

at

АДДИТИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

1 / 2022

red fab

ПРОРЫВ В АВТОМАТИЗАЦИИ FDM 3D-ПЕЧАТИ

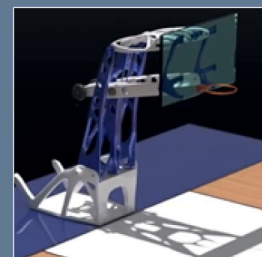
www.redfab.ru



Formnext-2021:
тенденции
развития
отрасли
4



3D-печать
низко-
температурным
пластиком
26



Разновидности
и задачи
геометрической
оптимизации
изделий для
аддитивного
производства
34



In cooperation with



#newlifetoplastic



3-6 мая 2022 • Милан

ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ:
ПЕРЕДОВЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ
УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ
В ПРОИЗВОДСТВЕ
ПЛАСТМАСС И РЕЗИНЫ

1st EDITION



Ministry of Foreign Affairs
and International Cooperation



ITALIAN TRADE AGENCY

УЛЬТРАКОМПАКТНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ СЕРИЯ YLR до 4 кВт



Волоконные лазеры **YLR** идеально подходят для различных технологических применений, включая аддитивное производство, резку, сварку, перфорацию, термообработку и другие.

- Высокая мощность в компактном корпусе – до 4 кВт
- **Превосходные** характеристики лазерного пучка
- **Лучшая в классе** стабильность параметров излучения
- Возможность модуляции излучения с частотой до 50 кГц
- **Широкий выбор** опций доставки излучения



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

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

www.ipgphotonics.com

ПРОСТОТА ЭКСПЛУАТАЦИИ, БЕСПРЕЦЕДЕНТНО ВЫСОКАЯ НАДЕЖНОСТЬ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Подробнее о серии YLR

IPG Photonics представляет обновленную линейку непрерывных волоконных лазеров **YLR** с диодной накачкой в компактном корпусе, с уникальным сочетанием высокой мощности и непревзойденного качества пучка, широким выбором опций доставки излучения и высочайшим КПД от розетки. Благодаря удобному сенсорному дисплею, возможности управления через аналоговый интерфейс, интерфейс RS-232 и Ethernet, а также исполнению в Rack-корпусе лазер идеален для множества применений: от обработки материалов до научных исследований.

Сочетание профессиональной сервисной поддержки и мгновенного реагирования инженеров **IPG Photonics** обеспечивает вам дополнительную экономию, снижая издержки от простоя оборудования. Большинство мировых технологических лидеров в десятках отраслей промышленности от микроэлектроники до тяжелого машиностроения уже сделали выбор именно в пользу волоконных лазеров **IPG Photonics**. Используя лазеры **IPG Photonics** в своих технологических процессах, вы можете быть уверены в беспрецедентном качестве обработки при минимальных прямых затратах на изготовление изделий.

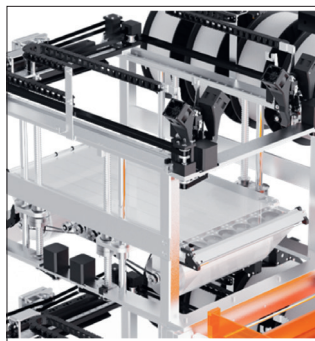


Варианты доставки излучения включают различные технологические головы.





7



8



30

СОДЕРЖАНИЕ

- 4 Formnext-2021: тенденции развития отрасли
- 6 Тенденции развития в 2022 году
- 7 Аддитивное производство BASF
- 8 Автоматизация в FDM. Что нам мешает печатать 24/7?
- 12 Аддитивные технологии. Слова и дела
- 16 Места хватит на всех
- 20 Аддитивные технологии в медицине: важный диалог
- 24 3D-печать неоксидных керамических материалов для космоса
- 26 3D-печать низкотемпературным пластиком
- 30 Изготовление облегченных конструкций для упаковочного производства
- 34 Разновидности и задачи геометрической оптимизации изделий для аддитивного производства

Издатель ООО «ПРОМЕДИА»

директор О. Фалина

главный редактор
М. Копытина

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

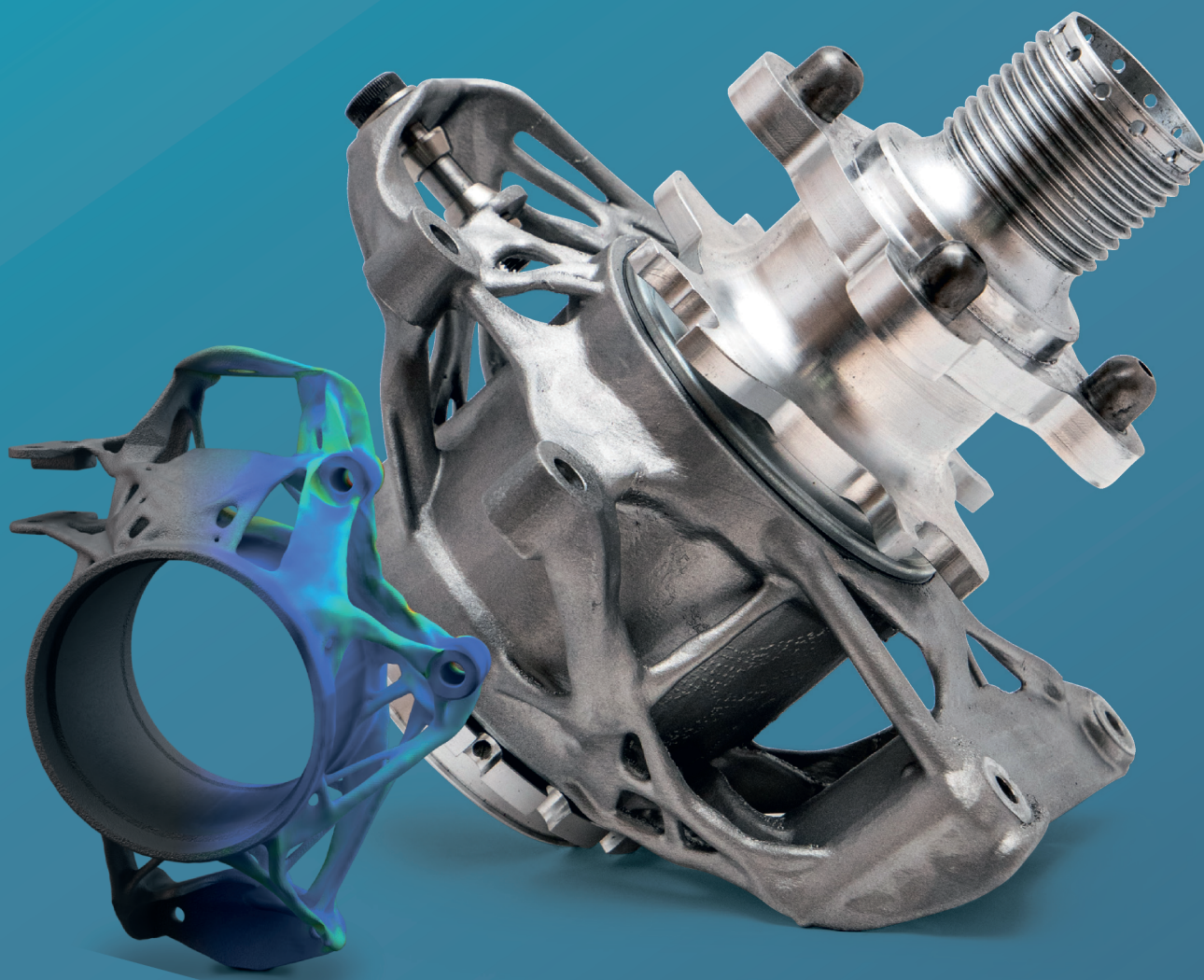
консультант:
Н.М. Максимов
nikamax@gmail.com

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.



**Комплексное решение для аддитивного
производства: от проектирования
и анализа прочности детали
до моделирования процесса 3D-печати**

Formnext–2021: тенденции развития отрасли

Семен Попадюк, блог iQB Technologies, <https://blog.iqb.ru>

Седьмой год подряд международная выставочно-конференция Formnext выступает в роли всемирного форума 3D-индустрии. Прошедшая во Франкфуртена-Майне с 16 по 19 ноября 2021 года, она по традиции ознаменовалась целым рядом мировых премьер, презентаций уникальных разработок и объявлений о стратегическом партнерстве.



© Mesago Messe Frankfurt GmbH / Mathias Kutt

Краткая статистика прошедшего мероприятия: 606 участников из 36 стран; 17859 посетителей — специалистов и руководителей из 76 стран; общая выставочная площадь — 30 тысяч квадратных метров. Все, кто не смог посетить Formnext из-за ограничений на поездки или других обстоятельств, смогли дистанционно ознакомиться с представленными решениями в ходе мероприятий Digital Days, которые помогли охватить еще большую аудиторию.

Вся элита отрасли — 3D Systems, Additive Industries, Carbon, Creaform, Desktop Metal, DMG Mori, Dyemansion, GE Additive, HP, Markforged, Materialise, Nexa3D, Siemens, Sisma, Stratasis, Voxeljet и многие другие компании продемонстрировали свои инновационные технологии и передовые решения для промышленного производства будущего. Здесь же присутствовали такие мировые авторитеты, как BASF, Covestro, Höganas, Sandvik, а также большое количество инновационных стартапов и небольших компаний. Свою продукцию показали и российские производители, среди которых «РусАТ» — отраслевой интегратор госкорпорации «Росатом» в сфере аддитивных технологий,

ООО «Гранком», ООО «НИКАТОР», ООО «Русал Металком», TOTAL Z, Harz Labs и др. Были представлены решения по всем категориям — от производственных технологий до материалов, от 3D-сканеров и программного обеспечения до систем постобработки.

Как тенденцию, отраженную выставкой, можно отметить, что большая часть инноваций в сегменте SLS-печати сейчас исходит от молодых игроков рынка, в то время как лидеры отрасли сосредоточены в первую очередь на консолидации своего бизнеса. Все больше производителей соглашаются с концепцией, что повышение производительности машин может быть достигнуто за счет оптимизации рабочего процесса.

Достаточно быстро растет сегмент высокопроизводительной 3D-печати фотополимерами. Например, если взять обувную промышленность, сегодня по этой технологии производятся миллионы подложек для подошв кроссовок Adidas и тысячи других спортивных товаров. Также можно отметить появление новых решений для фотополимерной печати изделий больших габаритов.

На рынке промышленной FDM-печати наблюдается усиление конкуренции, при этом производители стремятся достичь максимальных результатов, используя уникальные преимущества технологии — универсальность и возможность эффективно использовать передовые термопласты (от ULTEM до PEKK и PEEK) как замену металлам.



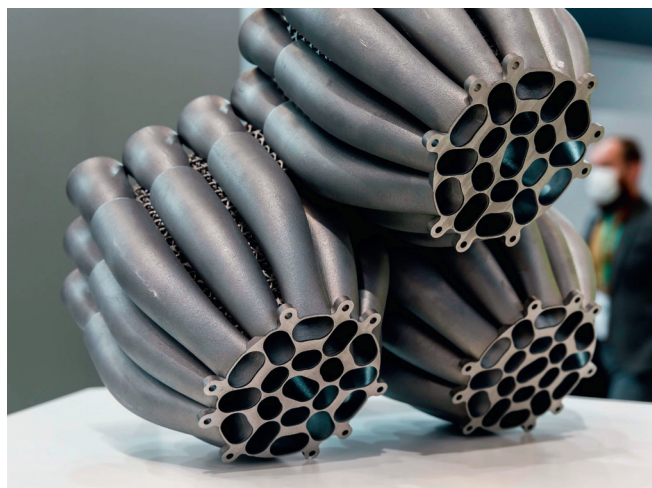
Полноразмерный прототип автомобиля от компании Massivit © 3dprintingmedia.network

Еще одна область, где в последние годы происходит активное внедрение, — крупноформатное аддитивное производство (LFAM), в том числе с использованием ЧПУ или роботизированных систем. В качестве расходных материалов для крупногабаритных FDM-принтеров в основном используются армированные полимерные композиты.

Нельзя не упомянуть раздел 3D-печати технической керамикой. Этот сегмент остается нишевым, поскольку предлагает решения для наиболее сложных задач, где никакие другие материалы просто не подходят.

Производители металлических 3D-принтеров значительно больше пострадали во время пандемии, чем компании, специализирующиеся на полимерной печати. Показательно, что до 2019 года огромная часть инвестиций в 3D-печать металлами привлекалась в одном секторе — авиационной промышленности. Серьезный удар по авиаперевозкам значительно сократил эти вложения. Отрасли, которые могли бы перехватить пальму первенства (космическая и оборонная промышленность, энергетика, судостроение и автомобилестроение), либо недостаточно велики, либо по ряду причин еще не готовы к столь радикальному шагу. Тем не менее, аддитивное производство с использованием металлов по-прежнему обладает большими перспективами.

И хотя лидеры рынка были представлены на Formnext–2021 скромнее, чем в предыдущие годы (а SLM Solutions и вовсе отсутствовала), многие молодые компании и стартапы наращивают свои инвестиции, расширяют охват и вносят вклад в развитие технологий 3D-печати металлами. В целом рынок металлического аддитивного производства расширяется с точки зрения количества операторов и производительности 3D-прин-



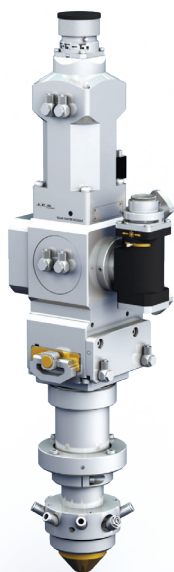
© Mesago Messe Frankfurt GmbH / Marc Jacquemin

теров. По мере роста потребления расходных материалов выпускающие их компании теперь наконец-то могут пожинать плоды своих инвестиций. Об этом говорит и тот факт, что в выставке приняло участие достаточно много производителей металлических порошков.

Главный вывод, который можно сделать по результатам выставки, — индустрия 3D не просто выстояла под ударами пандемии, но и наглядно показала свои преимущества в условиях нарушения цепочек поставок по всему миру.

Следующая выставка Formnext пройдет во Франкфурте-на-Майне с 15 по 18 ноября 2022 года. ■

Использованы материалы Mesago Messe Frankfurt GmbH, 3dprintingmedia.network



Невероятная производительность

Оптические головки IPG Clad в герметичном корпусе с интегрированным коаксиальным соплом Fraunhofer разработаны компанией IPG Photonics для реализации различных режимов порошковой наплавки при помощи волоконных лазеров. Они обеспечивают легкую интеграцию с лазерами IPG мощностью до 8 кВт, имеют множество различных конфигураций с широким выбором фокусных расстояний, опций, таких как формирователи пучка, системы контроля и т.д. Например, с помощью модуля

формирования пучка BeamShaper возможно получить круглое или квадратное сечение с равномерным распределением мощности. Головки совместимы с системой мониторинга процессов LDD компании IPG.

IPG Clad является идеальным решением для наплавки множества различных типов материалов, используемых для аддитивных и восстановительных производств. Ширина полосы наплавки — 2–8 мм, скорость подачи порошка 50–60 г/мин, угол наклона — до 15°.

www.ipgphotonics.com

Тенденции развития в 2022 году

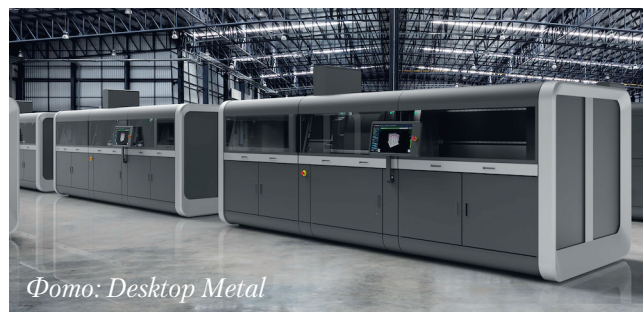
Редакция интернет-ресурса 3D Printing Media Network провела опрос экспертов, предложив оценить ожидания и прогнозы роста аддитивного производства (АМ) в 2022 году. В опросе приняли участие специалисты компаний: Azul 3D, CECIMO, Desktop Metal, Formlabs, Jabil, Materialise, McKinsey & Company, Nexa3D и Shapeways. В результате из множества тем были выделены несколько главных.

Каналы поставок. Очевидно, что основной темой последних нескольких лет были цепочки поставок и логистика. Не только пандемия COVID-19 усугубила недостатки в существующих глобальных цепочках поставок, но и другие факторы, такие как изменение климата и блокировка Суэцкого канала в 2021 году, которые действительно убедили в необходимости переосмысления и укрепления глобальных сетей. Неудивительно, что АМ с возможностью распределенного локализованного производства было выдвинуто на передний план обсуждения. Ожидается, что в 2022 году эта тенденция не только сохранится, но и приобретет все большее значение.

Межотраслевое сотрудничество. Еще один прогноз для индустрии АМ в 2022 году основан на теме сотрудничества. Стало ясно, что не только внутриотраслевые партнерства будут ключом к развитию АМ, но и межотраслевое сотрудничество. Тесное взаимодействие между ключевыми партнерами по всей цепочке создания стоимости будет иметь решающее значение для продвижения аддитивных технологий. CECIMO, например, видит потенциал роста для АМ в его интеграции в такие области производства, как станкостроение и робототехника, что, в частности, поможет адаптировать конструкции для роботизированных приложений в соответствии с запросами клиентов.

Автоматизация и умные технологии. Нет никаких сомнений в том, что автоматизация и интеллектуальные технологии будут играть важную роль для дальнейшего развития АМ, обеспечивая большую согласованность, масштабируемость и эффективность. Адаптивные технологии машинного обучения и машинного зрения обеспечат большую стабильность производства продукции. Повышенный спрос испытывается на автоматизированную постобработку.

Области развития. По единому мнению экспертов, внедрение АМ в 2022 году будет продолжать расти, а лидирующими отраслями будут медицинская и стоматологическая. Лидерство обусловлено двумя основными факторами: увеличением спроса на нестандартные



протезы, ортопедические и зубные имплантаты и ролью АМ в компенсации нехватки медицинских устройств в первый пик COVID-19 в 2020 году. 3D-печать ставит здравоохранение на порог революции, раздвигая границы и создавая приложения, которые могут минимизировать запасы, свести к минимуму проблемы с цепочками поставок, улучшить уход за пациентами и сократить время, проводимое в больницах, обеспечить экономию средств. Отрасль здравоохранения продолжает бороться с такими проблемами, как нехватка рабочей силы, продолжающаяся пандемия и спрос на более персонализированный уход, и 3D-печать — это та технология, которая способна улучшить и оптимизировать ключевые медицинские процессы.

Устойчивость развития. В 2022 году индустрия АМ будет находиться под сильным влиянием стратегий устойчивого развития. АМ и само по себе стремится к достижению большей экологической эффективности и в качестве производственной технологии будет предлагать такие преимущества, как производство по требованию, меньшее потребление материалов и облегчение деталей. Таким образом, АМ может сыграть важную роль в переходе многих компаний к «зеленым» технологиям, предлагая преимущества на двух уровнях: производственный процесс и влияние на продукт. На уровне процесса эти преимущества ведут к сокращению использования природных ресурсов и энергопотребления. В то время как на уровне продукта достигается меньший вес, повышенная ремонтпригодность и улучшенная функциональность. Переход на растительные и многоразовые материалы подхватывает эту тенденцию в большем количестве процессов.

Также экспертами были отмечены: ускоренное развитие технологии Metal binder jetting (струйное нанесение связующего), сохранение тенденции слияний и поглощений компаний, уже отмеченной в 2021 году, ожидание результатов деятельности целого ряда ранее профинансированных стартапов.

Тесс Буассонно

<https://www.3dprintingmedia.network/additive-manufacturing-trends-2022/>

Анна Аношина, руководитель направления BASF по решениям для 3D-печати в России и странах СНГ

Результатом минувшего года стали разработки новых и сопутствующих материалов, которые в 2022 году появятся на российском рынке материалов для 3D-печати. Среди таких новинок:

- Гибкие филаменты **Ultrafuse® TPU 64D**, **Ultrafuse® TPU 95A** и **Ultrafuse® TPS 90A**, разработанные специально для промышленных отраслей, где требуются гибкие материалы. Изделия из материалов этого нового портфолио могут свободно изгибаться, что позволяет осуществлять монтаж в труднодоступных местах, а также использовать их в качестве гибких соединителей. Обладая мягкими, но прочными тактильными свойствами, высокой механической прочностью и превосходной стойкостью к истиранию, новые филаменты идеально подходят для широкого спектра промышленных применений, требующих исключительной гибкости и ударопрочности.

«Гибкие материалы окружают нас в повседневной жизни, в производстве автомобилей и производственных инструментов, а также в бытовой технике и потребительских товарах. При разработке нашего нового портфолио мы использовали многолетний опыт, накопленный BASF в работе с гибкими материалами, такими как **Elastollan®**, для традиционного производства. Сейчас мы передаем этот опыт в аддитивное производство, чтобы поддержать наших клиентов в переходе на новый уровень с применением 3D-печати в промышленности», — рассказывает Анна Аношина, руководитель направления BASF по решениям для 3D-печати в России и странах СНГ.

Каждый материал обладает своими специфическими свойствами:

- **Ultrafuse® TPU 64D** является самым твердым эластомером в этой линейке материалов. Он обеспечи-

вает высокую жесткость при сохранении превосходной гибкости и идеально подходит для промышленного применения, где требуются детали с высокой ударопрочностью.

- **Ultrafuse® TPU 95A** был разработан для обеспечения быстрой и легкой печати прочного, но гибкого изделия на основе полиуретана. Его выдающаяся стойкость к истиранию делает материал подходящим для износостойких применений.

- **Ultrafuse® TPS 90A** выделяется благодаря своим беспрецедентным тактильным качествам: ощущению мягкости при прикосновении, при этом напечатанной поверхности придается нескользящий эффект — уникальный в печати нитями. Благодаря низкому поглощению влаги и прочной адгезии слоев эта нить идеально подходит для печати из двух составных частей и рукояток промышленных приборов.

Тремя годами ранее были запущены в производство первые сверхплавкие гибкие инженерные и армированные филаменты марки **Ultrafuse® — TPU 85A** и **TPC 45D**.

