующей конфигурацией: процессор AMD Ryzen 7 PRO 3700 8-Core Processor: тактовая частота 3.60 GHz, оперативная память DDR4 32 Гбайта, видеоплата Radeon RX 570 Series 4 Гбайта.

Краткое сравнительное описание возможностей программного обеспечения

Mimics Medical. Отличные функциональные возможности, хорошо проработанный интерфейс, широкие возможности по сегментации изображений, высокая стоимость лицензии.

«DICOM Просмотрщик». Хорошие функциональные возможности, хорошо проработанный интерфейс, широкие возможности по сегментации изображений, удобная работа с воксельной моделью, вы-

Рис. 5. Совмещение различных типов обследования в 3D-реконструкции [7]

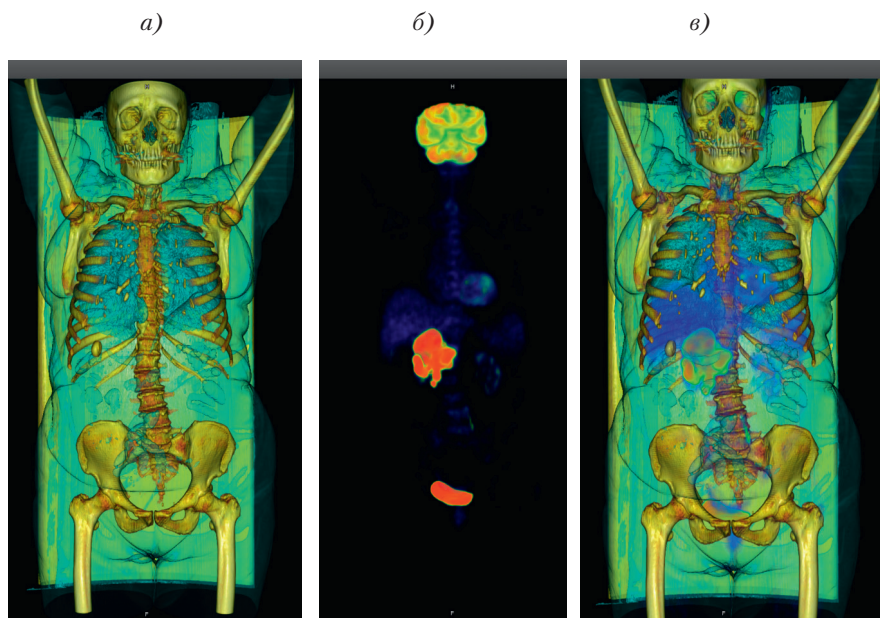


Таблица 1. Программы обработки и конвертация изображений формата DICOM в трехмерную модель формата STL

Программа	Сайт	Лицензия	Общая оценка
Mimics Medical	https://www.materialise.com/en/medical Materialise, Бельгия	коммерческая	9
«DICOM Просмотрщик»	https://inobitec.com/ «Инобитек», Россия	коммерческая	10
3DSlicer	https://www.slicer.org/ группа специалистов, США	free and open source	7
InVesalius	https://www.cti.gov.br/en/invesalius Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, Бразилия	free and open source	5
Drishti	https://github.com/nci/drishti National Computational Infrastructure's VizLab, Австралия	free and open source	3

Таблица 2. Сравнение времени обработки и конвертации томографических данных

Программа	КТ головы 541 срез, объем 0.3 Гбайт				КТ тела 5502 срезов, объем 2.9 Гбайт			
	Время загрузки КТ-данных, с		Время построения 3D-модели, с		Время загрузки КТ-данных, с		Время построения 3D-модели, с	
	load	process	voxel	stl, Гбайт	load	process	voxel	stl, Гбайт
Mimics Medical	2	2	39	74 0.35	35	48	298	490 1.85
«DICOM Просмотрщик»	1	1	3	2 0.2	8	6	6	4
3DSlicer	39	24	24	6 0.35	492	221	135	25 1.85
InVesalius	14	7	88	10 0.2	486	113	196	27
Drishti	54		187		-		-	

сокое быстродействие, доступная стоимость лицензии.

3DSlicer. Достаточные функциональные возможности, модульный интерфейс, достаточные возможности по сегментации изображений, много готовых конфигураций для специализированных задач, бесплатная лицензия.

InVesalius. Хорошие возможности для начального уровня, модульный интерфейс, недостаточные возможности по сегментации изображений, бесплатная лицензия.