- Активно тестируются термопластичные металлонаполненные филаменты, которые содержат в составе до 90% высокоочищенных металлических частиц. Полученные стальные изделия возможно обрабатывать и использовать с сохранением механической и коррозионной стойкости при температуре до 315 градусов, что делает возможным применение их в аэрокосмической, нефтехимической и других отраслях промышленности. Спрос на печать металлом активно растет, опыт работы по данной технологии накапливается, и 2022 год обещает быть прорывным: релиз оборудования для печати и постобработки, освоение прикладного применения, тестирование напечатанных деталей на промышленном оборудовании.

*Футбольный шлем
Материалы: **Ultrasint® TPU01**,
Ultrasint® TPU 88A, **Ultracur3D® Coating***



*Форма для литья под давлением
Материалы:
Ultracur3D® ST45, **Ultracur3D® RG35***



*Сепаратор стальной
Материал: **Ultrafuse 316L***



- Гибкие цветные покрытия на водной основе с высокой адгезией для гладких поверхностей, дающие толщину слоя 25–40 мкм. Портфолио цветных покрытий состоит из 9 стандартных цветов, также возможна разработка рецептуры для создания корпоративных цветов.

Аддитивное производство активно развивается, технология непростая и одним из значимых открытых вопросов является подготовка кадров. В наработках BASF имеются программы обучения для поддержки молодых специалистов, приходящих в отрасль. ■

Автоматизация в FDM. Что нам мешает печатать 24/7?

Александр Михайленко, генеральный директор Redfab

Производству деталей 24/7 по технологии FDM мешает высокая трудоемкость каждого совершаемого действия, а также необходимость присутствия оператора рядом с принтером.

Если сравнивать наиболее распространенные на российском рынке современные FDM 3D-принтеры с обычными офисными принтерами, то по уровню автоматизации они ближе к ручному печатному прессу, чем к МФУ.

FDM 3D-принтер будет простаивать, если оператор не снял с рабочего стола уже готовую деталь или если у него закончился материал. В случае технической неисправности оператор тратит больше времени на поиск самой неисправности, чем на ее устранение.

Если производство небольшое (до 10 принтеров, до 1000 деталей в месяц), то эти проблемы незаметны. Как правило, таким опытным производством управляет один специалист, который досконально знает вверенные ему принтеры, но даже опытный специалист печати не может работать 24/7 и качественно производить большую номенклатуру изделий, если она часто меняется (например, на фермах услуг 3D-печати).

Если у предприятия появляется необходимость увеличить производительность подразделения 3D-печати, то обычно за этим следует увеличение штата операторов, увеличение количества принтеров, рост технических издержек (брак производства, технические и технологические простои). Когда поджимают сроки, возникает потребность работы сначала в две смены, а потом и в три.

Опыт выполнения серийных заказов в течение последних трех лет на нашей ферме услуг 3D-печати в Санкт-Петербурге позволил нам определить самые затратные операции с точки зрения производительности и трудоемкости:

1. Замена материала — требует присутствия оператора.
2. Подготовка рабочей области, калибровка — в случае ошибки оператора приводит к браку, теряется время на перепечатывание.



3. Контроль материала — при окончании в процессе печати принтер либо простаивает, либо изделие бракуется.

4. Принтер простаивает, пока оператор не снимет изделие с рабочего стола.

5. Принтер простаивает, пока оператор ищет причины неисправности или ждет ответа от техподдержки. Проблема относится к принтерам, производитель которых не предоставляет развернутую техническую документацию. Большой парк принтеров требует выделенного сервисного инженера.

6. Рост количества заказов на производство требует появления техника для решения рутинных вспомогательных задач (например, замена и контроль наличия материала), в противном случае растет нагрузка на операторов, учащается брак, простаивает оборудование.

7. Передача дел между сменами операторов часто приводит к перепроизводству деталей или потере информации по заказам. Для борьбы с этим требуются вложения в учетные системы или найм дополнительного административного персонала.

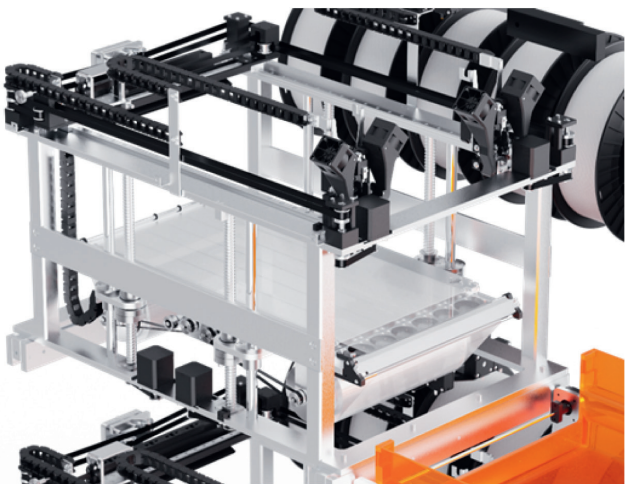
Из этого следует:

1. Увеличение парка FDM-принтеров — нелинейный рост трудоемкости работы и ФОТ.

2. Рост количества заказов — нелинейный рост трудоемкости производства.
3. Расширение штата — рост непроизводственных издержек.
4. Увеличение трудоемкости производства — увеличение сроков готовности изделий.
5. Отсутствие автоматизированных средств учета — рост издержек на брак и пересорт.
6. Сменный график — увеличение штата и рост издержек на брак и пересорт.
7. Круглосуточная работа — увеличение штата, снижение уровня ответственности за качество.

Таким образом, FDM 3D-печать масштабируется со значительными затратами и сопровождается расширением штата, ростом затрат на ФОТ и нелинейным ростом производственных и административных издержек. К этому добавляются сложности с организацией поточной печати, отсутствие аналитики и статистических данных по производству, расходу материала, данных по загрузке оборудования.

Причина — отсутствие технической и программной автоматизации рутинных действий в FDM-печати.



Для решения указанных выше проблем масштабирования весной 2020 года мы начали разработку комплекса автоматизированной FDM 3D-печати.

Были определены следующие цели разработки:

1. Автоматизировать рутинные операции съема готовых изделий и замены материала, исключая необходимость в постоянном присутствии оператора рядом с принтерами.
2. Иметь полноценную информацию о техническом состоянии принтера без визуального контроля и присутствия оператора.
3. Обеспечить масштабируемость производства без роста непроизводственных издержек.
4. Сократить трудоемкость производственного планирования, контроля и учета напечатанных изделий.

5. Сократить риск технических неисправностей и время технического простоя на сервис и восстановление работоспособности.

6. Обеспечить совместимость с наиболее распространенными термопластами и композитами и сократить простои на переналадку, сократить межоперационные простои.

7. Собирать и анализировать данные по процессу печати и состоянию оборудования, отображать аналитику не только для производства, но и для административного персонала, включая расход материала и производственный брак.

8. Предсказывать сроки выполнения проекта с максимальной точностью, используя реальное время печати первых образцов в серии изделий.

9. Реализовать систему управления с двусторонним обменом со сторонними CRM (Битрикс24) и учетными системами (1С: УНФ) для сквозной аналитики эффективности инвестиций в аддитивное производство.

В данной статье мы представляем комплексное решение задачи автоматизации FDM 3D-печати — программно-аппаратный комплекс аддитивного производства Redfab.

3D-принтер Redfab решает существующие проблемы следующим образом:

1. Автоматическая селективная подача и замена материала

Система позволяет выборочно заправлять, извлекать, обрезать и сматывать материал автономно или по команде оператора. К каждой зоне печати одновременно подведено до 5 катушек D300 2,25 кг или до 8 катушек D200 1 кг. Основному и вспомогательному экструдеру доступно по 4 ячейки для прутка 1,75+/-0,15 мм. Загрузив один раз отсек для катушек, инженер может не возвращаться к вопросу заправки материала длительное время, вплоть до 8 дней непрерывной печати при расходе ~50см³/час, или 4 дня при расходе ~100 см³/час. При окончании пластика на катушке система автоматически переключается на следующую. При этом используется материал, указанный в задании на печать.

2. Автоматический сброс готовых изделий

Деталь печатается на пленке, прижатой вакуумом к рабочему столу. После окончания печати пленка протягивается через систему охлаждения, деталь отделяется и сбрасывается в контейнер. После сброса готовой партии принтер автономно запускает следующую печать. Так как сброс деталей проходит с горячего стола, повторный нагрев не требуется.

3. Автоматическая калибровка плоскости стола.

Калибровка плоскости печати по 4 точкам и стола по 20 точкам с внесением поправочных коэффициен-

тов в систему управления (MESH). Фрезерованный стол не имеет внутренних напряжений, так как проходит процедуру термообработки.

Стол термически развязан с силовым каркасом принтера, благодаря чему не искривляется при нагреве до 140°C.

Калибровка выполняется автоматически без участия специалиста.

4. Автоматическая очередь печати

Пользователь задает параметры печати, система управления автоматически формирует очередь проектов и заданий на производство по заданным пользователем параметрам. Учитываются наличие и доступность материала, параметры сопла, приоритеты производства.

5. Автоматические сервисные операции

Система управления по показаниям датчиков определяет сбой и аварии, после чего предпринимает попытки самостоятельного техобслуживания и восстановления процесса печати в случаях, где это возможно. Продуманная система контроля позволяет предупреждать ложные сбои и дает пользователю гибкость в принятии решений. Процесс печати не будет остановлен, если произошел сбой во вспомогательной системе. Таким образом комплекс постарается завершить текущую печать, предварительно уведомив пользователя.

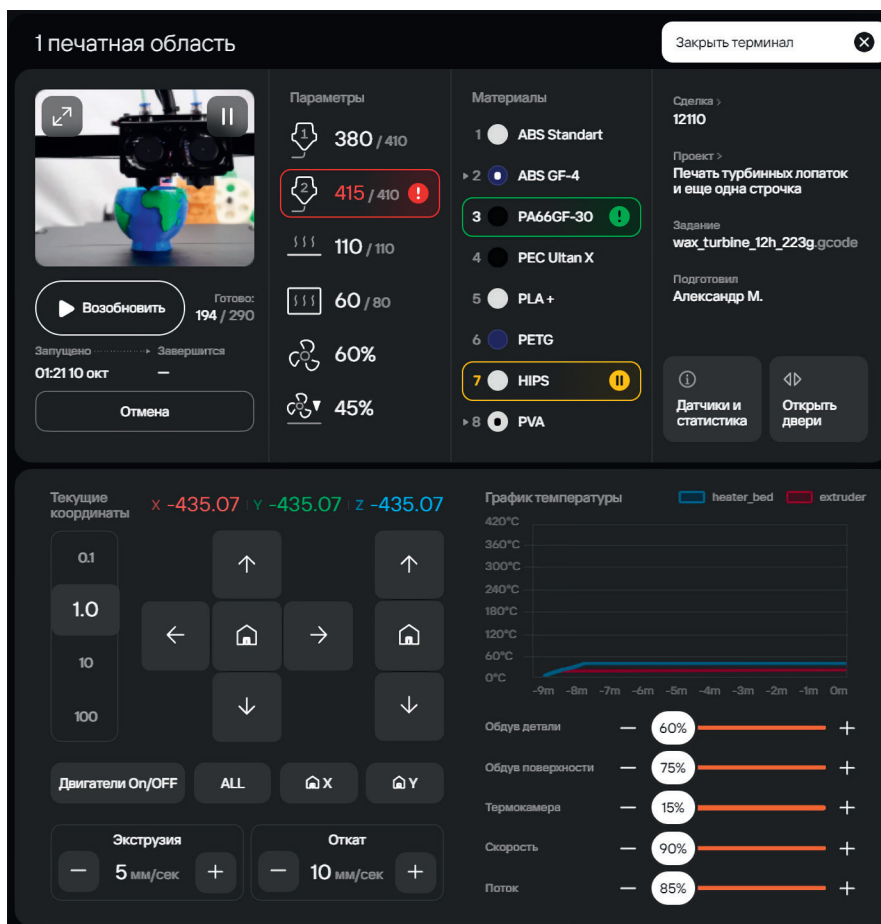
6. Простое техническое обслуживание

Модульная конструкция, быстросъемные экструдеры и легкий доступ ко всем узлам оборудования позволяют оперативно проводить периодическое техническое обслуживание. Написать запрос в техническую поддержку можно напрямую из системы управления. Служба нашей техподдержки при запросе и авторизации со стороны пользователя может удаленно подключиться к системе управления и как провести полную диагностику настроек системы, так и проследить сам процесс печати благодаря встроенной видеокамере. Так как мы самостоятельно производим большую часть комплектующих, мы готовы оперативно предоставить клиенту запасные части.

3D-принтер Redfab оснащен продвинутой системой управления, позволяющей в режиме реального времени анализировать процессы производства, что незаменимо для оценки текущей работы и принятия решений по развитию направления FDM-печати.

1. Статистика, учет и анализ

Система телеметрии собирает и хранит данные не только датчиков, но позволяет собирать информацию о расходе материала и затратах на каждый отдельный проект и заказ, вести учет качества печати и отбраковки изделий, качества проведения техобслуживания с выводом отчетов и сравнением периодов.



Наименование параметра	Значение
Область печати (X/Y/Z), мм	250*430*250
Количество областей печати в 1 комплексе, шт.	3
Количество экструдеров на область печати, шт.	2, директ, быстросъемные
Максимальная температура экструзии, °С	450
Максимальная температура воздуха в активной термокамере с принудительной циркуляцией, °С	80
Максимальная температура нагрева рабочего стола, °С	140
Системы охлаждения деталей	Охлаждение материала на выходе из сопла. Охлаждение слоя по всей площади печати
Производительность при максимальной практической скорости печати, см ³ /час	до 150 (для ABS Standart Filamentarno)
Поддерживаемый формат файлов	gcode, слайсер на выбор пользователя
Интерфейсы передачи данных	Локальная сеть Ethernet, USB, Wi-Fi

2. Контроль сроков производства

Система позволяет визуализировать сроки производства на диаграмме Ганта и рассчитывает время готовности заказа к сдаче на основе фактического времени печати первой копии задания печати. Это позволяет предсказывать срок готовности проекта целиком с высокой точностью.

3. Удаленное наблюдение за процессом печати

Пользователь получает доступ к видеопотоку с камеры, размещенной в рабочей зоне. В начале и при окончании печати делается контрольный снимок, позволяющий отслеживать готовность изделия и отсутствие брака. В будущем мы планируем автоматизировать и этот аспект работы, применяя алгоритмы технического зрения.

4. Контроль и учет доступа

Система аутентификации, настройка групповых прав, настройка ролей (стажер, техник, оператор, администратор, техподдержка), логирование действий пользователя в системе управления. Данный функционал позволяет обеспечить закрытость системы для третьих лиц и ограничивать доступ к производственным и учетным данным согласно политике конфиденциальности клиента.



Наше оборудование работает 24/7 на собственной ферме 3D-печати, поэтому с уверенностью предоставляем вам 2 года гарантии на 3D-принтер Redfab.

Для расчета рентабельности приобретения нашего принтера предлагаем воспользоваться калькулятором на нашем сайте www.redfab.ru. Калькулятор позволяет оценить скорость возврата вложенных инвестиций. Для крупных производств (от 20 единиц 3D-принтеров) мы рекомендуем рассматривать единоразовое приобретение сразу 4 единиц принтеров Redfab в лизинг по специальной цене.

Будем рады встрече с вами в нашем демонстрационном зале в Санкт-Петербурге. У вас будет возможность проверить работу всех систем 3D-принтера Redfab, а также протестировать функционал новейшей системы управления.

Если у вас нет возможности посетить демозал лично, мы предоставляем удаленный доступ к системе управления. Вы можете поработать с ее функционалом, удаленно запустить печать и понаблюдать за принтером по видеопотоку с камеры, размещенной в рабочей зоне. ■

Узнать больше вы можете на нашем сайте

www.redfab.ru

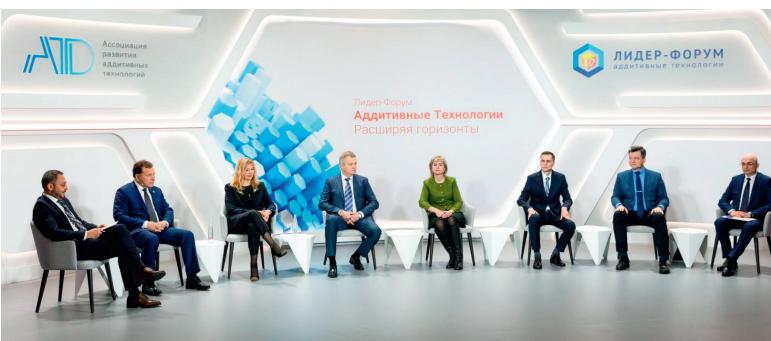
redfab

+7 (812) 425-62-32
sales@redfab.ru
www.redfab.ru

Зинаида Сацкая

Лидер-форум «Аддитивные технологии. Расширяя горизонты», организованный российской Ассоциацией развития аддитивных технологий, констатировал, что аддитивные технологии — один из важнейших инструментов модернизации российской экономики.

На пленарной сессии выступали представители разных отраслей. Тем не менее есть общее понимание, что АТ не вытеснят всё остальное. Они займут свою нишу, связанную с уникальностью изделия. Условно говоря, главное назначение АТ — не новая лопатка, а изменения в качестве жизни, что особенно отчетливо видно на примере медицины. Многократно прозвучало утверждение, что двигателестроение и медицина — лидеры по внедрению АТ и главные драйверы развития отрасли. И, несмотря на то, что проблеме кадров для отрасли была посвящена отдельная сессия, все выступавшие, независимо от отрасли, которую они представляли, на пленарной сессии обращались к этой теме.



Что в активе

В области АТ Россия занимает менее 1% мирового рынка. Несмотря на то, что двигателестроение ходит в передовиках, инновационного прорыва пока нет. Это интересно объяснил Денис Пудков, заместитель директора департамента реализации программы космического ракетного комплекса сверхтяжелого класса госкорпорации «Роскосмос»: «В прошлом веке создали настолько совершенные двигатели, что там нет места для маневра. Да, удастся отыграть 2–5% в массе, каких-то еще характеристиках, но прорыва нет. АТ — шанс сделать принципиально новое». Широкие перспективы у АТ в космосе. Килограмм полезной нагрузки на низкой орбите стоит 1 тыс. долл, выше орбита — выше цена. Всевозможные элементы конструкций космических аппаратов и ракет-носителей, в том числе кронштейны, антенно-фидерные устройства — вот поле использования АТ.

Весьма оптимистичен был Святослав Неруш, начальник научно-исследовательского отделения «Технологии порошковой металлургии, аддитивного производства, сварки, защитных и специальных высокотемпературных покрытий и материалов» ВИАМ. Он констатировал устойчивый ежегодный финансовый рост АТ, которому пандемия не смогла помешать. В 2020 году ВИАМ поставил двигателестроителям авиакосмического сектора и «Росатому» около 800, а в 2021 — уже 5000 деталей. ВИАМ полностью закрыл проблему металлических материалов. Но и без ложки дёгтя не обошлось. Следующий шаг — печать керамическими материалами, для которой нужен такой полуфабрикат, как паста из связующего и керамических частиц. «По этому направлению в стране разработки нулевые, — говорит Неруш. — У нас 10 единиц оборудования по всем направлениям. Все машины импортные, а где отечественные и ПО к ним? В «РусАТ» есть первые образцы оборудования. У нас колоссальный опыт работы на зарубежном оборудовании, и мы предлагали оценить образцы. Но с «РусАТ» сдвигов нет».

Участники сессии видят перспективу ускорить печать, но пока не удастся сократить время на подготовку принтера к печати и постобработку. Требуется всё большая зона построения, «Роскосмосу» требуются новые материалы. Виталий Сергеев, первый проректор политехнического университета Петра Великого (СПб), тоже считает, что «к металлу привыкли», и интересен уход к новым материалам. Хочется, чтобы принтеры были универсальными, а кроме того, импортному оборудованию нужна отечественная альтернатива. Участники сессии отмечали, что увеличение скорости и снижение стоимости — ключевые моменты.

Легализация применения АТ

Отдельная сессия была посвящена АТ в аэрокосмической отрасли. Обсуждались современные требования, возможности, потенциал роста.

Доказательства прав на существование созданных на основе аддитивных технологий изделий — едва ли не самая главная проблема для аэрокосмической отрасли. Для регуляторных органов АТ — это пока просто рискованный проект, требующий длительных процессов сертификации и аттестации.

Отдельным вопросом, вынесенным на обсуждение, была необходимость создания единой, доступной матрицы по общей и специальной квалификации мате-

риалов, технологий и деталей, которые изготовлены по АТ. Вопрос, я бы сказала, не вызвал энтузиазма. По общему мнению, каждому предприятию, использующему АТ, пока стоит сосредоточиться на наращивании собственного опыта решения этой задачи. При этом легких путей нет.

Александр Берснев, гендиректор АО «Композит», не видит особых проблем внутри своей компании: «У нас своя производственная база, и мы можем делать у себя всё — от порошка до детали. Но наши условия выращивания отличаются от условий заказчика. Поэтому, передав металлопорошковую композицию партнеру, мы ждем от него детали и образцы-свидетели, созданные в его реальных условиях, чтобы установить соответствие переданного и полученного. И только тогда может идти речь о паспортизации. То есть, по сути, идет своеобразная верификация конечного производителя».

Альберт Кляйн, директор по финансам и продажам Fit Additive Manufacturing Group (Германия), сказал, что у них есть сходные вопросы — сертифицировать ли процесс или сами детали. При этом надо понимать, что некоторые АТ лучше подходят для сертификации, стандартизации, а другие менее, и в этом вопросе все в начале пути. Альберт Кляйн отметил также, что для компаний европейских стран вопрос создания единого информационного пространства в аддитивной сфере не стоит. «Частные компании разрабатывают свои коммерческие ноу-хау и не делятся этой информацией, а в России многие компании, которые занимаются АТ, это государственные компании, и в этой ситуации обмен информацией понятен».

Тренды

Модератор сессии Владислав Кочкуров, генеральный директор АО «ЦАТ», ГК «Ростех», переходя к следующей теме обсуждения, отметил, что все сейчас работают «по двум процессам — послойный синтез и прямое лазерное выращивание». Сегодня эти процессы затратны и инвестиционно, и по стоимости материалов. Чтобы оценить эффективность, надо оценить весь производственный процесс: подготовка — процесс — постобработка. Станут ли АТ «конвейерным» производством или останутся кастомизированными решениями для таких высокотехнологичных отраслей, как авиация, космос, медицина? Что нас ждет на горизонте 5–10 лет?

Ашхен Овсепян, генеральный директор Siu Systems, считает, что самое важное — развитие технологий, но отталкиваться нужно от задачи. «Мы в России стараемся получить абсолютно идеальную металлическую деталь, тратим много усилий на ее создание, но при этом не решаем нашу комплексную производственную задачу. Важно понимать тот объем внедрения, который нужен в каждом конкретном месте. Далеко не факт, что нам нужна шедевральная деталь в каждом узле. Нам нужна среднестатистическая деталь, которая позволит самолету

летать. Тогда мы закрываем нашу задачу и ускоряем наш индустриальный цикл на много циклов вперед».

Александр Аксёнов, заместитель главного инженера по аддитивным технологиям, «ОДК-Авиадвигатель», считает, что технология селективного лазерного сплавления ограничена габаритами и ее использование не имеет ни технического, ни экономического смысла. Под более крупные детали, 2–3-метровые корпуса пойдут провололочные технологии. «Источником, скорее всего, будет или лазер, или плазма. Есть еще одна большая проблема. У нас в России, и скорее всего, в мире, нет тех сплавов, которые могли бы работать при температуре 2000 К, что не позволяет нам делать роторные детали типа рабочей лопатки. И основное направление — это создание лопаток с эффективной системой охлаждения, которая предполагает сложную геометрию внутренних каналов, что можно сделать только с помощью аддитивных технологий».

Артём Коротыгин, руководитель комплексных инновационных проектов компании 3D Systems, надеется, что через 5–10 лет технология селективного лазерного сплавления Powder Bed Fusion (PBF) будет на равных с такими традиционными технологиями, как мехобработка, литьё и другие, и авиационные власти уже не будут заставлять производителей авиационной техники квалифицировать даже простейшие некритические детали по квалификационному базису критических деталей. «Я также думаю, — говорит Коротыгин, — что через 5–10 лет Metal Binder Jetting, Metal Jetting, Metal FDM и другие относительно молодые технологии могут выйти на плато зрелости и достигнут примерно того же статуса, что и лазерное сплавление. Производительность, скорее всего, будет достигаться не только увеличением числа лазеров, но и использованием других источников и лазеров, отличных от тех, что используются сейчас».

Александр Берснев также считает, что высокотемпературные материалы — уже единая задача и авиационного, и ракетного двигателестроения. Задача ближайшего будущего — достичь с помощью 3D-печати необходимых свойств и геометрий в малогабаритном диапазоне и продвигаться к крупногабаритным конструкциям.

Участники сессии рассказали, над чем работают, и, возможно, на следующем форуме расскажут о выпущенных на рынок решениях.

АТ в медицине. Кто в поле воин?

Участники сессии, рассказывая о том, чем занимаются их компании, сошлись на том, что аддитивщики не могут решить задачи, которые стоят перед медициной. Гуманитарии-медики и технические производственники говорят на разных языках, и надо еще договориться, что они понимают под одними и теми же словами. В медицине 3D-принтер — это важная, но только часть технологической цепочки. Ашхен Овсепян, модератор сессии «АТ в медицине: преграды для широкого при-

менения, пути решения» образно и ёмко выразила эту мысль: «Принтер в поле не воин! Нам нужно еще всё "до" и всё "после"».

Сергей Бушнев, заместитель директора по развитию ЦИТО Минздрава РФ, отметил отечественную особенность: у нас есть компании, которые занимаются печатью «для всего», а медицина — это специфический сегмент с очень сложным регуляторным путем. На Западе такие компании есть, а у нас недостаточная ёмкость рынка препятствует их появлению.

Участники дискуссии отмечали, что керамика в медицине перспективна, но никаких наработок у отечественных медиков, кроме стоматологического направления, сегодня нет. И снова препятствием для развития рынка названа его недостаточная емкость. Руслан Свинцицкий, региональный менеджер по России и СНГ компании 3DCeram, посетовал, что в России не хватает предпринимателей, которые готовы инвестировать в данное производство. Но это касается не только керамики. Владимир Дувидзон, руководитель направления по обработке полимерных материалов ИФ «ФБ «Универсал», говорит, что у нас практически нет материалов с маркировкой «медицинские», разве что за исключением титана. «Все материалы, которые можно использовать "внутри" для имплантации, не имеют у нас медицинской сертификации, и ни одна фирма не может позволить себе ее провести, т.к. это слишком дорого». Классический пример — полиэфирэфиркетон (ПЕЕК). Сегодня это наиболее эффективный полимерный материал, который можно применять «внутри» наряду с титаном. Отечественного медицинского полиэфирэфиркетона нет. Никто не продает в Россию медицинский полиэфирэфиркетон, поставляют только готовые изделия. У нас есть технический полиэфирэфиркетон, и есть два его производителя. Но требуются дополнительные инвестиции, чтобы выпустить медицинскую марку. И здесь тормозом выступает ёмкость рынка. «Потребление всей отечественной медицины — от 100 до 500 кг в год. Это не бизнес, потому что затраты не окупятся. Это дело государства. Я уверен, что если организовать производство здесь, оно будет дешевле», но при этом нет запроса и от медицинского сообщества. Его устраивает продукция, которая поступает из США и Европы.

Андрей Адамов, генеральный директор Harz Labs, называет свою компанию лидером рынка материалов для стоматологии и единственной российской компанией, которая прошла сертификацию. Исходя из опыта своей компании, которая поставляет материалы в 70 стран мира, он продолжил разговор о ёмкости рынка. По его мнению, «строить бизнес-план, ориентируясь только на рынок России, — это утопия». Ориентироваться надо сразу на мировой рынок. «Потребности отечественного рынка на данный момент мы закрываем, — говорит предприниматель, — но перспективы его ощутимого развития не просматриваются».

Сергей Бушнев не видит ничего нового, что не повторяло бы мировой опыт «Кто должен доводить новое до ума?», — задает он вопрос. — Врачи или интеграторы с новыми технологиями и оборудованием?» И, отвечая на свой вопрос, предлагает посмотреть на опыт США, где точкой синтеза знаний является университет. Если речь о медицине, то это университетские клиники. «Созданный университетом первый "пласт знаний" государство поддерживает через систему целевых грантов. Из этого первого пласта фундаментальных знаний появляется какой-то конкретный продукт, который начинают поддерживать уже венчурные инвесторы и профильные компании. Они доводят продукт до готового изделия и потом превращают либо в компанию, либо в объект поглощения. У нас, к сожалению, этот процесс разорван и институтов поддержки практически нет».

Учить: кого, чему, когда и...

Сессия небожителей

На сессии, посвященной АТ в медицине, прозвучало сожаление, что учебные программы для специальности АТ, там же, внутри вузов, и разрабатываются, и редко когда привлекаются люди, работающие в этой сфере. Сессия «Подготовка кадров в АТ. Разработки на базе научно-образовательных центров» ровно этот нерадостный тезис и подтвердила. На сессии присутствовали только ученые. Ее блестяще модерировал ректор Корабелки Глеб Туричин, но и его невероятная эрудиция не могла восполнить отсутствие важного звена, а именно — «потребителей» кадров. Впрочем, это упрек не участникам сессии, а ее организаторам.

Итак, кто такой специалист в области АТ? Кого ждет индустрия, учитывая, что есть механики, физики, химики, материаловеды, медики и прочие? Мнения разошлись.

Одни считают, что аддитивщик — специалист междисциплинарный и для него важно некое базовое образование, на которое потом будет наложена аддитивная специализация. Другие считают, что специалиста надо готовить под определенные задачи, в решении которых они выступают и как материаловеды, и как инженеры. Третьи считают, что в аддитивном производстве требуется универсал, который должен иметь компетенции в материаловедении, химии, технологиях, проектировании и подготовке производства, а также экономике. Четвертые говорят, что специалист по АТ — это, по сути, интегратор, перекладывающий стандартные решения в аддитивное производство.

Модератор очень точно описал эту разногласию мнений. Усилиями нескольких университетов был сформирован образовательный стандарт по АТ, в котором была предпринята попытка объединить то, что сейчас звучит. Это ситуация описана в старой китайской сказке, в которой несколько слепых должны были сказать, что такое слон. Кто трогал хобот, говорил, что это змея. Кто трогал хвост, говорил, что это веревка.

Кто трогал ногу, говорил, что это толстый столб. Иными словами, всё «раздергивается» по специализациям вузов. Как это всё объединить?

Кристиан Арнц, глава направления лазерной обработки материалов Института производственных технологий Фраунгофера, рассказал об опыте Германии: «Да, требуются специалисты из разных областей, которым нужно дать дополнительные навыки. Есть два важных аспекта, на них мы концентрируемся, когда обучаем студентов. Прежде всего, конструирование деталей, которое выявляет высокий потенциал АТ. И второе — научить комбинировать АТ с традиционным производством».

Предприятиям нужны специалисты. Но пока небожители дискутируют и при этом, по словам модератора, «даже не могут до конца сформулировать, какими компетенциями должен обладать специалист в области АТ», предприятия работают и индустрия растет. И скорее всего, объединяющей может стать идея налаживания коммуникаций в широком смысле этого слова.

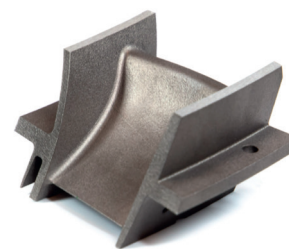
За рубежом у многих промышленных компаний есть свои подразделения R&D, и большую часть исследовательских задач решают специалисты компании. Но есть пограничные или узкоспециализированные вопросы, под которые в компаниях нет узких специалистов. Вот тогда можно работать со специалистами высшей школы. В Германии под какие-то проекты можно получить государственное финансирование, но в большинстве случаев университет выполняет роль субподрядчика. У Фраунгофера это работает так, а в сессии по проблемам АТ в медицине мы уже упоминали о медицинских клиниках при университетах.

Учить надо на «железе»

Вопрос «чему учить?» Станислав Евлашин, ведущий научный сотрудник «Сколтех», считает почти философским. У всех есть книги, научные статьи, но всегда ограничиваются тем оборудованием, которое есть в лаборатории. Возможности «Сколтех» покрывают большое количество технологий, за каждой технологией закреплен инженер, который может рассказать об ее особенностях. А учить надо тому, что соответствует специализации вуза. Эту же мысль продолжает Павел Петров, заведующий кафедрой Московского политеха. «Упор всегда на то оборудование, которым располагает лаборатория, а оборудование, которого нет, "достаем" системой практик. Для этого существует сеть промышленных партнеров». Кристиан Арнц тоже считает, что будущий специалист в процессе обучения должен работать с оборудованием руками. «Нужно использовать современное, актуальное оборудование и нужно, чтобы студенты проводили большое количество времени в стажировках под руководством университетских профессоров, но на предприятиях отрасли».



Деталь топологической оптимизации детали. Компания НПО «Систем»



Согловая лопатка. Компания АО «ЦАТ»

От печки

Андрей Клепач, главный экономист ВЭБ РФ, высказал важное соображение. «Надо понять, где возможны высокотехнологичные прорывы, а где возможно создание массового рынка. Несмотря на рост, авиастроение, двигателестроение, космическая отрасль — сегменты, где аддитивные технологии имеют ограниченный спрос. Медицина все равно пока базируется на имплантатах титановых, в строительстве аддитивные технологии пока тоже не получили массового применения вопреки большому количеству разговоров».

Комплексная научно-техническая программа (КНТП) на 2024 год предусматривает на аддитивные технологии 2,5 млрд руб. Нет финансирования на уже одобренные РАН композитные материалы. Может быть, надо отстаивать финансирование академической науки на создание прорывных исследований? Но фактически основные усилия придется делать «Росатому», ставшему основным координатором отрасли, и другим игрокам рынка. Надо подумать, какие ресурсы могут быть привлечены из фондов развития. Это важнее, чем расчет на то, что с 2023 года пойдут бюджетные деньги».

Вместо эпилога

Участники форума с уважением упоминали Wolhers Report, но стоило бы упомянуть и то, что в этом докладе за 2021 год среди 113 названных производителей принтеров для 3D-печати значатся две российские компании — Picaso и Russian 3D Printers (3DSLА — Российские 3D принтеры). Их мнение о прорывных технологиях и перспективах развития аддитивной индустрии в стране тоже интересно, но, видимо, не все помнят, что кроме госкорпораций существует вполне успешный частный бизнес. ■

P.S. На Лидер-форуме было еще две сессии, одна из которых была посвящена использованию аддитивных технологий в машиностроении, а другая — в нефтегазовой отрасли. О них читайте в следующем номере, приуроченном к выставкам «Металлообработка» и «Нефтегаз».

Фото: <https://rosmould.ru.messefrankfurt.com/>,
<https://leaderforum.com/>

Зинаида Сацкая

Аддитивные технологии сегодня стали предметом мозгового штурма с разных сторон. Кроме сугубо технических аспектов — технологии, оборудование, материалы — естественным образом возникает и образовательный аспект: чему учить? кого учить? когда учить? как учить?



В этом выпуске журнала мы рассказали о том, как видит этот аспект высшая школа (см. стр. 12). Особенностью дискуссии «Подготовка кадров в АТ. Разработки на базе научно-образовательных центров» на Лидер-Форуме стала замкнутость высшей школы на самой себе, потому что участниками панели были только представители вузов. Мы хотим разорвать этот вакуум и даем слово представителю аддитивной промышленности. Сегодня наш гость — Денис Власов, руководитель R&D и заместитель генерального директора ООО «Эксклюзивные Решения» (ТМ «3DSL.A RU — Российские 3D-принтеры») и генеральный директор ООО «Триангулятика».

Мы узнали, что Денис пошел в промышленно-технологический колледж имени Н. И. Путилова преподавать. Нам показалось это интересным поворотом темы.

Итак, вы начали преподавать. Первые впечатления?

Мы весной принимали на практику студентов другого колледжа, и у меня осталось тревожное впечатление, что им абсолютно ничего не надо. Возможно, потому, что практика была для них обязательной. И я предложил Путиловскому колледжу сотрудничество, обосновав это тем, что мы хотим иметь хорошие кадры рабочих профессий, а колледж решит часть проблем обучения.

Почему обратились в другой колледж, а не в тот, с которым уже взаимодействовали?

В предыдущем колледже я пообщался с преподавателями и не вынес из этого общения ничего, кроме сожаления. Вроде бы люди говорят правильные вещи, но они говорят их по написанному. То есть они просто пере-ска-зы-вают то, что написано другими людьми, а не вынесено из собственного опыта. Вот это я хотел преодолеть с чистого листа. К тому же в Путиловском колледже есть более интересная для нас специализация. Они выпускают инженера-наладчика машин с ЧПУ и собственно аддитивных установок. По моему мнению, правильно обученные люди через несколько лет будут завалены отличными предложениями, потому что, по сути, от них зависит успех бизнеса, построенного на АТ.

Первый вопрос и первый ответ

Мне назначили день, я пришел к ребятам четвертого — выпускного! — курса, которые потом должны прийти ко мне на практику. И мой первый вопрос аудитории был: «Почему вы здесь? Почему вы выбрали аддитивные технологии?». И первый ответ меня, человека, как я считал, готового к чему угодно, по-шукшински «срезал»: «Мы думали, что это перспективно». Представьте, четвертый курс, специалисты, которым вот-вот выходить на рынок, полны разочарования в выбранной профессии. Я даже не сразу понял, как мне детерминировать причины этого разочарования. Я поговорил с ними об одном, о другом, понял, что учебная программа в их головы заложена прекрасно. Но стоит

мне чуть-чуть выйти за пределы очерченного терминологического поля, начать использовать узкоспециализированную профессиональную терминологию, мои слушатели теряются. И я понял причину: они не привязаны к реальным машинам, к реальным изделиям.

То есть «привязывать» их к машинам надо было с самого начала, с первого курса?

Да.

Аддитивные технологии — повод поговорить о жизни

Итак, вы рассказали о вашем первом впечатлении. А впечатление ребят от вас?

На первом занятии мы с ребятами разговаривали два с половиной часа, и я столкнулся с бурей негодования. Я, когда увлекаюсь рассказом о любимых вещах, остановиться не могу, а у них, оказывается, перерыв есть. Так что, думаю, их первое впечатление, что пришел садист в костюмчике.

Да, смешно. И что вы противопоставили этому эмоциональному дискомфорту аудитории?

Я постарался сразу отдать в их распоряжение, фигурально выражаясь, всё пространство для игры. Беседа идет. Я отхожу от программы, излагаю какие-то бизнес-идеи и в процессе разговора спрашиваю: «Как вы думаете, есть ли в сфере аддитивных технологий российские разработчики?». Ответом было уверенное «нет».

И это при том, что перед ними стоял российский разработчик?

Вот в этом и дело. По моему скромному мнению, Питер — это аддитивная столица России. Они даже вообще не знали, что их город является колыбелью аддитивных технологий, здесь начиналась стереолитография, здесь творят классные люди, только Корабелка и Политех чего стоят! Рассказываю, показываю, какие работы делаются. Вижу, что их это зацепило, начинают вникать. Да, аддитивные технологии — это шанс нашего поколения, потому что они позволяют создавать такие продукты, которых раньше не было. Рассказываю о своих «золотых» продуктах, рассказываю о профессоре Валентине Гапонцеве, который принимал стратегические решения при защите своего бизнеса. То есть я им рассказывал о жизни в бизнесе.

Отчаянный вы человек.

Да, дети оказались для меня сложной аудиторией. Я вышел в состоянии стресса. Проще оказалось гово-

рить перед полным залом профессиональных дядек, чем перед аудиторией, для которой надо всю информацию переоценивать, адаптировать материал.

И какие действия вы предприняли?

Попросил руководство колледжа на следующее занятие собрать в актовом зале не последний курс специализации АТ, а всех — от первого курса до последнего. И поставил для себя задачу-максимум — зажечь глаза. Привести к пониманию, зачем они сюда пришли. И в следующий раз я пришел уже к 70 студентам колледжа. Попросил поднять руки по курсам, чтобы понять, как они в зале распределены. Это было нужно для последующей оценки восприятия. И начал рассказ о технологиях. Опять-таки Дмитрия Трубашевского вспоминаем, потому что когда я показал систему Трубашевского и они увидели, какое существует многообразие принтеров, в глазах и ребят, и преподавателей читалась едва ли не паника. Какой массив технологий существует! И я увидел, что 1, 2, 3 курс — абсолютно живые, хотя третий курс уже с ленцой. И понял, что у старшекурсников это не разочарование в профессии, а, как бы это сказать, дембельский синдром. Мол, экватор уже пройден, всё катится по накатанным рельсам, главное соблюдать правила, доучиться, потому что у многих уже есть свои дела, какая-то работа. После этой очень интересной и для них, и для меня беседы появилось много ребят, которые всерьез восприняли первое оттранслированное мной правило: «Мы считаем, что перед нами стоит просто Денис, такой же парень из нашего поколения, у нас у всех есть один шанс стать богатыми и красивыми». И сказал им, что просто буду делиться с ними своими скромными познаниями. Не потому что я умнее, а просто потому, что дольше их в этой сфере работаю. Моя цель, — чтобы мы вместе делали лучше и больше. Места хватит на всех.

То есть вы углубились не в собственно аддитивные технологии, а в тему перспектив выпускников на рынке?

Я счел очень важным мотивировать ребят на активное изучение аддитивных технологий. Для этого надо было показать перспективу. Я им объяснял, почему сейчас, они, может быть, не видят вакансий оператора, инженера аддитивной установки. Потому что наша промышленность довольно инертна. У нас несколько лет назад сформировались какие-то центры. Сейчас они поучились работать, поделали ОКРы, НИОКРы, НИРы, потом они планомерно выбивают должности. «И вы, мои дорогие, — говорю я им, — попадете в этот рынок, когда он еще не будет сформирован, когда будут выбирать лучших из вас, и делать это будут коммерсанты, которым вы будете нужны».

Журавль в небе хорош, что и говорить. А что вы предложили в качестве синицы в руках?

Я предложил поговорить о том, на чем сейчас студентам можно зарабатывать деньги. Мой второй кадр в презентации назывался «Может ли студент заработать миллион на аддитивке?».

И после этого на вас устремились семьдесят пар глаз?

Да. Изложил им идею «золотых» продуктов и сказал, что сейчас буду отдавать им тематики, на которых деньги можно заработать сейчас.

«Золотые» продукты — прорывные для традиционных рынков продукты с новыми потребительскими свойствами, которые можно выпускать только за пределами существующих производственно-технологических ограничений, имеющие новую топологию и аддитивные методики производства.

Вот в нашем Красносельском районе уже лет 30 есть рынок «Юнона», вроде московской «Горбушки». Туда в 90-е приходили 18-летние парни, которые начинали дело, и остались там до сих пор. Например, продавал человек, запчасти для стиральных машин. Естественно, у него был огромный склад, потому что могла понадобиться деталь для стиральной машины, давно снятой с производства. Он снабжал мастеров. Так эти связи формировались годами. В результате, сидя в этом контейнере, продавая одну шестеренку в день случайному покупателю, предприниматель все равно продает тысячу этих деталей сервисным мастерам, которые бегают по городу, двадцать лет работая с ним. Повзрослевший предприниматель купил сыну 3D-принтер, сканер и отдал ему какое-то количество деталей, чтобы мальчик сделал реверс-инжиниринг. И пошел семейный бизнес. Сейчас они полностью сформировали цифровую библиотеку запчастей машин, которые выпускались с незапамятных времен. Они постепенно уменьшают свой склад. Надо понимать, что склад — это омертвленные деньги. Если к ним приходит мастер за деталью для старой стиральной машины, они ее просто печатают. Для мастера ситуация не изменилась: вечером позвонил, утром напечатанную за ночь деталь забрал. Сейчас у них полтора десятка принтеров, они печатают детали, вместо того, чтобы заполнять склад, и постоянно работают над качеством.

Почему выбрали именно этот пример?

Я старался приводить примеры, доступные ментально и географически. Смотри, это происходит на

соседней улице. Сходи на «Юнону» и узнай всё из первых рук. Только не ленись!

О бизнесе и о себе

А истории из своей практики вы им рассказывали?