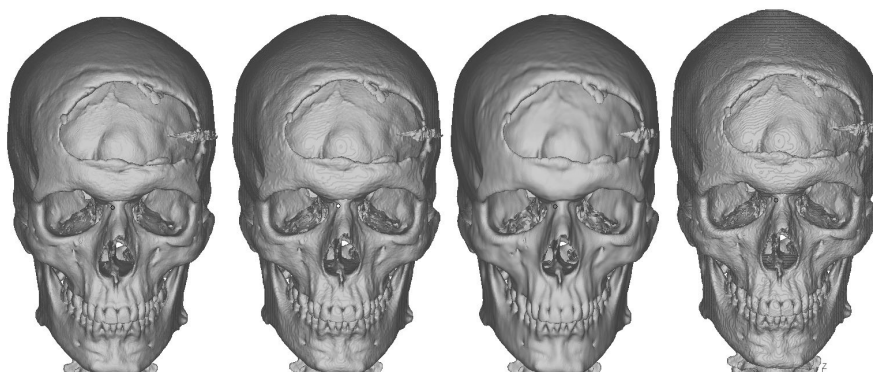
DrishTi. Отдельные программы чтения и обработки, проблемы с чтением данных формата DICOM, модульный интерфейс, недостаточные возможности по сегментации изображений, бесплатная лицензия.

На рис. 6 представлены картинки моделей в формате STL.

Вопросы сертификации

Специальных стандартов и сертификации цифровых моделей в медицине в РФ на сегодня не разработано. Для применения цифровых моделей можно использовать пункт 5 статьи 38 «Медицинские изделия», федеральный закон от 21 ноября 2011 г. N 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации»: «Медицинские изделия, которые изготовлены по индивидуальным заказам пациентов, к которым предъявляются специальные требования по назначению медицинских работников и которые предназначены исключительно для личного использования конкретным пациентом, а также медицинские изделия, предназначенные для использования на территории международного медицинского кластера или на территориях инновационных научно-технологических центров, государственной регистрации не подлежат. На указанные медицинские изделия не распространяются положения части 3 настоящей статьи, предусматривающие разработку производителем (изготовите-

Рис. 6. Примеры моделей, построенных по томографическим данным, слева направо результат программы: Minics, «DICOM Просмотрщик», 3DSlicer, InVesalius



лем) медицинского изделия технической и (или) эксплуатационной документации». Дополнительно это подтверждается постановлением правительства РФ от 27.12.2012 № 1416 «об утверждении правил государственной регистрации медицинских изделий» и письмом Федеральной службы по надзору в сфере здравоохранения от 21.07.2015 г. № 04–21338/15.

Таким образом, цифровые модели и индивидуальные медицинские изделия, изготовленные с использованием 3D-печати по антропометрическим показателям конкретных пациентов, не подлежат государственной регистрации. Исходя из буквального толкования вышеуказанных норм закона, следует, что государственной регистрации подлежит материал, из которого изготавливаются индивидуальные медицинские изделия. При этом пока не разработано четких регламентирующих законов, касающихся качества цифровых моделей, стандартизации материалов и процессов в области производства с использованием технологий 3D-печати, для обеспечения безопасности объектов, печатаемых на 3D-принтере при их использовании в медицинских целях.

Американское Федеральное управление по надзору за качеством пищевых и лекарственных препаратов (FDA) в 2017 году выпустило рекомендации по созданию медицинских моделей

с помощью 3D-принтеров. Рекомендации включают разделы по дизайну и процессу производства, испытанию моделей и составлению инструкций. При создании моделей на основе изображений, полученных при КТ-сканировании, должны учитываться минимальное качество изображения и его разрешение, алгоритмы обработки изображений, которые могут изменять размеры модели по сравнению с реальными органами, а также сохранность и определимость анатомических ориентиров, используемых для адаптации модели. В разделе по испытанию моделей приводятся требования к их описанию, результатам механических испытаний, измерению размеров, характеристикам материала, стерилизации и биосовместимости. Каждое устройство должно иметь инструкцию, где будут указаны идентификатор пациента, назначение модели и его окончательный дизайн, а также предупреждение о необходимости предварительного обследования пациента для исключения любых изменений, которые могут отличать модель от реальной анатомической структуры.

Правовое регулирование использования медицинских изделий, созданных с использованием аддитивных технологий в Евросоюзе. Контроль оборота и применения того или иного изделия медицинского назначения в европейских странах регламентируется различными

директивами совета ЕС: 90/385/ЕЕС об активных имплантируемых медицинских устройствах, 93/42/ЕЕС о медицинских приборах, 98/79/ЕЕС о диагностических медицинских приборах in vitro. Медицинские изделия, в частности custom-made имплантаты, созданные с использованием аддитивных технологий, относятся к классу 3 безопасности и не нуждаются в прямой сертификации. В последнее время европейские регуляторные органы в сотрудничестве с американским международным обществом по испытанию материалов (American Society for Testing and Materials) также пытаются усовершенствовать процесс стандартизации 3D-печати в рамках ISO

и перерабатывают европейские стандарты по контролю использования custom-made изделий.