Конечно. Рассказывал, как мы делали принтеры, как мы хитрили, чтобы увеличивать свою маржу. Убеждал, что никогда не надо работать за 20% прибыли, а закладываться с прибылью надо так, чтобы хватало на развитие продукта. Рассказывал, как боролись с конкурентами, которые продавали принтеры дешевле на 20 тысяч, давали безумные скидки дилерам и клиентам, и в результате ушли с рынка из-за того, что в какой-то момент, сделали неправильно детали для принтеров, а на переделку и досборку принтеров денег не оказалось. То есть я рассказывал такие жизненные вещи, перемешивал это с аддитивкой, удивлял их тем, что у Трубашевского нарисовано 30 технологий, а через пять лет эти технологии создадут между собой гибриды и работать с этими более сложными установками предстоит именно моим слушателям.

Генри Форд вам в помощь

Наверняка ребята интересовались перспективами заработка?

Конечно. В Питере есть одна компания, года 3–4 назад у них было четыре SLM-принтера, которые постоянно были загружены печатью зубных протезов. В сутки с четырех принтеров выходило примерно 1000 штук, что приносило компании 500 тысяч рублей в сутки. Если один станок останавливается, директор фирмы теряет 125 тысяч рублей в день. А теперь, говорю ребятам, подумайте, сколько будет стоить сервис-мастер, — а это ваша специальность! — в обязанности которого будет входить обеспечение бесперебойной работы принтеров? Ответы были, как на аукционе, — кто предложит больше. И были правы. И скорее всего, будет работать принцип Генри Форда. Сервис-мастера будут получать зарплату за то время, пока они, условно говоря, «играют в шашки». Была легенда, что у Форда сотрудники, которые обеспечивали работу конвейера, получали зарплату за то время, пока конвейер работает. Как только конвейер останавливается, и они приступают к ремонтным работам, начисление заработной платы тоже останавливается. Люди были мотивированы на безостановочную работу конвейера.

Какие вопросы задавали ребята?

Вопросы, от которых я, простите, обалдел. Одна девочка начала буквально экзаменовывать меня по качеству материалов и условиям, при которых при SLM-печати качество материалов сохраняется. Всего-



навсего второкурсница, которая в колледже изучает материаловедение. Я уже об этом говорил: теория в их головы вложена прекрасно, поэтому в каждый свой кейс я вкладывал им образцы напечатанных изделий. Вообще технических вопросов было меньше. Ребятам волнует их перспектива: как найти инвестора; можно ли взять кредит и в какой момент об этом стоит задуматься. Ну, и вариации на тему «Можно ли напечатать?..». И очень интересно получилось. Вообще надо рассказывать вещи, которые вызывают wow-эффект и заставляют шевелить мозгами. А после экскурсии на мою рабочую площадку спрашивали, буду ли я рассказывать им коммерческие тайны.

Был соблазн уйти от ответа на этот скользкий вопрос?

Для меня это был простой вопрос, потому что я всегда открывал свои разработки. Мне есть чем гордиться, мне нечего стыдиться, я не боюсь, что у меня утащат то, что я показываю. Я показываю людям платы, показываю внутренности моих машин. Если показанное мной станет стимулом для моих конкурентов, чтобы они подтянулись, я буду радоваться. Если мои конкуренты решат использовать то, что они увидели в моих машинах, для борьбы со мной, я буду спокоен. Это их выбор.

Я не скрывал от ребят, что хочу передать им как можно больше нюансов, чтобы мы шли вперед и обогнали всех. После этой экскурсии пять человек сразу попросили меня взять их на практику. Я сказал им, что буду их эксплуатировать, за работу не дам денег, заставлю своими руками пройти все процессы, побыть подмастерьями и всё почувствовать.

Не слишком сурово?

Пока ни один из тех, кто приходил к нам на практику, не ушел из нашей компании. Я чувствую свою ответственность за тех, кого, по Экзюпери, приручил. Я честно говорю: сегодня я могу платить столько, когда у нас бизнес будет расширяться, заработок будет расти. Именно честность позволила нам создать абсолютно стабильный коллектив.

У вас есть жесткий план занятий?

Стараюсь слышать ребят и идти от запроса. Один из студентов меня спрашивал, как я считаю себестоимость. Вопрос колледжу показался интересным, и мы посвятили этому отдельное занятие. Я же по образованию экономист, и про экономику рассказывать — это моя прямая обязанность.

Как бы вы сформулировали разницу восприятия аудиторную и экскурсионную в условиях реально действующего предприятия?

Те же ребята пришли другими людьми. Кстати, на экскурсию пришли 16 человек из 22 по списку. Преподавателей колледжа это сильно удивило, потому что обычно на экскурсии приходит 8–10 человек. В аудитории они прятались за компьютеры, здесь, наоборот, старались везде заглянуть. И я старался затянуть их в этот прекрасный омут поглубже. Я ребятам показывал работающее оборудование. Они в первый раз увидели, как на плату расставляются элементы на расстановщике, как работает фрезер и просто step-by-step показывал, что откуда берется, как организован рабочий процесс. И сам понял, что им нужен экшн! Им нужны эти игрушки! Мне в жизни повезло: моя работа — это игрушки, которые ко всему прочему ложатся в наш производственный процесс. И ребятам я искренне желаю такого же везения.

Вы можете представить себе школьную олимпиаду по АТ?

Вполне.

Что могло бы быть ее предметом?

Я бы проверял аддитивную интуицию и понимание процессов. Проводил бы олимпиаду без оборудования, но с автоматическим нейроанализом результатов и проверял бы именно то, что мы — разработчики софта для аддитивного производства — стараемся автоматизировать: 1) расстановка поддержек на сложных объектах — на время, качество удержания и оптимальное расположение; 2) определение оптимальных технологий для печати объектов; 3) настройка слайсера по заданию; 4) определение причин дефекта в представленном объекте с и описание метода устранения..

И в заключение вопрос, с которого надо было начинать: кого должны готовить колледжи и кого вузы?

Вузы, видимо, создателей технологий, оборудования, и материалов, а колледжи — технологов и наладчиков аддитивного оборудования — именно тех ребят, которым выпала честь обеспечивать максимальный аптайм аддитивного оборудования. ■

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ: ВАЖНЫЙ ДИАЛОГ

Татьяна Карпова

В рамках выставки «Здравоохранение» и Международного научно-практического форума «Российская неделя здравоохранения–2021», который стал федеральным мероприятием Года науки и технологий в медицине, состоялась III конференция «Аддитивные технологии для медицины: мировой и российский опыт», организованная компанией Z-axis и ЦВК «Экспоцентр».

Это одна из тех площадок, где встречаются производители и дилеры оборудования и материалов с медиками, которые заинтересованы в использовании новых технологий в своей практике. Возможность представить новинки и наработки, отметить направления развития, обменяться опытом облегчает продвижение и внедрение перспективных 3D-методик, материалов, оборудования в сфере медицины, позволяющих решать актуальные задачи. Среди рассмотренных тем: перспективы развития в стоматологии, использование полимерных и композитных 3D-материалов для медицины, производство и установка индивидуальных имплантатов и протезов, предоперационное моделирование, изготовление деталей и узлов медицинского оборудования, инструментов, ортопедической обуви и др.

Тенденции в стоматологии

Тенденции и перспективы развития 3D-печати в стоматологии рассмотрел в своем докладе Артем Гатич, специалист по развитию бизнеса отдела маркетинга и развития ассортимента компании MyDent24. Его доклад традиционно вызывает интерес у профессио-

нальной аудитории, поскольку отражает как текущий уровень развития в стране, так и существующие трудности. Поэтому хочется остановиться на нем подробнее.

Процессы производства стоматологических конструкций зачастую требуют высоких мануальных навыков специалистов, реализующих необходимые продукты. Таких специалистов немного. Использование цифровых технологий (субтрактивных и аддитивных) позволяет нивелировать недостаточный уровень мануальных навыков и обеспечивать высокое качество конечного изделия. Другими задачами аддитивных технологий в стоматологии являются: автоматизация производства; уменьшение времени на изготовление изделия; отказ от классических материалов — воск, гипс, силикон; хранение данных пациентов в цифровом формате; упрощение процессов изготовления изделия; разгрузка фрезерного станка (использование более дешевого оборудования); повышение имиджа клиники и лаборатории.

На текущий момент наиболее часто применяют фотополимерные аддитивные технологии: SLA (стереолитография), DLP (диодное лазерное проецирование), LCD (фотополимерная печать с помощью жидкокристаллической матрицы — наиболее динамично развивающаяся и дешевая технология). Также используются SLS/SLM, FDM.

Почему фотополимерная печать получила широкое внедрение? Во-первых, это эстетичность результатов, сравнимая с традиционными технологиями. Также это высокая точность печати. Например, для DLP-печати существует оборудование с подтвержденной точностью 25–27 мкм по горизонтальным осям, что позволяет делать сложные протяженные конструкции. К тому же это высокая продуктивность при небольшой площади, высокая скорость моделирования изделия. Повышение доступности интраорального сканирования позволяет уходить от более сложного протокола (снятие слепка, отливание гипсовой модели, восковое моделирование и т.д.) и переходить к современному протоколу (интраоральное сканирование, моделирование, производство). Это проще и для доктора, и для техника, и нивелирует все возможные ошибки, связанные с работой каждого из специалистов в цепочке. Дополнительные преимуще-



Печать индивидуальных слепочных ложек в стоматологии.
Фото:
<https://dental.formlabs.com/>



ства фотополимерных технологий: широкий диапазон применения, использование пластика с различными свойствами, стабильность результатов, низкая себестоимость, совместимость фотополимерных смол с зуботехническими материалами, относительная простота использования.

Что же печатают сейчас стоматологи? Модели челюстей (чтобы воспроизвести форму ортопедической конструкции, которую планируется изготовить), модели для формовки элайнеров (которые достаточно сложно или невозможно получить ручным методом, но очень легко и дешево изготовить с помощью 3D-печати), каркасы для литья или прессовки керамики для изготовления коронок, хирургические шаблоны, капы и др.

Важный момент в развитии стоматологических приложений — это готовность различных производителей изготавливать материалы специально для стоматологического применения. Ассортимент материалов для 3D-печати в последнее время вырос кратно. Каждый из этих материалов предназначен для изготовления той или иной конструкции. Растет широта, возможность выбора, появляются новые области применения 3D-печати. Например, наиболее ожидаемой в России является регистрация материалов для постоянных коронок, для базисов съемных протезов, для переноса брекетов с ортодонтических моделей.

Если говорить о проблемах, то самый большой барьер применения цифровых технологий в нашей стране — это отсутствие правового регулирования, а именно невозможность регистрации 3D-принтеров как медицинских изделий. Особенно это связывает руки при использовании аддитивных технологий в государственных клиниках. С материалами обстановка также непростая. Например, для тех же материалов, использование которых в Европе не требует регистрации, у нас необходимо внесение в классификатор Росздравнадзора и регистрация. Такая же ситуация с материалами для 3D-печати, даже если это вспомогательные материалы.

3D-печать в создании костнозамещающих имплантатов

Еще один доклад, отражающий тенденции и статистику развития в России целого направления, пред-

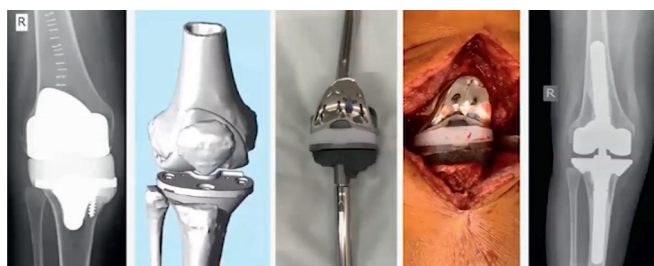
ставил в видеоформате Роман Горбатов, к.м.н., доцент кафедры травматологии, ортопедии и нейрохирургии им. М. В. Колокольцева, руководитель лаборатории аддитивных технологий ФГБОУ ВО «Приволжский медицинский университет» Минздрава России (ФГБОУ ВО «ПИМУ»). Привожу некоторые данные.

Изделия медицинского назначения занимают 16% мирового рынка аддитивных технологий и 15% российского рынка (<https://delprof.ru> и др.). Причем структура рынка постоянно изменяется, например, в 2018 г. максимальная доля рынка — это зубные имплантаты (34%), в 2019 г. — ортопедические имплантаты (50%). Если рассмотреть количество реализованных изделий в ортопедии и травматологии, то наибольшее количество — это имплантаты для эндопротезирования тазобедренного сустава, второе место по объему продаж — имплантаты для спинальной хирургии. По прогнозам на 2028 год это будут имплантаты для эндопротезирования коленного сустава.

С 2016 по 2021 год в России реализовано и реализуется суммарно 9 протоколов клинической апробации различных методов лечения пациентов с использованием аддитивных технологий, по которым будет пролечено 1266 пациентов. В настоящее время существуют данные по анализу уже выполненных на 1 января 2021 г. протоколов, по которым был пролечен 1231 пациент, из них травматолого-ортопедического профиля — 1183 (96%). Из них 830-ти были установлены индивидуальные имплантаты: в 66% — это имплантаты для эндопротезирования тазобедренного сустава, 18% — операции с использованием имплантатов из костнозамещающего материала, 10% — имплантаты для эндопротезирования коленного сустава, 6% — операции с использованием краниоимплантатов. Если говорить о ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России, то с 2016 по 2021 г. здесь осуществлено лечение более 700 пациентов с применением аддитивных технологий.

Важным этапом создания любого имплантата является этап компьютерного моделирования. В настоящее время имеются компьютерные программы как отечественного, так и зарубежного происхождения, которые позволяют создавать высокоточные трехмерные

Ds: нестабильность слейсера правого коленного сустава. Выполнено тотальное эндопротезирование с использованием индивидуального эндопротеза (Зыкин А.А., 2020, ПИМУ). Презентация ФГБОУ ВО «ПИМУ»



модели имплантатов. С каждым годом появляются новые материалы для 3D-печати (медицинская керамика и титановый сплав, РЕЕК, тантал и др.), а также новое оборудование, что позволяет изготавливать индивидуальные имплантаты с высокой точностью соответствия биологическому объекту. Кроме того, появляется оборудование для контроля материала, из которого изготавливаются имплантаты, а также постпечатного их исследования. В нашей стране с использованием аддитивных технологий уже изготавливают имплантаты из титана и других костнозамещающих материалов с точностью соответствия биологическому объекту более 20 мкм, прецизионные аугменты под стандартные эндопротезы, гибридные эндопротезы (титановые и костнозамещающие компоненты).

Технология создания индивидуальных имплантатов из костнозамещающих материалов включает в себя следующие этапы: создание трехмерной модели имплантата, затем матрицы, или формы для его последующего изготовления. На втором этапе на 3D-принтере осуществляется печать данной матрицы, она стерилизуется, и в стерильных условиях операционной в нее заливается костнозамещающий материал. После его отвердевания матрица разбирается, а имплантат устанавливается в область костного дефекта. По данной технологии могут изготавливаться индивидуальные спейсеры всех крупных суставов. В ФГБОУ ВО «ПИМУ» были проведены исследования и оценены отдаленные результаты лечения пациентов с использованием спейсеров, изготовленных на 3D-принтере. Доказано, что частота неудовлетворительных результатов лечения пациентов с использованием индивидуальных спейсеров ниже, чем при использовании стандартных. Также оценивались результаты лечения пациентов, которым были замещены дефекты после удаления опухоли с использованием индивидуальных имплантатов из костнозамещающих материалов (срок наблюдения: 12 месяцев). Ни у одного из пациентов не было выявлено нестабильности имплантатов, отмечено улучшение функции конечности и купирование болевого синдрома.

Также имплантаты используются для замещения дефектов черепа.

Впечатляющие кейсы

Выступления других участников демонстрировали множество реализованных проектов.

Кристина Протасова, инженер 3D-печати компании SIU System, рассказала о предлагаемых компанией промышленных принтерах, выборе материалов и возможностях 3D-печати для применения в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии. Компания SIU System является интегратором 3D-решений как в России так и в странах СНГ.

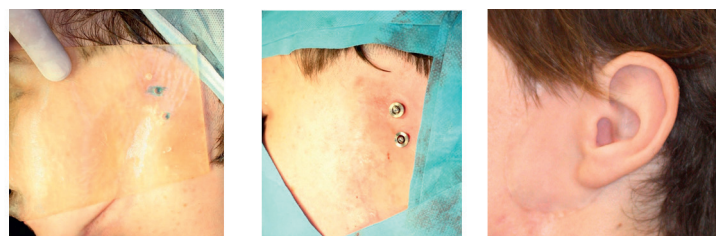
Старший научный сотрудник ИПЛИТ РАН Михаил Новиков посвятил свой доклад 3D-печати для пла-



нирования и предоперационной подготовки сложных хирургических операций. В институте имеется большой опыт сотрудничества с медиками в области челюстно-лицевой хирургии и изготовления моделей и имплантатов на базе SLA-принтера собственного производства.

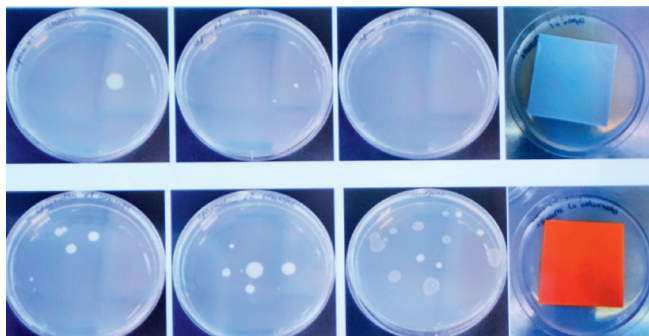
Из выступления директора компании REC Михаила Шишкина можно было узнать о многообразии российских материалов для медицины, производимых компаниями. Интересным примером стала разработка антибактериальных материалов, когда поверхность изделия обеззараживается сама. Как работает биоцид? В полимер особым способом введены частицы, имеющие биоцидный эффект. Частицы изготовлены таким образом, что имеют крайне развитую структуру, благодаря чему получается большая «действующая» поверхность. Таким образом, создается композиция, которая по медицинским свойства практически не отличается от чистого полимера и при этом имеет уверенный эффект самообеззараживания. Варианты применения материала: создание элементов вентиляционных каналов, пищевая промышленность, медицина.

Применение стереолитографического шаблона для позиционирования экзопротеза. Презентация ИПЛИТ РАН



Особенным вниманием было отмечено содержательное выступление генерального директора iGo3D Russia Константина Захватова, который продемонстрировал множество примеров использования 3D-технологий в российских клиниках. Эти примеры из области стоматологии, кардиохирургии, создания моделей для планирования хирургических операций и др. еще раз

Воздействие антибактериального материала на кишечную палочку E-coli (сверху), обычный напечатанный пластик (внизу). Срезы проведены с разницей в 1,5 часа.



подчеркнули огромные возможности для развития медицинских приложений и появление целого ряда российских медиков, готовых внедрять их в своей практике. iGo3D Russia — один из крупнейших поставщиков 3D-оборудования, расходных материалов и комплектующих в России и Евразийском таможенном союзе.

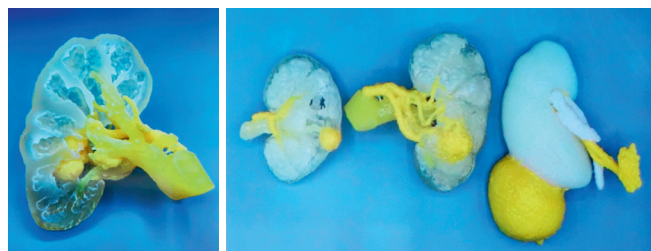
Большой обзор по технологиям и примерам внедрения подготовил Станислав Евлашин, ведущий научный сотрудник из Сколтеха. Его доклад был основан на анализе мирового опыта, представленного в многочисленных публикациях. В Сколтехе имеется большой парк 3D-принтеров, работающих по различным технологиям, и проводится широкий спектр исследований, в т.ч. медицинского направления: по изготовлению сетчатых структур, печати биоразлагаемыми материалами, печати керамикой, моделированию механических характеристик изделий и др. Совместно с партнерами было разработано собственное программное обеспечение, оригинальный алгоритм которого позволяет значительно ускорить процесс перехода от модели изделия к процессу печати, что исключительно важно для работы с пациентами клиник.

Проведению крианиопластики был посвящен видеодоклад Елены Чупузубовой из ГБПОУ НСО «Ново-



Говоря о внедрении аддитивных технологий в медицину, генеральный директор компании Z-axis отметил: «Мы видим, что отдельные компании, которые профессионально занимаются внедрением 3D-технологий в медицину, достигли уже очень высокого уровня профессионализма, но в целом процесс использования 3D-технологий в медицине в России идет довольно медленно, как, впрочем, и в других сферах бизнеса. Для большинства клиентов аддитивные технологии до сих пор представляются труднодоступными, а 3D-принтеры — дорогими и сложными в изучении и эксплуатации. Главными причинами этого я вижу недостаточную популяризацию 3D-технологий и отсутствие должного финансирования. Поэтому одной из основных задач нашей конференции является популяризация аддитивных технологий в медицине. Хотелось бы поблагодарить всех участников конференции». ■

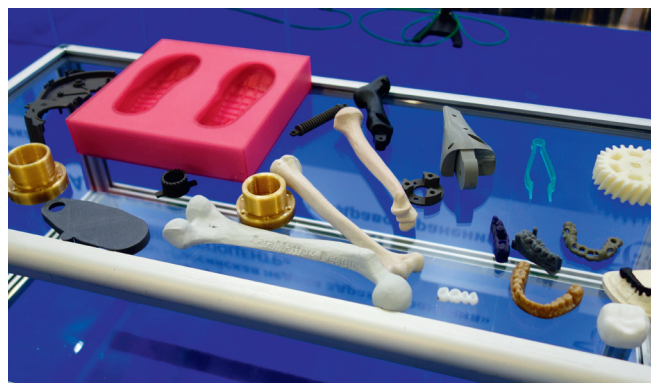
Предоперационное моделирование. Презентация iGo3D



сибирский авиационный технический колледж им. Б. С. Галуцака».

А генеральный директор компании Z-axis Сергей Кулаков традиционно рассказал о возможностях современного оборудования для печати и постобработки, поставляемого компанией, делая в примерах акцент на медицинских приложениях. Им также были представлены образцы 3D-печати различными материалами, включая инженерные пластики и медицинский титан, выполненные на оборудовании партнеров Z-axis по технологиям FDM, SLM, DLP, Binder Jetting и SLS. Z-axis — это компания интегратор 3D-оборудования с двенадцатилетним опытом, работающая с большим кругом поставщиков «умных» 3D-принтеров, в т.ч. и профессиональных.

Образцы 3D-печати разными материалами. Фото: Z-axis



3D-печать неоксидных керамических материалов для космоса

<https://siusystem.ru/>

В рамках работы международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее», проходившей в октябре 2021 г. на площадке Всероссийского НИИ авиационных материалов, старший инженер компании SIU System Илья Кононыхин выступил с докладом по теме «3DCERAM. 3D-печать неоксидных керамических материалов для применений в космосе». Акцент в выступлении делался на материалы, интересные космонавтам, в частности, на нитрид кремния.

3DCERAM

В авиационно-космическом секторе наблюдается повышенный интерес к использованию аддитивных методик. Крупнейшие мировые корпорации проводят широкий спектр НИОКР в данной сфере. Уже функционируют прототипы изделий, начат серийный выпуск деталей, прогнозируется расширение направлений их использования. В частности, в космосе необходимы крупные объекты из керамики, а 3DCERAM может такие предметы изготавливать.

Французская компания 3DCERAM занимается разработкой и изготовлением керамических 3D-принтеров, предназначенных для промышленного использования, а также расходных материалов к ним. Оборудование 3DCERAM работает по SLA-технологии, состоящей из трех этапов:

- подготовительный (создание CAD-файла, его экспорт в SLT-формат и раслаивание);
- послойное построение объекта;
- постобработка (удаление связующего вещества).

Лазерная стереолитография (SLA) позволяет создавать модели необычной конфигурации и структуры, включая предметы с тонкими стенками и микроскопическими деталями. Технология обеспечивает высокую прочность готовых объектов и демонстрирует лучшие показатели точности построения. В большинстве случаев распечатанный прототип можно сразу задействовать как готовый продукт.

Оборудование компании 3DCERAM способно создавать изделия диаметром до 450 мм. Например, крупногабаритное астрономическое зеркало было выполнено по аддитивной технологии на принтере Ceramaker-3600 Ultimate.

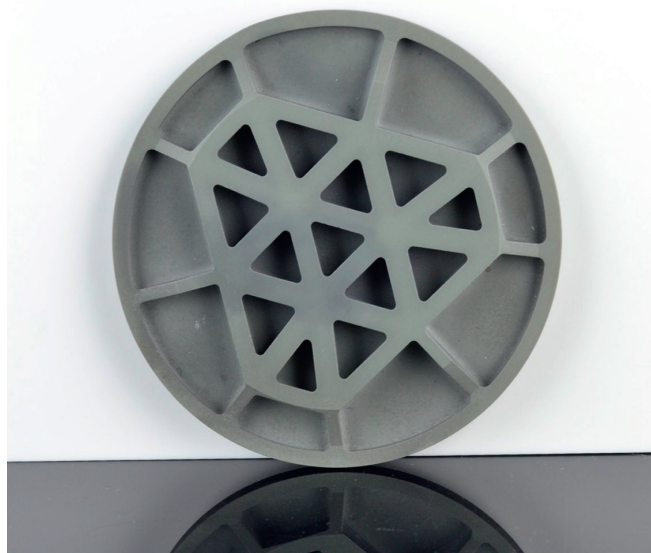
Особенности нитрида кремния

Одним из самых распространенных материалов, задействованных в аддитивной технологии, является нитрид кремния (Si_3N_4). Эта высокотехнологичная керамика уже применяется в космосе. Состав выделяется комплексом полезных для космической отрасли характеристик:

- низкий коэффициент теплового расширения (что принципиально при значительных перепадах температуры), неподверженность воздействию влаги и, как следствие, высокая стабильность структуры;
- легкий вес из-за небольшой плотности и низкого соотношения жесткости к массе;
- высокая прочность, обеспечивающая неуязвимость к повышенным нагрузкам в момент пуска, когда идут вибрации и другие экстремальные механические воздействия;
- устойчивость к разрушению и пригодность для болтовых креплений (в распечатанном объекте возможно просверлить резьбу, которая впоследствии не будет срываться).

Материал разработан и испытан совместно с компанией-заказчиком Thales Alenia Space и квали-

Оптическое зеркало из нитрида кремния, напечатанное на 3D-принтере. Фото: <https://3dceram.com/>



фицирован для дальнейших испытаний перед полетом в космос.

Применение Si_3N_4 в аддитивном производстве

Не всякий ресурс пригоден для 3D-индустрии. Некоторые составы активно задействуются в космическом секторе, но непригодны для аддитивного производства. Si_3N_4 — материал, который устойчив к разрушению, плохо поддается обработке. Но эту сложность ученые обратили себе на пользу. Благодаря техническим свойствам нитрида кремния, материал стал полезен для следующих направлений:

- выпуск конструкционных деталей, не поддающихся или плохо поддающихся механической обработке;
- производство компонентов с расширенными функциями (например, при использовании АТ были облегчены элементы с обратной выпуклостью, усовершенствованы каналы для охлаждения без ущерба для жесткости).

У компаний космической отрасли, применяющих консервативный цикл отбора материалов, существует линейка повышения технологической готовности, состоящая из следующих этапов (TRL):

- разработка идеи;
- трансформация замысла в техническую концепцию;
- тестирование проекта на выполнимость, отработка состава;
- оценка рисков производства (какая повторяемость, процент брака);
- изготовление макетного образца, демонстрирующего ключевые характеристики;
- исследование материала с позиции пригодности для принтера, определение оптимальных настроек, достижение однородности слоев;
- создание демонстратора — «боевой детали», доказывающей, что компонент будет работать.

На сегодня нитрид кремния продемонстрировал возможность создания керамического состава для 3D-печати, доказаны его хорошие термические и механические свойства, напечатаны первые прототипы.

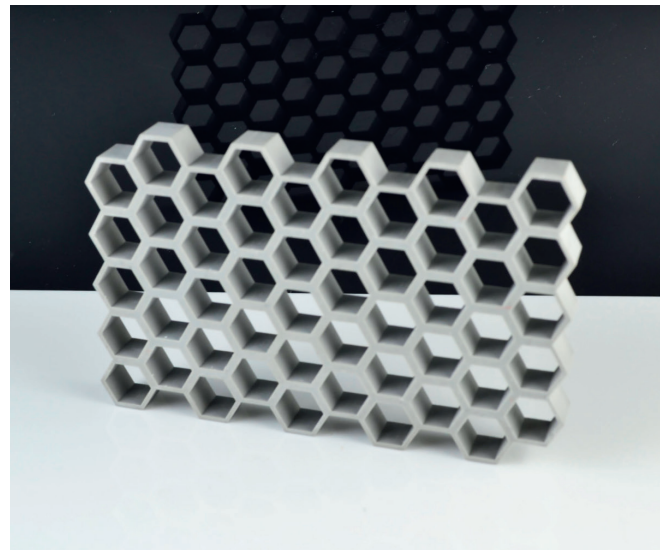
Состояние разработки

Чтобы получить необходимые показатели для DataSheet, нужны испытания. Клиентами для разработки Si_3N_4 стали франко-итальянский производитель аэрокосмической продукции Thales Alenia Space и аналог Российской академии наук — Национальный центр космических исследований (CNEC).

Когда нитрид кремния испытали — выполнили рентгенодифракционный анализ после спекания, было установлено, что материал соответствует составу, получаемому традиционным способом.

Также был сделан анализ микроструктуры Si_3N_4 , продемонстрировавший интересные результаты:

Сотовая структура из нитрида кремния, напечатанная на 3D-принтере. Фото: <https://3dceram.com/>



- отсутствие скоплений пор, крупных или бывших полостей, заполненных межкристаллитными стеклообразными фазами;

- вблизи поверхности наблюдаются лишь субмикронные поры, которые типичны для материалов из нитрида кремния и не влияют на прочность;

- форма зерен Si_3N_4 — шестигранник с обычным соотношением сторон, средний диаметр — 1,04 мкм.

Кроме того, была проведена оценка прочности. Согласно заключению экспертов, материал позволяет добиться качественной поверхности. Для определения качества внутренней структуры специалисты выполнили фрактографию — исследование рисунка разрушения. Анализ показал, что аддитивное производство не приводит к расслоению конечного объекта.

Исследования продемонстрировали, что аддитивный материал получился даже более прочным, чем тот, который уже используется заказчиком.

Перспективы

Когда состав отработан и достигнуты нужные свойства, совместно с заказчиком проводится работа по подготовке модели с учетом критичных для космического применения запросов. Задача — максимально снизить риски при аддитивном производстве, обеспечивая высокое постоянство качества и значительно снижая процент отбраковки.

3DCERAM — один из немногих поставщиков, умеющих печатать нитридом кремния. Совместно с CNEC и Thales Alenia Space компания смогла улучшить свойства материала. Первые прототипы уже прошли тестирование у заказчика. Сейчас идет работа над функциональной деталью, напечатанной из Si_3N_4 , которая действительно полетит в космос. ■

3D-печать низкотемпературным пластиком

П.А. Петров, М.С. Бронин, Б.Ю. Сапрыкин, М.С. Долгов
Московский политехнический университет, кафедра «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», petrov_p@mail.ru

Экструзия материала (material extrusion — FDM, FFF и др.) является популярной технологией в аддитивном производстве для изготовления изделий из термопластичных материалов общего применения, а также инженерных пластиков и пластиков специального применения, в том числе композиционных. Формализованная модель технологического процесса экструзионной печати представлена на рис. 1.

На этапе конструирования формируется перечень требований, которым при эксплуатации должно соответствовать изделие. При разработке технологического процесса экструзионной 3D-печати учитывается температурный интервал обработки выбранного материала, принятого для изготовления изделия.

При выполнении операции 3D-печати (рис. 1) в обрабатываемом материале происходят физические процессы, управление которыми позволяет получать бездефектное изделие, соответствующее требованиям, сформулированным конструктором.

Целью данной статьи является определение температурного диапазона экструзионной 3D-печати низкотемпературных термопластичных материалов на основе анализа их тепловых свойств. На примере тер-

мопластичных материалов, воска Wax3D и пластиков типа TPU рассматриваются термограммы, полученные методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на оборудовании компании Mettler Toledo, которые могут быть использованы для выбора температурного диапазона 3D-печати. Пример изделия, изготовленного из термопластичного воска, показан на рис. 2. Это мастер-модель для последующего изготовления одноразовой оболочковой формы по технологии литья по выплавляемой модели.

Под «низкотемпературным» рассматривается термопластичный материал, перерабатываемый по технологии экструзионной 3D-печати в диапазоне температур от 50 до 190 (200)°С в оборудовании с активной либо пассивной термокамерой. В этих условиях поддаются обработке по технологии экструзионной 3D-печати такие материалы, как термопластичные воски (например, Wax3D) [1], поликапролактон (PCL), полиэтилен низкого давления (PND, с нижней температурной границей обработки 190°С), полиуретан (TPU, с нижней температурной границей обработки 190°С), полиацеталь (POM, с нижней температурной границей 170°С).

Рис. 1. Модель технологии экструзионной 3D-печати

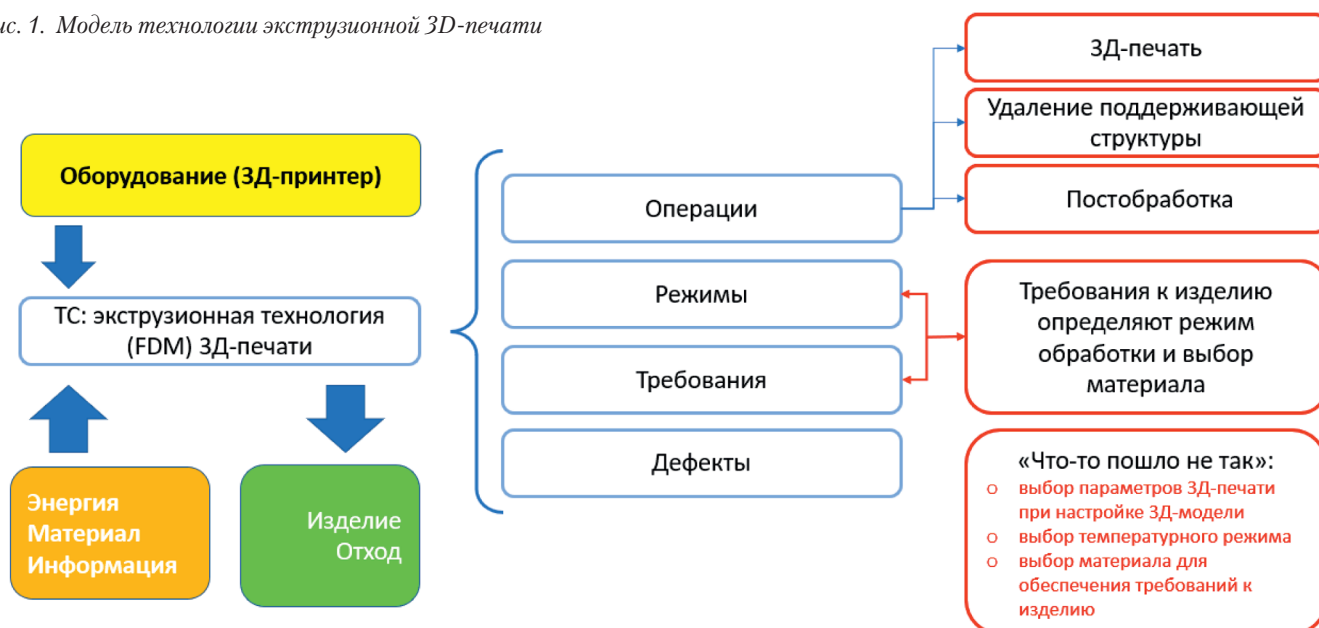
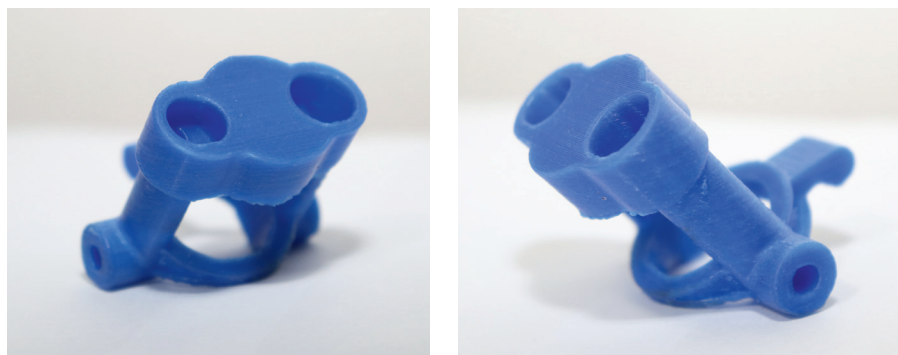


Рис. 2. Пример мастер-модели из термопластичного воска



Термопластичный материал PCL достаточно подробно описан в работах [2–4]. Отмечается, что разработанный в 1930-х годах биоразлагаемый низкотемпературный пластик, характеризующийся относительно низкой температурой плавления ($59\text{--}64^\circ\text{C}$), к началу 2000-х годов вновь получил популярность, в том числе и за счет появления аддитивных технологий.

Несколько слов о физических процессах, происходящих в термопластичном полимерном материале при экструзионной 3D-печати, и параметрах,

Рис. 3. Физические процессы, происходящие во время экструзионной 3D-печати [5]

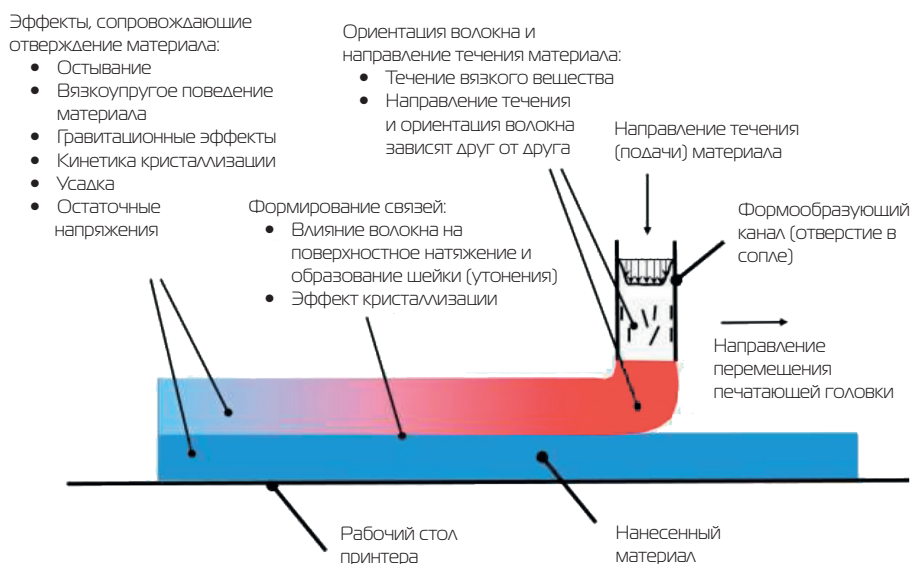
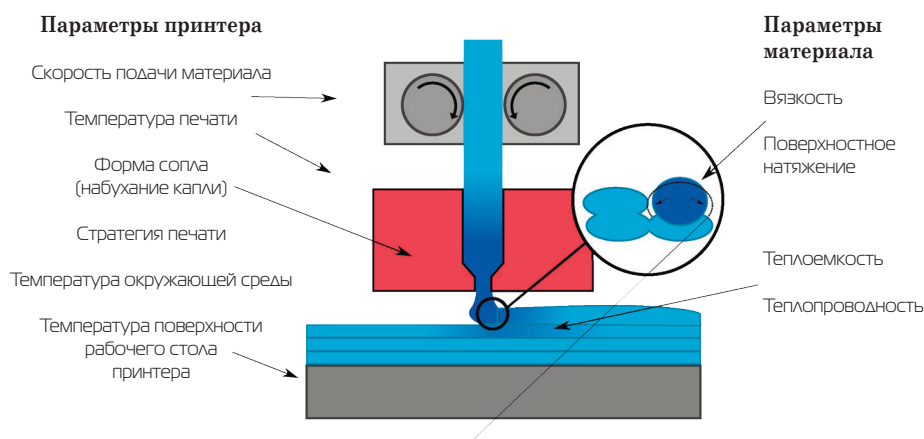


Рис. 4. Ключевые параметры, влияющие на результат экструзионной 3D-печати [6]



их определяющих. В работе [5, 6] проведен достаточно углубленный анализ физических процессов и параметров (рис. 3 и 4), их определяющих и связанных с экструзией при 3D-печати.

На рис. 4 показаны внешние параметры, оказывающие влияние на течение процесса экструзии. В то же время в самом материале проходят теплофизические превращения, приводящие к изменению физического состояния полимерного материала. Экструзионная 3D-печать, так же, как и традиционные способы переработки полимерных материалов, основана на переводе полимерного материала в вязкотекучее состояние (в расплав).

Одним из ключевых параметров экструзионной 3D-печати является температура: температура печати (нагревательного блока), температура рабочей платформы, температура окружающей среды. Условия экструзионной 3D-печати не являются изотермическими даже в случае наличия в конструкции 3D-принтера пассивной либо активной термокамеры. В работе [7] экспериментальным путем проведен замер распределения температуры в области 3D-печати, показывающий ее неравномерность (рис. 5).

Для правильного выбора режима обработки, а также формирования нужного комплекса эксплуатационных свойств материала изделия, необходимо знать особенности перехода полимера из твердого состояния в кристаллическое, стеклообразное, вязкоэластичное. Одним из методов анализа теплофизических свойств является дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК; ГОСТ Р 55134–2012 (ИСО 11357–1:2009), заключающаяся в определении разности тепловых потоков как функции температур и/или времени в процессе воздействия на исследуемый и эталонный образцы управляемой температурной программой. Тепловые потоки

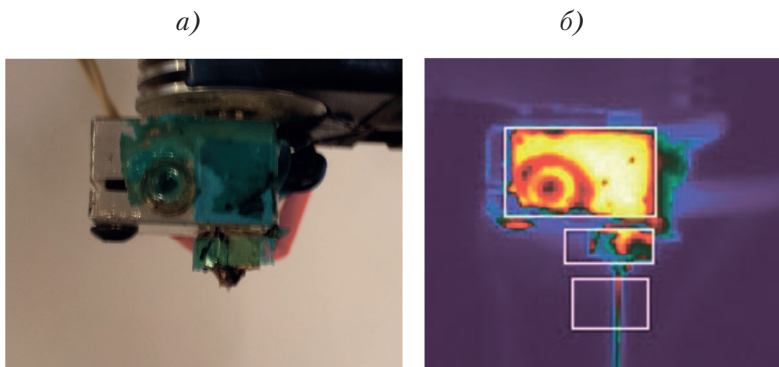


Рис. 5. Распределение температуры во время экструзионной 3D-печати [7]: а) нагревательный блок с соплом, термистором и нагревательным элементом, нагретый до температуры обработки пластиковой нити; б) распределение температуры при экструзии, замер которого выполнен с применением ИК-термокамеры

подводятся к тиглю, внутри которого расположены исследуемый и эталонный образцы. ДСК-анализ позволяет исследовать физические превращения (стеклование, плавление, кристаллизацию, полиморфные превращения), в частности, в термопластичных материалах.

Для термопластичного воска пример термограммы, полученной в результате ДСК-анализа, представлен на рис. 6; для пластика типа TPU с твердостью 55D — на рис. 7.

Из термограммы определяется температура стеклования (по второму нагреву) — 11,85°C; при температуре выше температуры стеклования и до температуры ~120,0°C термопластичный материал переходит постепенно в состояние расплава. Имеющиеся на термограмме максимумы температуры связаны с плавлением кристаллитов разного размера. Температурный диапазон 3D-печати выбирается из интервала значений от 90 до 115°C, что обусловлено завершением перехода полимерного материала в состояние расплава. Граница (минимальная и максимальная температуры) выбирается в зависимости от свойств материала изделия, например, механических свойств, которые необходимо сформировать в результате обработки. Проверка механических свойств может быть выполнена на основании проведения испытания на растяжение стандартных образцов (ГОСТ 11262–2017 и ГОСТ 33693–2015 (ISO 20753:2008)).