Заключение

Описанные в данной статье инструменты и подходы являются универсальными и могут быть использованы для сегментации любых анатомических структур. При потоковой диагностике может стоять задача сегментации одних и тех же органов на основе данных одного типа исследования много раз подряд. В этом случае использование универсальных инструментов может быть не самым быстрым и удобным способом сегментации, и в таких задачах эффективнее ис-

пользовать специализированные инструменты. Специализированный инструмент сегментации может быть реализацией шаблона применения универсальных подходов, либо же это специально разработанные для конкретного случая алгоритмы и методы. Следующей задачей данной работы является разработка специализированных инструментов и улучшения их функционала. Проведенный сравнительный анализ позволяет из протестированных программ обработки и конвертации изображений формата DICOM в трехмерную модель формата STL рекомендовать к использованию «DICOM Просмотрщик Инобитек» и 3DSlicer. ■

Литература

1. Ипполитов Е.В., Новиков М.М., Чербыло С.А., Евсеев А.В. Применение лазерной стереолитографии в медицине // Коллективная монография: Современные лазерно-информационные технологии. Под ред. В. Я. Панченко и Ф. В. Лебедева. М.: Интерконтракт Наука, 2015. С. 358–373. ISBN 978–5–902063–52–0.
2. Максимов Н.М. Аддитивные технологии в хирургии и ортопедии // Аддитивные технологии. 2019. № 3. С. 30–39.
3. Мирзоев М.Ш., Шакиров М. Н., Хушвахтов Д. И., Джонибекова Р. Н., Григорьев Е. Г. Устранение дефектов нижней челюсти эндопротезами, созданными по технологии аддитивного стереолитографического моделирования // Вестник Авиценны. 2018. 20 (2–3):170–175. https://vestnik-avicenna.tj/upload/global/4_170-175.pdf
4. Максимов Н.М. Применение АМ в биотехнологии. Аддитивные технологии. 2020. № 2. № 3. № 4.
5. <https://habr.com/ru/company/inobitex/blog/358136/>
6. Мусатян С.А., Ломакин А. В., Саргасов С. Ю., Попыванов Л. К., Монахов И. Б., Чижова А. С. Способы сегментации медицинских изображений. Труды ИСП РАН. Том 30. Вып. 4. 2018. С. 183–194.



ТЕРМООБРАБОТКА

Пятнадцатая международная специализированная выставка
Единственная в России выставка
термического оборудования и технологий

13 - 15 сентября 2022
Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр», павильон 7



Основные разделы:

- Термическое и химико-термическое оборудование
- Промышленные печи, сушильные шкафы
- Индукционное оборудование
- Жаропрочная оснастка
- Вакуумная техника и компоненты вакуумных систем
- Огнеупоры, теплоизоляция и футеровка тепловых агрегатов
- Изделия из графита, углеродного волокна и углерод-углеродных композитов
- Установки нанесения покрытий
- Диагностическое и измерительное оборудование

Независимый
Выставочный
аудит



ufi
Approved
Event




Факты о выставке 2021 года: 50 экспонентов из 11 стран мира - Россия, Беларусь, Германия, Австрия, Италия, Швейцария, Польша, Китай, Словения, Франция, Турция; 3022 кв.м. экспозиции; 2150 посетителей-специалистов



Бронь стендов и
пригласительные билеты на
www.htexporus.ru

Организатор:



**15–21 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО**



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ**

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ
ОПЕРАТОР



МКВ
МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ

WWW.RUSARMYEXPO.RU



**ДИВЕРСИФИКАЦИЯ
ОПК**

2022

15-21 АВГУСТА



ПАТРИОТ ЭКСПО
Московская область
г. Кубинка
диверсификация-опк.рф

23-27 | 05 | 2022

Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



22-я международная
специализированная
выставка

МЕТАЛЛООБРАБОТКА

«Оборудование,
приборы и инструменты
для металлообрабатывающей
промышленности»



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



www.metobr-expo.ru

12+ Реклама

ЭКСПОЦЕНТР

rosmould

featuring **3D-TECH Area**

rosplast

Международная выставка форм, пресс-форм, штампов,
услуг по проектированию изделий и их контрактному производству

Международная выставка оборудования
и материалов для индустрии пластмасс

07 — 09 июня 2022

МВЦ «Крокус Экспо», Москва

www.rosmould.ru



 messe frankfurt

mesago
Messe Frankfurt Group

ПОДПИСНОЙ КУПОН НА ЖУРНАЛЫ



РИТМ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Вы можете оформить подписку на **журнал «РИТМ машиностроения»** с любого месяца. Стоимость одного номера — **350** рублей, стоимость годовой подписки (10 номеров) — **3500** рублей.

Для выставления счета направьте заполненный купон по адресу: ritm@gardesmesh.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 — **350** рублей, стоимость годовой подписки (4 номера) — **1400** рублей.

Для выставления счета направьте заполненный купон по адресу: info@additiv-tech.ru



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