Из термограммы пластика типа TPU (рис. 7) определяется температура стеклования (по второму

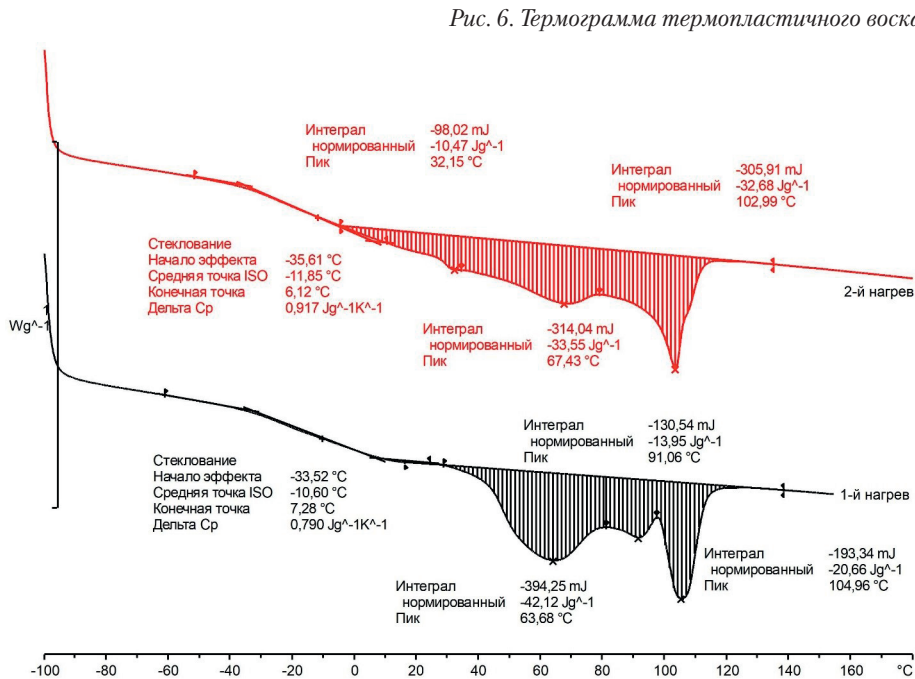


Рис. 6. Термограмма термопластичного воска

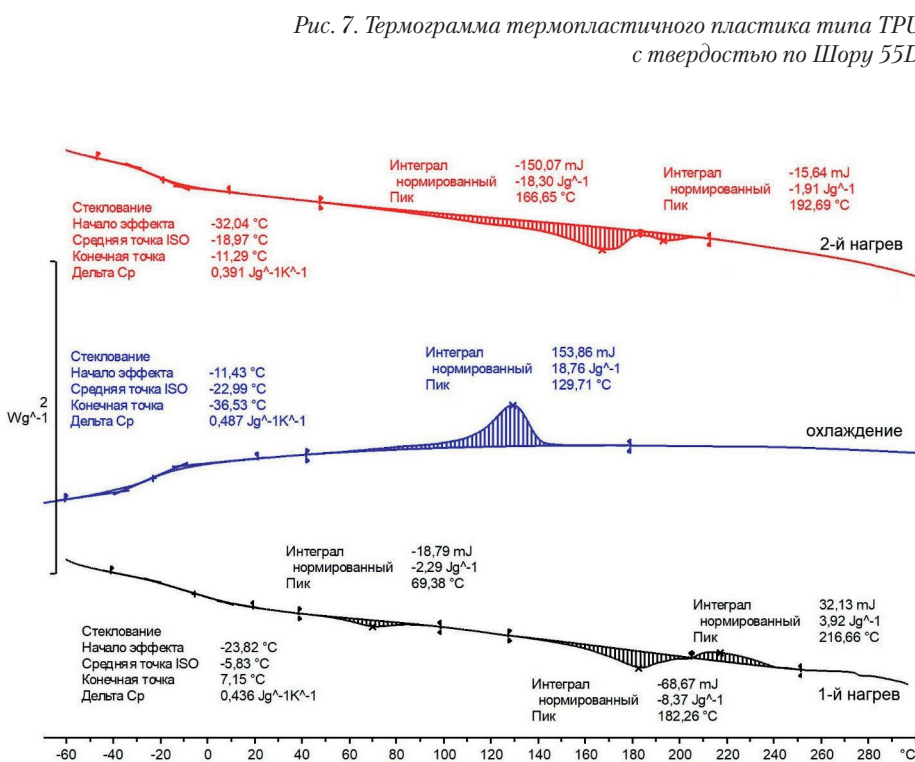


Рис. 7. Термограмма термопластичного пластика типа TPU с твердостью по Шору 55D

нагреву; T_{cr}) — 18,97°C. Температурный диапазон 3D-печати выбирается из интервала значений от 190 до 205°C, что обусловлено завершением перехода полимерного материала в состояние расплава. Граница (минимальная и максимальная температуры) выбирается так же, как и в случае термопластичного воска, в зависимости от свойств материала изделия, например, механических свойств, которые необходимо сформировать в результате 3D-печати.

Выводы и прогноз

Выполненный анализ литературы, проведенные натурные эксперименты позволяют сформулировать рекомендации о выборе температурного диапазона экструзионной 3D-печати некоторых низкотемпературных термопластичных пластиков:

— выбор температуры обработки определяется химическим составом термопластичного пластика и требуемым уровнем свойств (например, физико-механических), которые необходимо сформировать в материале в результате обработки;

— предварительный выбор температурного диапазона может быть спрогнозирован по результатам ДСК-анализа — термограмме; уточнение температурного диапазона — по результатам исследования достигнутого уровня физико-механических свойств, необходимых в соответствии с эксплуатационными требованиями к изделию;

— температура экструзионной 3D-печати, рассчитанная по термограмме, требует дополнительной проверки (подтверждения) по результатам испытания, например, испытания на растяжение. ■

Литература

1. Доступная печать восковых форм для литья // Аддитивные технологии. 2019. № 4. С. 30–33. [электронное издание] URL: <https://additiv-tech.ru/publications/dostupnaya-pechat-voskovykh-form-dlya-litya.html> (дата обращения: 10.01.2022).
2. Van Natta FJ, Hill JW, Carruthers WH. Polymerization and ring formation, caprolactone and its polymers. J Am Chem Soc 1934;56:455–9.
3. Maria Ann Woodruff, Dietmar Werner Hutmacher. The return of a forgotten polymer — Polycaprolactone in the 21st century. Progress in Polymer Science. Volume 35. Issue 10. 2010. P. 1217–1256.
4. US8859691B2 Zhang, Zhongqun. (2014). Low temperature thermoplastic material and preparing method thereof.
5. Bastian Brenken, Eduardo Barocio, Anthony Favaloro, Vlastimil Kunc, R. Byron Pipes. Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: a review. Additive Manufacturing. Volume 21. 2018. P. 1–16.
6. L. G. Blok, M. L. Longana, H. Yu, B.K.S. Woods. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. Additive Manufacturing. Volume 22. 2018. P. 176–186.
7. D. Pollard et al. Filament Temperature Dynamics in Fused Deposition Modelling and Outlook for Control / Procedia Manufacturing. 11 (2017). 536–544.

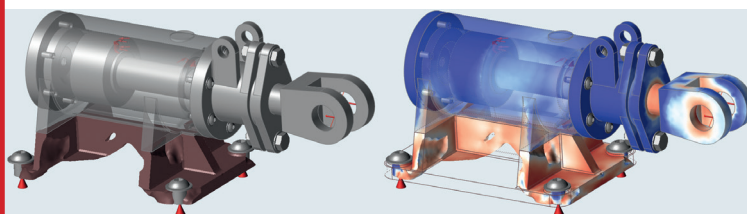


МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ

Кафедра «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета специализируется на компьютерном проектировании технологии и создании её цифрового двойника (digital twin). Задача специализации — получение наилучшего совпадения результатов моделирования с результатами натуральных экспериментов. В своей работе сотрудниками кафедры применяется современное программное обеспечение, такое как «Т-Флекс», Inventor, QForm, AutoForm, Pam-Stamp, Altair HyperWorks, solidThinking Inspire, MatLab, Abaqus, Comsol и другое.

ОСНОВНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТОК КАФЕДРЫ ЯВЛЯЮТСЯ:

- листовая и объёмная штамповка, выполняющаяся в холодном, полугорячем (тёплом) или горячем состоянии материала, процессы метизного производства;
- прокатка и профилирование;
- специальные процессы штамповки (с кручением, упругой средой, в условиях сверхпластичности, изотермическая, электромагнитная);
- механизация и автоматизация участковковки, штамповки и прокатки, специализированные мехатронные системы;
- аддитивные технологии и топологическая оптимизация для разработки гибридных изделий и штамповой оснастки;
- исследование свойств материалов для аддитивных технологий;



- повышение стойкости штамповой оснастки;
- машинное зрение и оптическое сканирование;
- кузнечно-штамповочное оборудование (молоты, прессы, сервопрессы);
- реологическое описание течения материалов и разработка математических моделей для сталей, цветных сплавов и композиционных материалов;
- трибологические особенности протекания процессов, выбор смазочных материалов и контактных пар трения.

КАФЕДРОЙ ВЕДЁТСЯ ПОДГОТОВКА КАДРОВ ПО СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ПРОГРАММАМ:

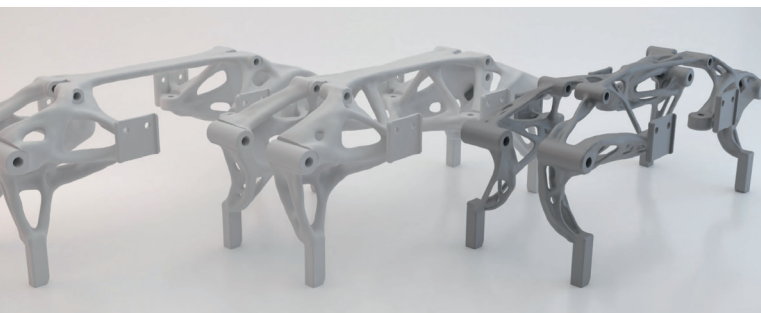
- «Машины и технологии обработки материалов давлением» (очное, бакалавриат, 15.03.01 Машиностроение);
- «Аддитивные технологии» (очное, бакалавриат, 27.03.05 Инноватика);
- «Цифровые технологии аддитивного производства и обработки давлением» (очное, магистратура, 15.04.01 Машиностроение).



Контактная информация:
115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 16
Тел.: +7/495/ 223-05-23, доб. 2344,
e-mail: omd.at@mospolytech.ru
Сайт: <https://old.mospolytech.ru/index.php?id=883>

Изготовление облегченных конструкций для упаковочного производства

Упаковочное производство относится к числу высокоавтоматизированных, поэтому для того, чтобы сделать процесс упаковки товаров по возможности более быстрым и безопасным, в первую очередь стараются уменьшить вес разрабатываемого оборудования.



Чем легче инструменты захвата, тем более эффективно и быстро выполняются технологические процессы. Программный комплекс MSC Apex Generative Design позволяет быстро и легко создавать облегченные конструкции различных вариантов захватов.

Захват, перемещение, размещение, упаковывание — это основные задачи, выполняемые оборудованием, которое, используя высокоавтоматизированные элементы захвата и транспортировки, безопасно и надежно упаковывает изделия. Большая разница в весе, размерах и геометрической форме изделий означает, что захваты должны быть строго индивидуальны и зачастую оказываются сложной формы. Кроме того, существует требование, чтобы перемещаемые массы были как можно меньше, а сама конструкция была как можно более жесткой, что позволяет экономить энергию, обеспечивая при этом безопасную транспортировку. Это приводит к более строгим требованиям при разработке оборудования, поскольку классическое проектирование или оптимизация специфических и сложных элементов захвата особенно затратно и трудоемко.

Проблема

Производителям товаров и продавцам требуется все большее разнообразие в упаковке. В то же время возрастают требования к ее экологичности и исполь-

зуемым материалам. Все это требует более оперативного реагирования для быстрой адаптации к рыночным условиям.

Этого можно достичь только за счет быстрой разработки очень гибких высокопроизводительных упаковочных машин. Чтобы удовлетворить спрос на упаковку самых различных изделий и сократить потребление материалов и энергии, необходимы новые технологии.

Подобными требованиями руководствовалась и в компания Gerhard Schubert GmbH. Семейная компания из Крайльсхайма (Германия) предлагает инновационные упаковочные машины, обладающие интеллектом и имеющие модульную конструкцию, что дает их пользователям исключительные преимущества. Разработка нового устройства захвата и транспортировки упаковочных лотков должна также соответствовать указанным требованиям. Оптимизация с использованием классических подходов к проектированию с помощью существующего программного обеспечения не дала удовлетворительных результатов, а кроме того, потребовала больших трудозатрат при разработке. Расчет деталей захвата выявил в них наличие пиковых напряжений и недостаточную жесткость, в то время как эти характеристики захватов являются ключевыми. Чтобы получить облегченную конструкцию, требовался новый подход.

Решение

Решение могло быть найдено в совместном применении генеративного дизайна (топологической оптимизации) и аддитивных технологий. Благодаря использованию такого подхода даже сложные облегченные конструкции могут быть созданы быстро и без особых трудностей. Прикладывая незначительные усилия, можно оптимизировать разные специализированные захваты, производимые даже в небольших количествах.

Изготовление новых конструкций с помощью аддитивных технологий может быть быстро и эффективно промоделировано с помощью цифровых технологий. После чего, сложные оптимизированные формы захватов могут быть легко и точно физически изготовлены с первого раза.

MSC Apex Generative Design применялось как мощное, но простое в использовании программное обеспечение для генеративного дизайна. В этом примере в программу MSC Apex Generative Design была загружена CAD-модель с исходной геометрией.

На основе этой геометрии была создана модель для оптимизации, содержащая «замороженные» области, необходимые участки для соединения с другими элементами упаковочного оборудования, и допустимую область проектирования. В качестве материала был выбран пластик PA12. Интуитивно понятный пользовательский интерфейс программы с мощными инструментами создания и редактирования геометрии позволил менее чем за час преобразовать сложную исходную геометрию в модель для оптимизации, готовую к запуску на расчет (рис. 1). Перед тем как закончить подготовку модели и начать фактическую оптимизацию, пришлось потратить еще 15 минут, чтобы добавить граничные условия, нагрузки и задать параметры оптимизации.

Результат

Всего 18 минут потребовалось для решения задачи на сервере и создания облегченной конструкции. Столь малое время вычисления позволило проверить

несколько различных вариантов, зависящих от параметров процесса оптимизации, и выбрать наиболее подходящую конструкцию. Например, один из вариантов может оказаться наиболее легким, но его будет трудно очистить ввиду сложности его конструкции. Поэтому вначале выбираются конструкции с наиболее простой геометрией. И тем не менее полученный вариант конструкции, весящий всего 150 г, действительно легкий. В сравнении с 340 граммами исходной конструкции из того же материала PA12 наблюдается снижение веса на 56%!

Чтобы обеспечить дополнительную жесткость в особых случаях нагружения, заказчик попросил добавить в средней части поперечные распорки. Эти распорки были просто вставлены в оптимизированную конструкцию в нужном месте с помощью инструмента для работы с геометрией в MSC Apex Generative Design. Полученная таким образом новая конструкция была снова обработана алгоритмом оптимизации за несколько итераций для создания ровных соединений и плавных переходов (рис. 2). Важный момент: несмотря на дополнительные распорки, вес практически не изменился: алгоритм аккуратно установил распорки на место и удалил лишний материал с других участков. В зависимости от настроек задачи оптимизации может быть получен новый локальный минимум, что дает широкий спектр вариантов кон-

Рис. 1. MSC Apex Generative Design: от импорта исходной CAD-геометрии до создания твердотельной оптимизированной CAD-модели с целью ее проверки в MSC Nastran

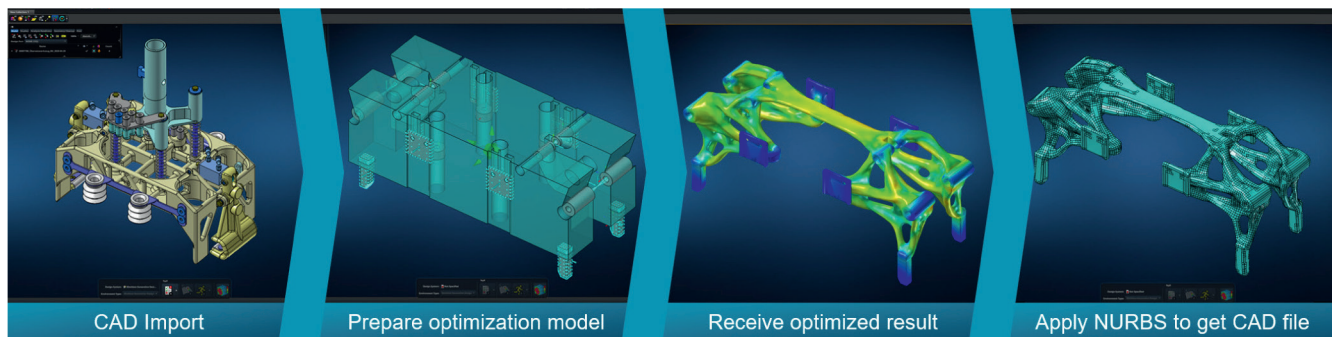
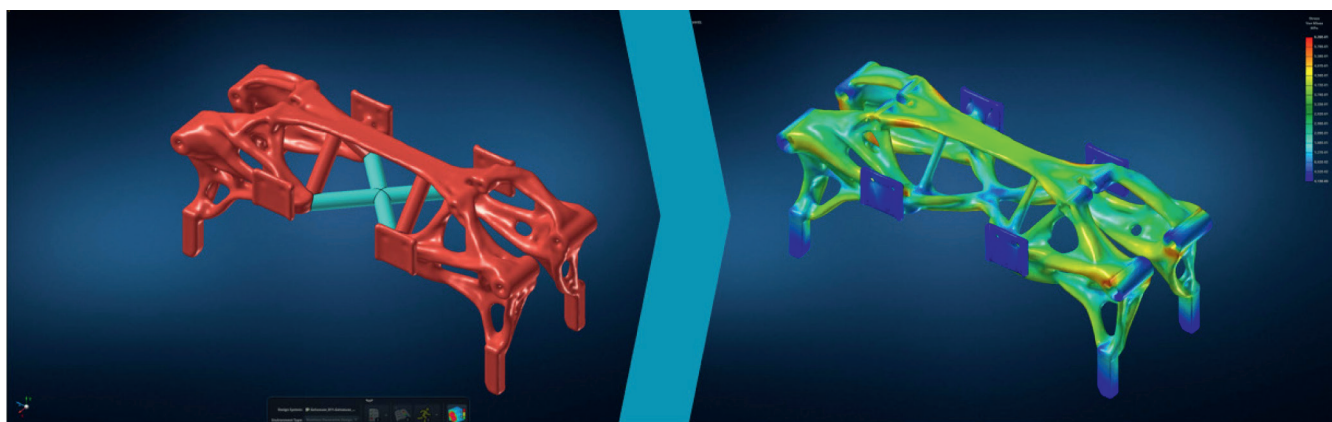


Рис. 2. Последующие изменения в конструкции могут быть легко сделаны с помощью инструментов работы с геометрией и учтены за несколько итераций оптимизации



струкций, которые можно получить с помощью генеративного дизайна.

Проверка и моделирование процесса изготовления

С помощью функции Mesh-to-CAD несколькими щелчками мыши выбранные варианты геометрии превращаются в твердотельные CAD-модели через NURBS-преобразование (рис. 3). Теперь эти модели могут быть импортированы в MSC Apex Structures и проверены с помощью хорошо известного конечно-элементного решателя MSC Nastran. Результаты моделирования показывают существенное улучшение конструкции: четырехкратное увеличение жесткости и уменьшение напряжений.

На следующем шаге моделируется и оптимизируется процесс изготовления детали из пластика (рис. 4). Для этого геометрическая модель была импортирована в Digimat-AM, помещена на рабочий стол виртуального принтера, заданы параметры изготовления, сгенерирована сетка и запущено моделирование.

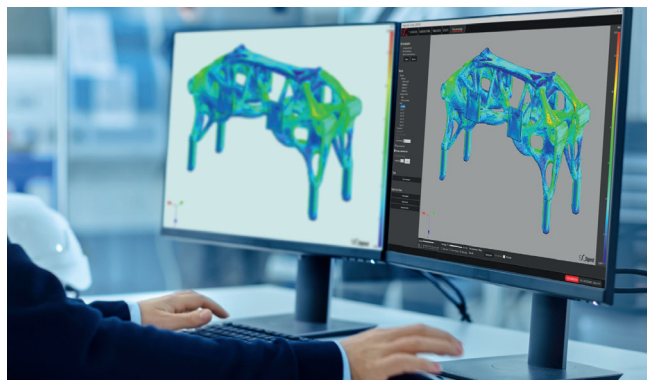
Результаты показали низкое общее коробление детали, и только две периферийные области имели большое отклонение от исходной геометрии. Эти отклонения могут быть компенсированы с помощью Digimat-AM путем создания предварительно деформированной конструкции, которая после изготовления займет требуемую правильную форму.

Компания Gerhard Schubert GmbH уже имеет оборудование для аддитивного производства деталей из металла, поэтому для тестирования методики моделирования, а также проверки работоспособности конструкции при повышенных температурах был создан вариант захвата из металла. Для этого была проведена оптимизация конструкции из алюминиевого сплава. В связи с тем, что габариты захвата оказались больше рабочего пространства камеры существующего принтера, пришлось разделить конструкцию по верх-

Рис. 3. Даже для сложной геометрии можно простым нажатием кнопки с помощью NURBS-преобразования получить твердотельную CAD-модель



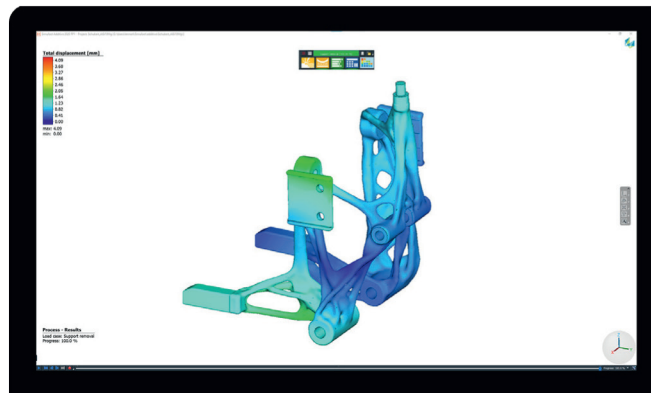
Рис. 4. Моделирование процесса изготовления пластиковых деталей с помощью аддитивных технологий позволяет избежать излишнего коробления для достижения максимальной точности работы захватов



ней стойке. Кроме этого, потребовалось также добавить соединительный фланец для сборки двух частей в единую конструкцию. Используя геометрические инструменты MSC Apex Generative Design, фланцы были созданы на месте стыка и гладко подсоединены к основной геометрии за нескольких итераций оптимизации. После этого процесс изготовления конструкции, которая состоит из двух частей, можно промоделировать с помощью Simufact Additive (рис. 5). Обе части захвата располагались так, чтобы они уместились в камере виртуального принтера. Программа выполнила расчет и создала все необходимые поддерживающие структуры, построила сетку и промоделировала процесс изготовления с выбранными технологическими параметрами. Результаты моделирования показали коробление.

Для минимизации этого коробления в программе можно было получить скомпенсированную геометрию детали.

Рис. 5. С помощью Simufact Additive можно предварительно промоделировать процесс изготовления захвата из металла. Таким образом, можно оптимизировать расположение детали в камере, конструкцию поддержек и параметры процесса изготовления, а также избежать большого коробления и разрушения при изготовлении



Анализ детали по результатам компьютерной томографии

Деталь была сделана из алюминия и после изготовления исследована средствами неразрушающего контроля с использованием компьютерного томографа. Для анализа данных компьютерной томографии (КТ) использовалось программное обеспечение VGSTUDIO MAX. Чтобы наглядно увидеть любые отклонения, в этой программе можно сравнить подробное цифровое изображение изготовленной детали с исходными данными (CAD-моделью). Как можно видеть на рис. 6, в результате изготовления возникло небольшое отклонение на ножках детали, кроме того, на сканированном изображении (увеличенном для наглядности) в них также можно разглядеть поры (рис. 7). Анализ отклонений и толщины материала (рис. 6) показывает, что деталь в целом имеет относительно ровный цвет. Отклонение на панелях обусловлено последующим ручным добавлением логотипа.

Отклонения на детали наружу можно без особого труда удалить фрезерованием. Почти равномерный зеленый цвет, отображающий толщину стенок, свидетельствует об отличном однородном распределении материала, что необходимо для успешного изготовления детали с помощью аддитивных технологий.

Заключение

Весь спектр возможностей MSC Apex Generative Design и других решений MSC Software для аддитивных технологий был продемонстрирован при разработке упаковочного оборудования. Помимо мощных функций импорта CAD-моделей встроенные инстру-

Рис. 6. Отклонение детали от требуемой, которая определяется задаваемой CAD-моделью (слева), и отклонение толщин стенок детали (справа). Почти однородный зеленый цвет указывает на небольшое отклонение формы и равномерное распределение материала. Розовый цвет панелей — результат последующей работы с геометрией в CAD-системе для нанесения логотипов

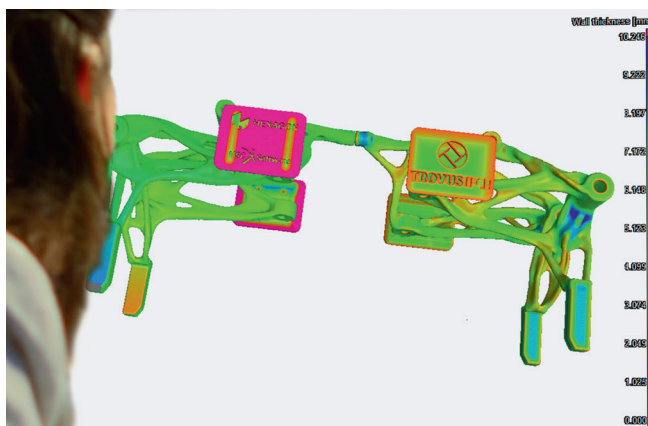
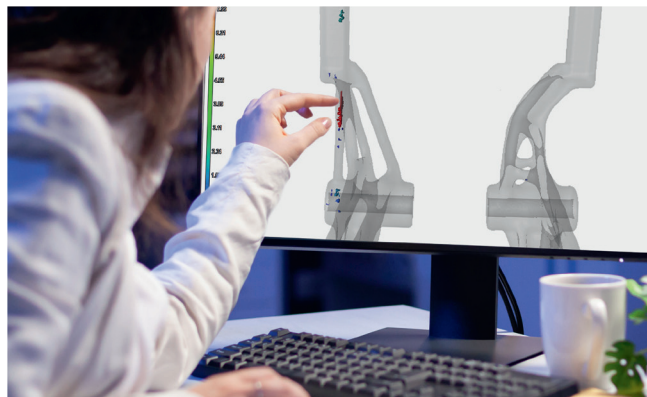


Рис. 7. Анализ результатов КТ в VGSTUDIO MAX показывает поры внутри ножек детали, которые могут быть учтены при структурном анализе конструкции



менты работы с геометрией обеспечивают простой и прямой путь подготовки модели для оптимизации.

Высокоэффективные алгоритмы позволяют быстро провести оптимизацию и получить разные варианты конструкции. Дополнительные элементы, такие как поперечные распорки или соединительные фланцы, могут быть легко созданы и оптимальным образом вставлены в существующую конструкцию. Создание за несколько щелчков мыши с помощью NURBS-преобразования твердотельной CAD-модели позволяет выполнять проверку непосредственно в MSC Nastran. Digimat-AM и Simufact Additive могут быть использованы для моделирования и оптимизации процесса изготовления детали, что будет гарантировать изготовление детали требуемой точности с первого раза. Для проверки готового изделия использовались данные сканирования, полученные с помощью компьютерной томографии. Анализ этих данных с помощью программы VGSTUDIO MAX показывает хороший результат для изготовленного захвата. Данные компьютерной томографии могут быть также использованы для цифрового проектирования, моделирования и оптимизации процесса изготовления деталей с помощью решений MSC Software. ■

Московский офис корпорации MSC Software (подразделение Hexagon) более четверти века работает на территории России, СНГ, Грузии и стран Балтии.

Предлагаемые услуги:

- Продажа программных комплексов.
- Техническая поддержка.
- Обучение специалистов.
- Сервис.

MSC Software RUS (подразделение Hexagon MI)
www.mssoftware.com/ru
marketing.russia@mssoftware.com
mssoftware.com | hexagonmi.com

Разновидности и задачи геометрической оптимизации изделий для аддитивного производства

Михаил Александрович Петров, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», факультет машиностроения, кафедра «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»



С появлением технологий послойного нанесения материалов стало возможным изготавливать особо сложные изделия, содержащие внутренние каналы, нависающие элементы, сложные отверстия и другие элементы, создания которых ранее приходилось избегать. Без наличия цифровых инструментов и современных компьютеров изготовление таких изделий просто невозможно, так как вся технология изготовления формируется на компьютере, с использованием программного обеспечения. В связи с этим стало возможным сменить подходы в проектировании изделий и обратиться за помощью при их разработке к природе и её законам, миллионами лет оттачивавшей мастерство в создании объектов флоры и фауны.

Одним из наиболее востребованных и интересных крупных направлений исследования в технике является направление по снижению веса изделия. На рис. 1 представлены две ветви, одна из которых связана с разработкой новых материалов с низкой плотностью, из которых изготовлен объект, а другая связана с геометрической оптимизацией конструкции объекта [1]. Естественно, что подходящим вариантом решения оптимизационной задачи для каждого отдельного случая будет такое решение, при котором будет выполняться построение формы по заданной целевой функции (масса, жёсткость, напряжение, частота и т.д.). Рассмотрим более подробно вторую ветку. Как видно, в неё включены три оптимизационные задачи: **топологическая**, связанная с оптимальным распределением материала по заданному объёму, **бионическая**, аналогична топологической, но имеет аналог в живой или неживой природе, и **морфогенезная**, позволяющая синтезировать форму с учётом временных изменений в материале и окружающих условиях эксплуатации, является неким аналогом ДНК, программы, по которой, согласно сегодняшним данным науки, происходит развитие всех живых организмов, формирование их внешнего облика.

В свою очередь, топологическую оптимизацию можно классифицировать более детально по целевым функциям или способам удаления материала из рассматриваемого объёма: **топографическая** (оптимизация формы грани, свойственна для повышения частоты собственных колебаний конструкции), **свободная** (оптимизация поддержек нависающих частей, свойственна для сильно выступающих и ветвящихся конструкций), **размерная** (оптимизация толщины элементов конструкции, свойственна для выбора толщины листовых конструкций), **ячеистая** (замена сплошного материала на периодическую структуру с дальним или ближним порядком расположения элементарных ячеек, например, по периодическому, фрактальному или стохастическому алгоритмам; характерно для ферменных конструкций, конструкций с высокой вибро- и шумоизоляцией, и энергопоглощающей способностью). Зачастую **топологическую оптимизацию** выделяют отдельно, подразумевая при этом оптимизацию в рамках большего объёма, из которого необходимо удалить материал, по сравнению, например, с **топографической или размерной оптимизацией**.

Известная стандартная процедура по проектированию изделий

на основе результатов расчётов нашла в XXI веке симбиотическое воплощение в виде программ нового класса, которые можно перевести как программы для проектирования на основе результатов компьютерного моделирования (*Computer Aided Engineering Design, или CAED, а также simulation-driven design, performance driven design*). С их помощью стало возможным совмещение нескольких компетенций проектировщика изделия, а именно — разработка геометрии и численные расчёты. Воплощая в жизнь данный подход, мы смогли получать конструкции деталей, напоминающие по форме природные аналоги, обходить при проектировании строгие линии, образующие резкие переходы, углы, учитывать большую вариативность кривизны поверхности, реализовывать плавные, гладкие переходы между поверхностями. На первый взгляд, отражение в производственной среде должно бы найти резкий негативный отклик на такой подход, так как производственные машины не могут гарантировать проработку того

или иного оформления сопряжений поверхностей. Но это не так, потому что с развитием машиностроения происходит становление как технологий, так и новых методик. Как и у медали, у каждой новой технологической ветки есть две стороны. В современном наборе аддитивные технологии играют одну из ведущих ролей при изготовлении деталей любой сложности. Но при этом в связи с нехваткой лабораторной и экспериментальной информации для изготовления полностью функциональной детали, работающей в условиях многоциклового нагружения на протяжении нескольких лет, требуется информация как по усталостной прочности, так и по её эксплуатационным характеристикам при работе совместно с другими деталями в сборке. Получить такую информацию можно, либо основываясь на прямых экспериментах, либо на основе численного моделирования. Последний вариант требует большого количества данных, получаемых на основе экспериментов. Поэтому получение абсолютно работоспо-

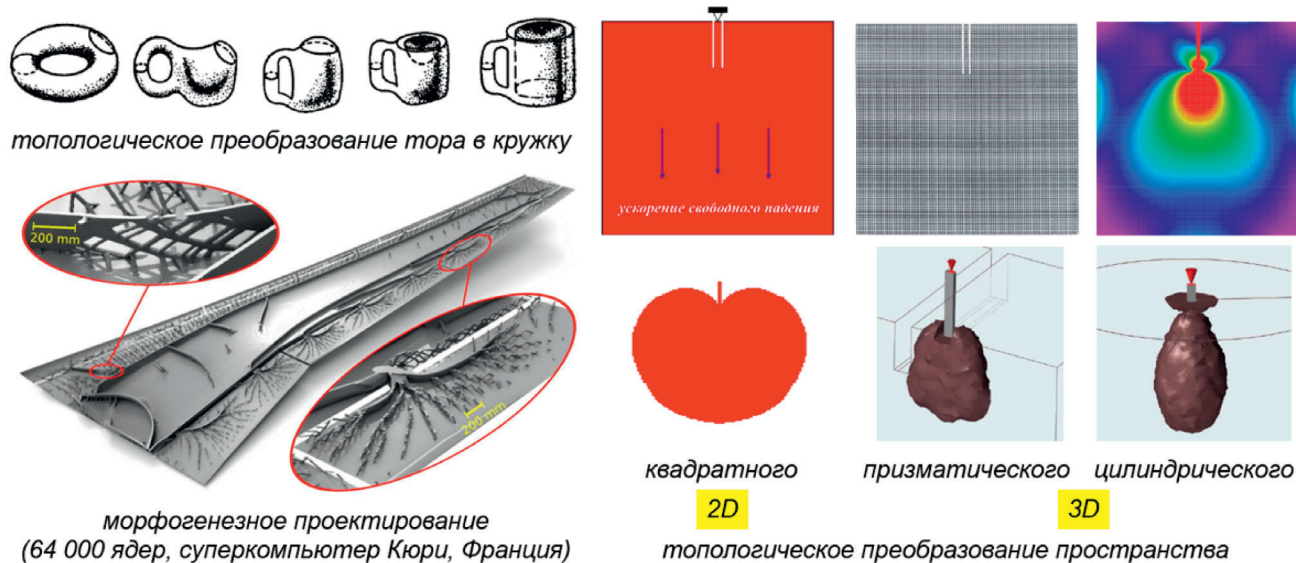
собной новой детали затруднено в связи с отсутствием информации о её итоговых эксплуатационных свойствах. Однако, это не означает, что эксплуатационные свойства не могут быть определены. Накоплен огромный опыт по разным эксплуатационным нагрузкам деталей известной конструкции, образующим так называемую схему нагружения, которая и используется при проектировании новой аддитивно-ориентированной конструкции детали.

Представим ситуацию, при которой существующая форма детали, гарантированная чертёжными размерами, должна удовлетворять повышенным прочностным требованиям по коэффициенту запаса (КЗ), рассчитанному, например, по пределу текучести. В этом случае проведение геометрической оптимизации формы может быть затруднено и результат не будет соответствовать ожиданиям. Теперь освободим базовую деталь от скруглений, фасок, отверстий для снижения веса и т.д., добавим избыточного материала, создавая таким образом больше

Рис. 1. Основные направления работ по снижению веса изделий



Рис. 2. Примеры топологической оптимизации и морфогенезного проектирования



возможностей программе для расчёта силовых полей её конструкции. При такой постановке программа, как скульптор, сама определит, что следует оставить, а что удалить. Показателем для этого служит КЗ, определяемый по разным целевым функциям (жёсткость, масса, частота, максимальное напряжение и т.д.). Сам подход к распределению материала по объёму имеет, уже упомянутый выше, вполне установившийся термин — **топологическая оптимизация**, при которой проводится поиск экстремумов целевой функции. Обращаясь к одноимённому разделу математики, стоит отметить, что топология — наука о резиновых телах, которая предполагает перераспределение материала по бесконечно упругому объёму, при этом удаление материала не подразумевается (рис. 2) [2]. Так, например, согласно допущениям, принятым в топологии, и условию неразрывности можно из множества, расположенного в форме тороидальной поверхности, получить кружку и наоборот. Но на практике реализуется другой подход, в соответствии с которым материал удаляется из тех мест, где действуют наименьшие напряжения. Это справедливо как для двухмерного, так и трёх-

мерного пространств. На примере объектов, напоминающих яблоко или грушу, на которые действует лишь ускорение свободного падения, и имеется лишь одно условие закрепления, показано, что при всех равных условиях получаемая форма зависит от геометрии избыточного, свободного объёма или его границ. Выполненное на суперкомпьютере вычисление конструкции крыла самолёта (рис. 2), работающего в режиме дозвуковых скоростей полёта, для разного угла установки крыла показало, что получившаяся геометрия непростая, имеет дискретность, а наиболее подходящим способом для изготовления такой геометрии являются аддитивные технологии [3].

Современные конструкционные материалы пока ещё не позволяют в полной мере реализовать

подход о перераспределении материала без его разрушения. Так, например, известны конструкции самолётов с изменяемой стреловидностью крыла (КИС), появившиеся лишь в середине XX века, причём для некоторых из них изменение стреловидности допускается перед взлётом, но не во время полёта. Однако для полной трансформации фюзеляжа самолёта, для создания схемы нагружения сообразно возникающим нагрузкам при полёте, например, в режиме гиперзвукового полёта, имеющихся знаний о материалах и производственных технологий явно недостаточно. На рис. 3 показан кадр из кинофильма «Полёт навигатора» (1986 года), наглядно иллюстрирующий эту идею.

В зависимости от того, в каком направлении происходит движе-

Рис. 3. Изменение формы летающего объекта согласно режиму полёта [4]



ние, т.е. от «избыточной» геометрии формы к оптимизированной (рис. 4а) или от имеющейся геометрии формы, заданной геометрическими размерами, к оптимизированной (рис. 4б), а также от того, учитывается ли влияние возможностей производственных процессов, существуют собственные имена этих подходов.

Например, на сегодняшний день формируется определение **генеративного проектирования**, которое рассматривает всестороннее влияние факторов на внешнюю геометрию изделия, включая и особенности производственного процесса. Сама получающаяся биоподобная форма детали порождает термин **бионическое проектирование**. Куда более продвинутым является термин **морфогенезное проектирование**, которое рассматривает конструкцию детали, как порождаемую не только на основании схемы нагружения, но и изменяемую на основании эксплуатационных свойств.

На рис. 5 показаны реальные ферменные конструкции архитектурных элементов железнодорожных станций, в которых применена ячеистая оптимизация по

фрактальному алгоритму. Мировую известность также приобрели такие сооружения, как Шуховская башня (г. Москва, Россия), Эйфелева башня (г. Париж, Франция) и храм Святого семейства Саграда Фамилия (г. Барселона, Испания). При сравнении с имеющимися в природе аналогами можно установить однозначную взаимосвязь, например, с ветвью соцветия капусты брокколи или кроной дерева.

На схеме рис. 6 приведена некоторая классификация задач, или методика перепроектирования изделия под технологии аддитивного производства. Вводится условие, относительно которого и выстраивается дальнейшая методика проектирования. Для деталей, являющихся прототипами серийных изделий, стоимость второстепенна, а на первом месте находятся преимущества, достигаемые в ходе эксплуатации прототипа, что является его доминантой, которая позволяет вызвать интерес к продукту, привлечь инвестиции на его промышленное освоение. Улучшение теплопроводности — один из показателей, который может быть заменён на

интересующее ключевое эксплуатационное свойство, например, сопротивление высокотемпературной ползучести. Стоимость изделия также является многопараметрической задачей. При этом на рисунке показано лишь влияние производственных издержек, непосредственно связанных с реализацией процесса, и не показано

Рис. 5. Примеры ячеистой оптимизации в архитектуре



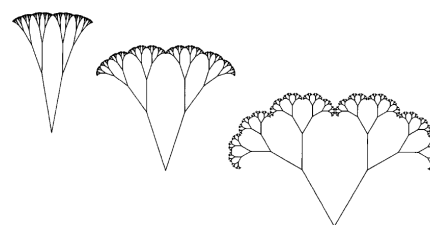
а) дебаркадер Витебского вокзала (г. Санкт-Петербург) [4]



б) навес перрона Ленинградского вокзала (г. Москва) [6]

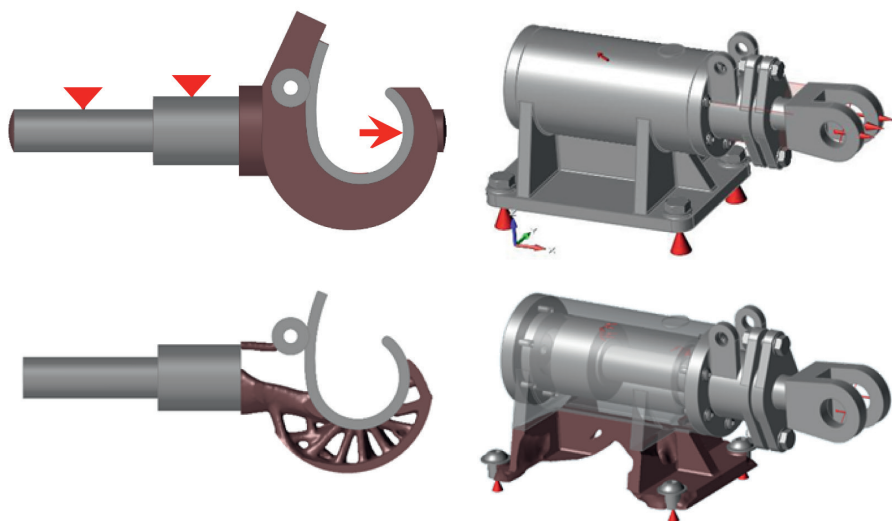


в) капуста брокколи [4]



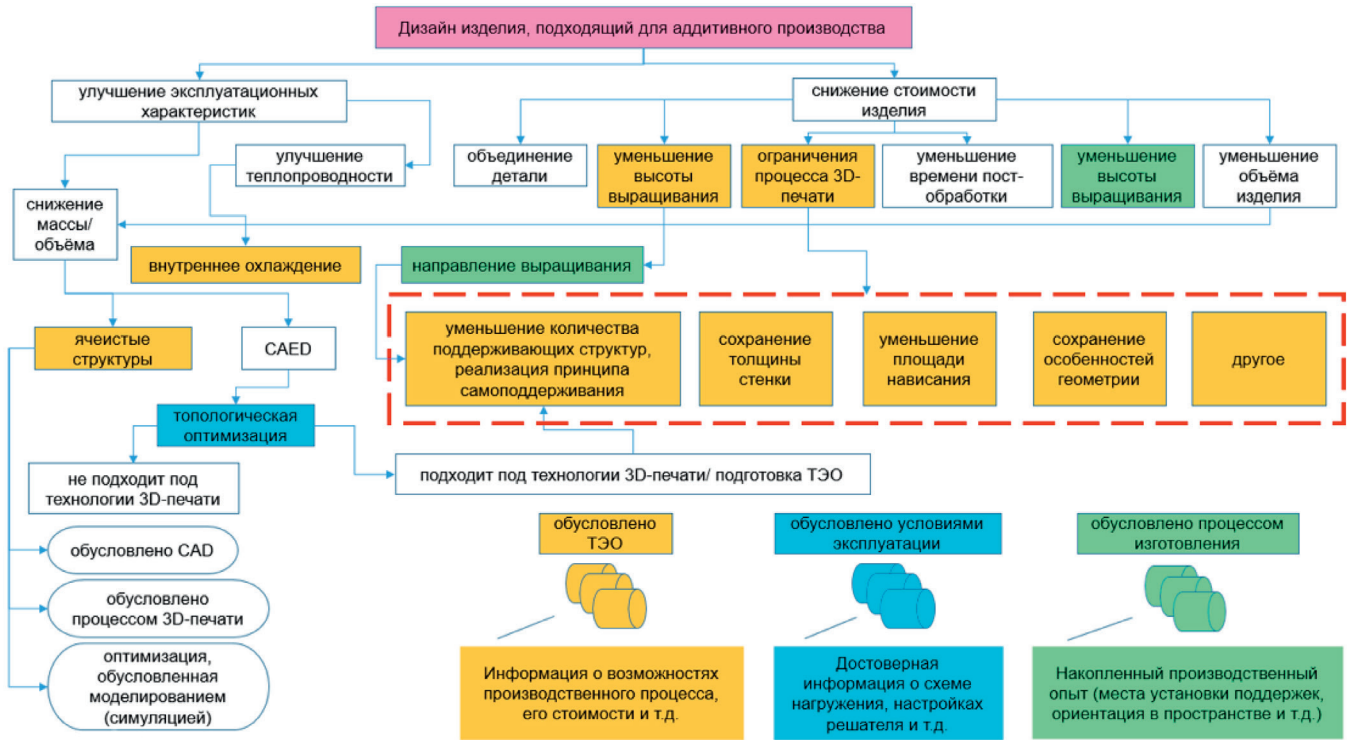
г) фрактальные зонтичные деревья и кроны [7]

Рис. 4. Примеры топологической оптимизации с указанием схем нагружения: по «избыточному» объёму (а) и по детали согласно чертежу (б)



а) буксировочный крюк грузового автомобиля, подход «от избыточного объёма», выполнено в Altair Inspire [5]

б) сборка гидроцилиндра, подход «от чертёжного объёма», выполнено в Altair Inspire [2]



внешнее воздействие, вызывающее повышение цены, например, в результате труднодоступности исходного сырья или инфляции. Реализация многих ключевых блоков, отмеченных цветом, требует наличия информации конструкторско-исследовательского характера. Согласно данным статьи [8], стоимость одного грамма детали в зависимости от её сложности после геометрической оптимизации варьируется от 3 до 7 евро/грамм при единичном производстве.

Существующее программное обеспечение позволяет получить разнообразную геометрию, но не готово со стопроцентной вероятностью гарантировать работоспособность того или иного исполнения детали. При возникновении рекламационных споров сторона-производитель будет искать причину поломки детали в неправильных условиях эксплуатации, а потребитель — в бракованном изделии, в нарушении технологического процесса производства. Как ни парадоксально, но обе стороны окажутся правы, так как

одна сторона не в полном объёме сформулировала техническое задание, в которое включены возможные отклонения от базовой схемы нагружения, а другая — выбрала вариант топологической оптимизации, в котором отклонения от базовой схемы нагружения не предусмотрены. В случае страхования продукции, как это обычно происходит на заготовительных производствах развитых промышленных стран, коэффициент страхования может быть высоким в связи с высокой степенью риска потенциально эксплуатационно бракованной детали. В таком случае применяют подходы мелкосерийного или единичного производства, позволяющие опробовать прототипы в работе и определить степень их надёжности. Однако, в этом случае речь скорее идёт об опытно-конструкторских работах (ОКР), а не о производственных сериях, о количестве изделий значительно куда более скромном. На сегодняшний день весь спектр задач, связанных с топологической оптимизацией изделия, является

опытным, требует тщательной проработки на предмет взаимозаменяемости с деталями старых конструкций. Понимание этой проблемы позволит более прогрессивно продвигаться в направлении оптимальной конструкции детали новой формы.

В современной практике конкурентную борьбу ведут несколько крупных разработчиков программного обеспечения (ПО) топологической оптимизации, основной целью которых является предоставить быстрый инструмент для проектирования большого числа вариантов исполнения конструкции детали после геометрической оптимизации. Разработчики ПО уделяют внимание дружелюбности интерфейса ПО и скорости расчётов. Топологическая оптимизация может быть проведена либо для одной детали в условиях статического или динамического нагружения, либо для нескольких деталей, включая сборки.

В таблице 1 представлены программы для проведения геоме-

трической оптимизации. Все перечисленные программные продукты являются проприетарными или коммерческими. Для академических целей многие из них предоставляются бесплатно исключительно для обучения, а не получения коммерческой выгоды. Основные типы решаемых задач: топологическая оптимизация (ТО), топографическая оптимизация (ТГО), размерная оптимизация (РО), локальная оптимизация формы (ЛКФ) и ячеистая оптимизация (ЯО), генеративное проектирование (ГП) и морфогенезное проектирование (МГП).

На рис. 7 представлены некоторые примеры результатов геометрической оптимизации машиностроительных (а, в–е), спортивных (б) и архитектурных изделий (ё, ж). Структурные элементы трансмиссии и шасси могут быть изменены и более точно спроектированы по возникающим внутри силовым линиям (рис. 7а).

Оптимизация геометрии внутренней части коллекторов двигателя внутреннего сгорания (ДВС) позволяет повысить его проходную способность на 18% и таким образом снизить износ внутренней части коллекторов, исключив области турбулентного течения, и повысить общее КПД двигателя (рис. 7г). Также КПД ДВС может быть увеличена за счёт снижения массы деталей двигателя, например, коленчатого вала (рис. 7е). Вес различных кронштейнов (рис. 7в, ё) может быть существенно снижен как за счёт топологической оптимизации, так и за счёт введения ячеистых структур. Большеразмерные изделия, такие как баскетбольная стойка (рис. 7б), структурный элемент навесного оборудования для уборочной техники (рис. 7д) или даже автодорожный мост (рис. 7ж), не оказывают принципиально никакого влияния на устойчивую работу алгоритмов геометрической оптимизации, но требуют мощных

Таблица 1. Программные продукты для проведения геометрической оптимизации и/или генеративного проектирования

Вендоры	Название ПО	Типы решаемых задач
Altair	solidThinking Inspire, Hyper Mesh (решатель OptiStruct)	ТО, ТГО, РО, ЛОФ, ЯО и ГП
MSC Software	Apex	ГП
Ansys	Discovery Live	ТО
Autodesk	Dreamcatcher, модуль Shape Generator для Inventor и Fusion 360 (решатель Nastran)	ГП
DTU	TopOpt	ТО и МГП
PTC	Creo	ГП
Siemens	NX	ГП
Dassault Systemes	3DEXperience (решатель Tosca)	ТО и ГП
nTopology	nTopology	ТО и ЯО
Rhinoceros	модуль Grasshopper	ТО и ЯО
ParaMatters	CogniCAD	ТО
3D Systems	3DXpert	ТО и ЯО
Comsol	Comsol	ТО

вычислительных систем (суперкомпьютеров).

К наиболее известным алгоритмам топологической оптимизации можно отнести алгоритмы эволюционной одно- или двухсторонней структурной оптимизации (*evolutionary structural optimization* (ESO) или *bi-directional evolutionary structural optimization* (BESO)), которые позволяют удалять материал детали, линии и поля действия приложенных нагрузок в котором отсутствуют [9, 10]. Однако из создаваемого разнообразия вариантов геометрии можно отметить и другие алгоритмы, такие как адаптивный морфогенезный алгоритм (*adaptive morphogenesis algorithm* (AMA)), алгоритм развития жилкования (*venation growth algorithm* (VGA)) и метод эмпирического проектирования (*empirical design method* (EDM)), позволяющие улучшить или, наоборот, ухудшить жёсткость тонкостенных оболочечных изделий, которые более подробно описаны в статье [11]. Наиболее хороший результат был получен по алгоритму AMA, в соответствии с которым и расход материала на рёбра жёсткости, и пере-

мещения были минимальными (рис. 8).

Выводы

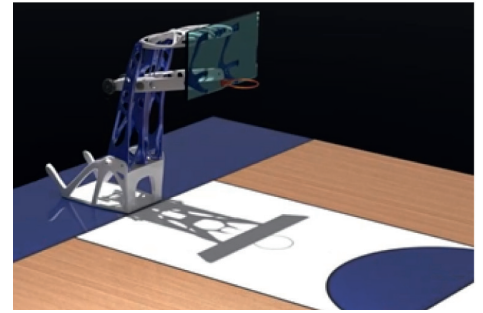
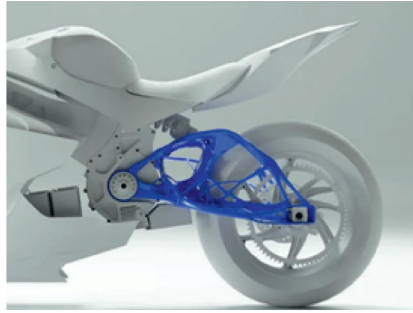
Для выбора наиболее правильного варианта исполнения детали из создаваемого разнообразия вариантов геометрии необходим помощник, например, на базе искусственного интеллекта (ИИ), который бы выделял варианты исполнения, подходящие для применения в машине по совокупности эксплуатационных характеристик всей сборки.

Геометрическая оптимизация на базе известных алгоритмов, например, ESO или BESO, является успешной и многообещающей. Она проводится для товаров с высокой добавленной стоимостью, аэрокосмического сектора, кораблестроения и других, но постепенно распространяется и на более доступные гражданские направления, например, спортивную экипировку и инвентарь, автомобилестроение, сельское хозяйство и т.д., что позволяет сделать жизнь людей более комфортной. ■

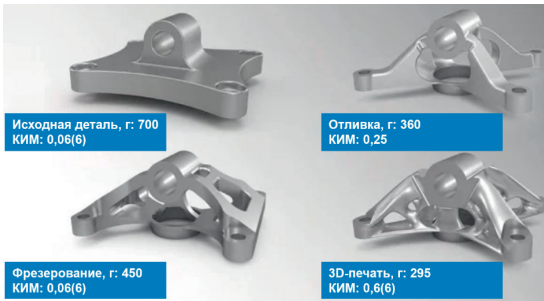
Рис. 7. Примеры геометрической оптимизации



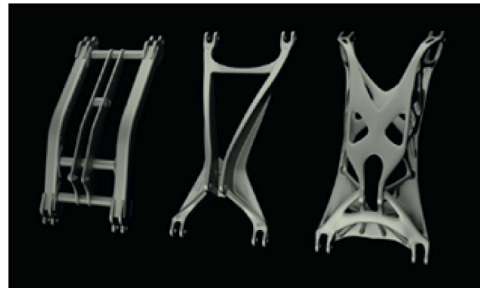
а) диск колеса микроавтобуса VW (слева) и задняя вилка мотоцикла (справа), выполнено в Autodesk Fusion 360 [12]



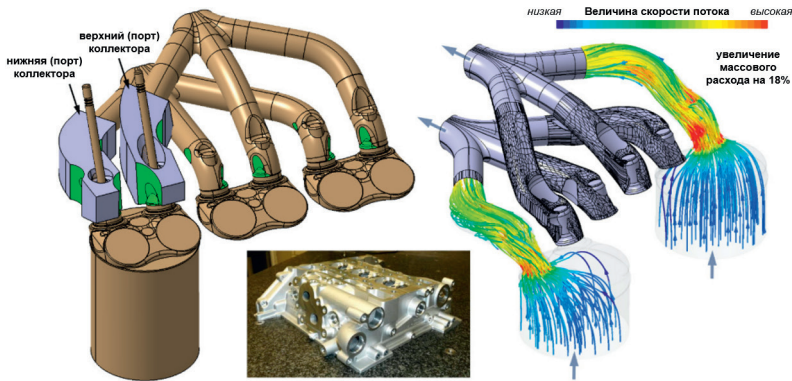
б) баскетбольная стойка, выполнено в Altair OptiStruct/Inspire [13]



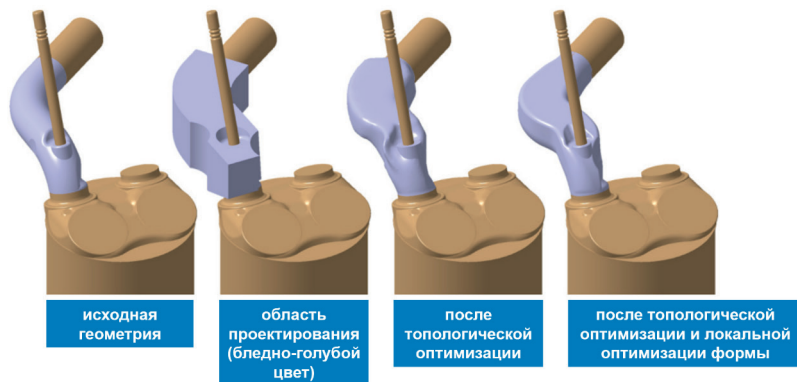
в) кронштейн, выполнено в Dassault Systemes 3DEXperience [14]



д) этапы изменения рамы навесного оборудования сельскохозяйственной машины (слева) и установленный элемент после изготовления по второму варианту (справа), выполнено в Altair OptiStruct/Inspire совместно с компанией Amazone [16]



е) коленчатый вал ДВС, разработанный инженерами компании Honda, выполнено компаниями Autodesk и Honda [17]



г) усовершенствование канала впускного и выпускного коллектора ДВС, выполнено в Dassault Systemes 3DEXperience [15]



ё) архитектурный элемент после геометрической оптимизации, выполнено в Altair OptiStruct и Materialize совместно с компанией Renishaw [18]

Рис. 7. Примеры геометрической оптимизации (продолжение)

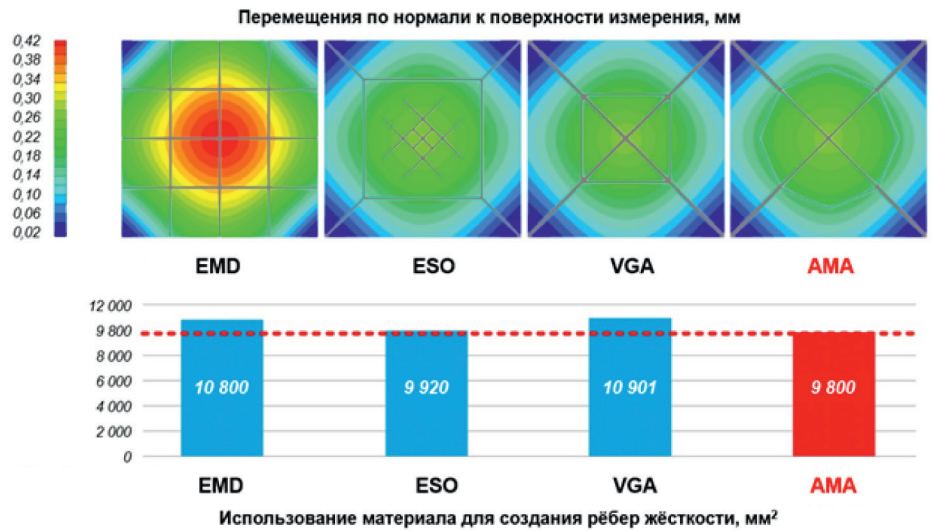


ж) геометрическая оптимизация моста «Золотые ворота», выполнено в Autodesk Fusion 360 [19]

Литература

1. М.А. Петров. Топологическая оптимизация в solid-Thinking Inspire. Часть 1: Задачи топологической оптимизации. Теоретические основы. Описание программы / Учебное пособие. М.: Московский политех, 2020. С. 153.
2. М.А. Петров. Топологическая оптимизация деталей и конструкций. Презентация доклада на конференции 3D fab + print. Москва, ЦВК «Экспоцентр». 28.01–30.01.2020. <https://3dfabprint.ru/uploads/all/4b/f8/57/4bf8575780115d596a19b8a970350c56.pdf> (дата обращения: 14.01.2022).
3. N. Aage, E. Andreassen, B.S. Lazarov, O. Sigmund. Giga-voxel computational morphogenesis for structural design. Nature. 2017. 550 (7674). Pp. 84–86. https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/63629973/GigaVoxelDesign_Nature_Letter_UnProofed_1_.pdf (дата обращения: 14.01.2022).
4. <https://ru.wikipedia.org/>
5. М.А. Петров. Примеры геометрической оптимизации поковки и инструмента. Презентация доклада на форуме «Моделирование процессов штамповки, прокатки и прессования в QForm». Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. 28.09.2021.
6. <https://www.zelenograd.ru/news/46140/> (дата обращения: 14.01.2022).
7. Б. Мандельброт. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. С. 656.
8. S. Hällgren, L. Pejryd, J. Ekengren, (Re). Design for Additive Manufacturing. Procedia CIRP. Volume 50. 2016. Pp. 246–251.
9. Y.M. Xie, G.P. Steven. Evolutionary structural optimization. Springer. 1997. P. 188.
10. M.P. Bendsøe, N. Kikuchi, Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. Computer methods in applied Mechanics and Engineering. Vol. 71. 1988. Pp. 197–224.
11. H. Liu, B. Li, Z. Yang, J. Hong. Topology optimization of

Рис. 8. Расход материала и результаты моделирования прогиба пластин



- stiffened plate/shell structures based on adaptive morphogenesis algorithm. Journal of Manufacturing Systems. Vol. 43. 2017. Pp. 375–384.
12. When Generative Design Backfires – VW’s New Wheels, <https://www.engineering.com/story/when-generative-design-backfires-vws-new-wheels> (дата обращения: 14.01.2022).
 13. A Simulation-Driven Slam Dunk: Designing the Perfect Portable Basketball Hoop. <https://www.altair.com/newsroom/articles/a-simulation-driven-slam-dunk-designing-the-perfect-portable-basketball-hoop/> (дата обращения: 14.01.2022).
 14. Generative Design on the Cloud. https://www.engineering.com/story/generative-design-on-the-cloud?e_src=relat (дата обращения: 14.01.2022).
 15. A. Hopf, CFD Topology and Shape Optimization of Ford Applications using Tosca Fluid. https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/SIMULIA/Resources-center/PDF/2018-SAoE-CFD_Topology_and_Shape_Optimization_of_Ford_Applications_using_Tosca_Fluid.pdf (дата обращения: 14.01.2022).
 16. Topology optimization and new manufacturing methods enable lightweight design in agricultural engineering. <https://www.altair.com/resource/topology-optimization-and-new-manufacturing-methods-enable-lightweight-design-in-agricultural-engineering> (дата обращения: 14.01.2022).
 17. M. Keenan. Breaking the Mold. Design Engineering, Oktober. 2020. Pp. 10–12. https://www.design-engineering.com/wp-content/uploads/2020/10/DES_OCT20_LAZ-DE.pdf (дата обращения: 14.01.2022).
 18. The Titanium Spider Bracket with Optimized Lattice Structures. <https://www.youtube.com/watch?v=WMC R6VBSV-E> (дата обращения: 14.01.2022).
 19. Generative Design Takes on the Golden Gate. https://www.engineering.com/story/generative-design-takes-on-the-golden-gate?utm_%E2%80%A6 (дата обращения: 14.01.2022).



КОМПОЗИТ-ЭКСПО

Четырнадцатая международная специализированная выставка

29 - 31 марта 2022

Россия, Москва,
ЦВК «Экспоцентр», павильон 1



Основные разделы выставки:

- Сырье для производства композитных материалов, компоненты: смолы, добавки, термопластики, углеродное волокно и т.д.
- Наполнители и модификаторы
- Стеклопластик, углепластик, графитопластик, базальтопластик, базальтовые волокна, древесно-полимерный композит (ДПК) и т.д.
- Полуфабрикаты (препреги)
- Промышленные (готовые) изделия из композитных материалов
- Технологии производства композитных материалов со специальными и заданными свойствами
- Оборудование и технологическая оснастка для производства композитных материалов
- Инструмент для обработки композитных материалов
- Измерительное и испытательное оборудование
- Сертификация, технический регламент
- Компьютерное моделирование
- Утилизация



выставка
участник
системы



независимый
выставочный
аудит

Параллельно проводится выставка:

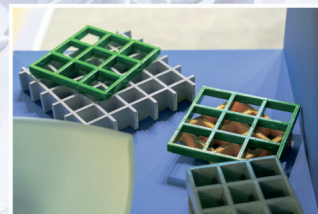
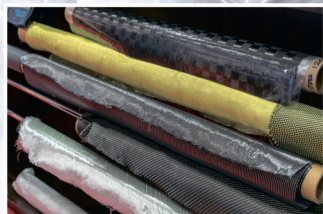


ПОЛИУРЕТАНЭКС

Тринадцатая международная специализированная выставка
www.polyurethanex.ru



Специальный
раздел:
**КЛЕИ И
ГЕРМЕТИКИ**



Информационная поддержка:



Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»
115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд,
дом 7, строение 10, офис 507 | Тел.: 8 495 988-1620
E-mail: info@composite-expo.ru | Сайт: www.composite-expo.ru

Организаторы:



YouTube youtube.com/user/compoexporusia [@compoexporus](https://twitter.com/compoexporus) [@ocompo](https://t.me/compo)

rosmould

Специализированный
раздел

3D-Tech Аддитивные
технологии и 3D-печать

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

07–09.06.2022

МВЦ «Крокус Экспо», Москва

rosmould.ru

messe frankfurt

mesago
Messe Frankfurt Group

INDUSTRY3D

аддитивные технологии и 3D-решения

Международный форум по АТ и 3D-решениям "INDUSTRY3D" – это событие в рамках деловой программы выставок "МЕТАЛЛООБРАБОТКА-2022" и "ТЕХНОФОРУМ-2022" (Российская промышленная неделя в ЦВК "Экспоцентр") для профессионалов, где ключевая тема – аддитивные и 3D-технологии в современном промышленном производстве.

23-27 МАЯ 2022

В рамках выставки
"МЕТАЛЛООБРАБОТКА-2022"

24-27 ОКТЯБРЯ 2022

В рамках Российской промышленной недели
"ТЕХНОФОРУМ-2022"

Организатор:



Поддержка:



ЦВК Экспоцентр



web.industry3d.ru

Принять участие в форуме. Подробная информация.
info@industry3d.ru | +7 (495) 481-39-44



Главное событие отрасли
в России и странах СНГ

ФОТОНИКА МИР ЛАЗЕРОВ И ОПТИКИ

29 марта – 1 апреля 2022

При поддержке:

- Европейского индустриального консорциума по фотонике (EPIC)
- Госкомитета по науке и технологиям РФ

Под патронатом ТПП РФ

16-я международная
специализированная выставка
лазерной, оптической
и оптоэлектронной техники

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»
www.photonics-expo.ru



Реклама 12+



ЛАЗЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ



ЭКСПОЦЕНТР

Проект аддитивных технологий
в промышленности в рамках
выставки интерпластика



Additive Minded

Powered by 3D Fab+Print

25 – 28 ЯНВ
2022
МОСКВА
РОССИЯ

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@gardesmach.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

