

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ АДДИТИВНЫЕ КОМПЛЕКСЫ для печати металлических изделий методом селективного лазерного сплавления

РОССИЙСКИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ



- Верхняя подача материала
- Трехосевая сканирующая система
- Мощность лазера – 500 Вт

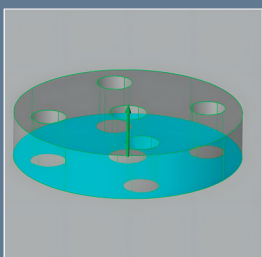


AMT-32

RU СДЕЛАНО В РОССИИ

Подробнее о линейке 3D-принтеров AMT на с. 2

AMT-16



PointShape Design программное обеспечение для обратного проектирования



Создание формообразующей оснастки методом FDM-печати для литья в холодно-твердеющие смеси



Технологии получения резьбовых соединений изделий аддитивного производства

ПОЛНОСТЬЮ УНИВЕРСАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ FL-CPM



FL-CPM – универсальная система лазерной обработки.

Модульная конструкция координатной системы и **широкий выбор** съемных навесных элементов крепления заготовок дают возможность создать Вашу **уникальную конфигурацию** станка.

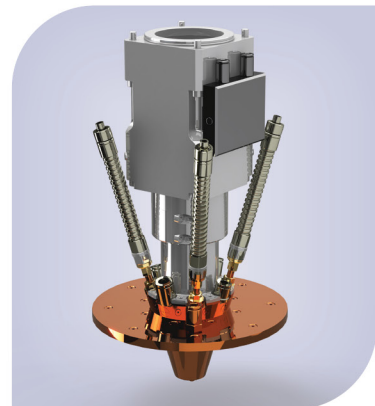
4-осевая сопловая насадка для порошковой **лазерной** **наплавки** будет **идеальным дополнением** к системе.



ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР IPG ПОЗВОЛЯЕТ СОКРАТИТЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РАСХОДЫ

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

4-осевая сопловая насадка предназначена для четырехсторонней подачи наплавляемого материала и защитного газа в область фокусировки лазерного луча. Насадка полностью совместима с головками FLW D50. 4-осевая сопловая насадка – точный и надежный инструмент с дополнительной защитой от воздействия отраженного излучения.



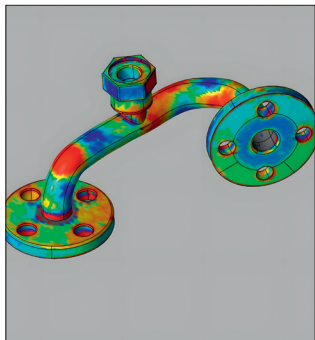
Подробнее обо всех новинках Вы можете узнать у наших консультантов по e-mail и телефону:

+7 (495) 477-72-77; sales@ntoire-polus.ru

www.fl-cpm.ru



IRE-POLUS®



8



10



12

СОДЕРЖАНИЕ

- 2 Отечественная разработка промышленных аддитивных систем AM.TECH: ставка на качество и надежность
- 6 Флагманские амбиции «Лазерных систем»
- 8 PointShape Design – программное обеспечение для обратного проектирования
- 10 Промышленные 3D-принтеры INTAMSYS – печать тугоплавкими инженерными полимерами
- 12 Аддитивные решения для автотюнинга автомобилей
- 14 Инновационные 3D-принтеры для печати литейных форм любой конфигурации
- 16 Системный подход к развитию аддитивных технологий в России
- 18 Роль Госкорпорации «Росатом» в развитии аддитивных технологий
- 21 От аддитивных технологий к аддитивному производству
- 24 Аддитивный конгресс #1
- 26 3DMIX: первая конференция по аддитивным технологиям в строительстве
- 29 Создание формообразующей оснастки методом FDM-печати для литья в холодно-твердеющие смеси
- 32 Анализ комплекса свойств фотополимерного материала для DLP/LCD аддитивной технологии
- 38 Технологии получения резьбовых соединений изделий аддитивного производства
- 42 Дефекты экструзионной 3D-печати



Тел.: 8 (4912) 51-19-41
8 (800) 444-29-41
+7 (930) 783-19-41
E-mail: 3d@3d-shop.ru

www.fdm-shop.ru
www.moldcast.ru

- Изготовление пластиковых, резиновых и металлических деталей на заказ.
- Официальный поставщик 3D-принтеров, 3D-сканеров и расходных материалов.
- 3D-печать прототипов и макетов различными технологиями.
- 3D-моделирование по образцам, чертежам и фотографиям.
- Высокоточное и художественное 3D-сканирование, обратное проектирование, реверс-инжиниринг.
- Промышленное литье деталей различными партиями.

г. Рязань, ул. Каширина, стр. 1Б, 1 подъезд, 5 этаж



Издатель ООО «ПРОМЕДИА»
директор О. Фалина

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

Экспертный совет :
Н.М. Максимов, к.т.н.
основатель и гендиректор
компании Nickatech, LLC
П.А. Петров, к.т.н.,
«Московский политех»

отдел рекламы
т/ф (499) 55-9999-8

АДРЕС: 107140, г. Москва,
ул. Верхняя Красносельская,
д. 17А, стр. 1Б, офис 306-1
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.



Отечественная разработка промышленных аддитивных систем АМ.ТЕСН: ставка на качество и надежность

АМ.ТЕСН

Аддитивные технологии (АТ) стремительно развиваются в России, занимая все более важное место в отечественном промышленном производстве. Если еще несколько лет назад 3D-печать воспринималась как экзотика, то сегодня она становится неотъемлемой частью технологических цепочек на многих предприятиях.

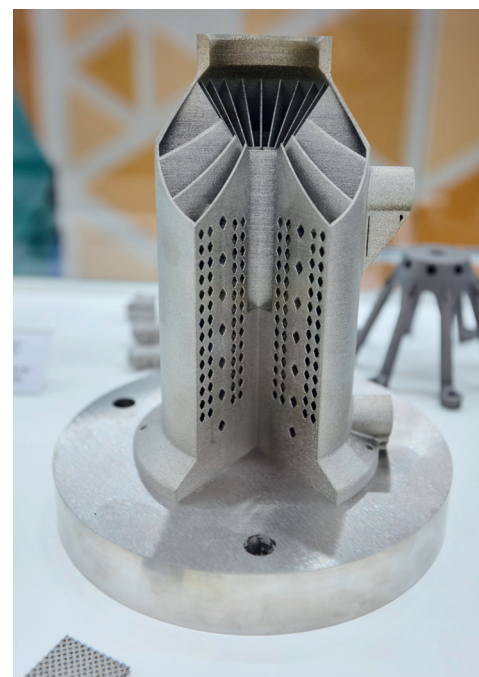
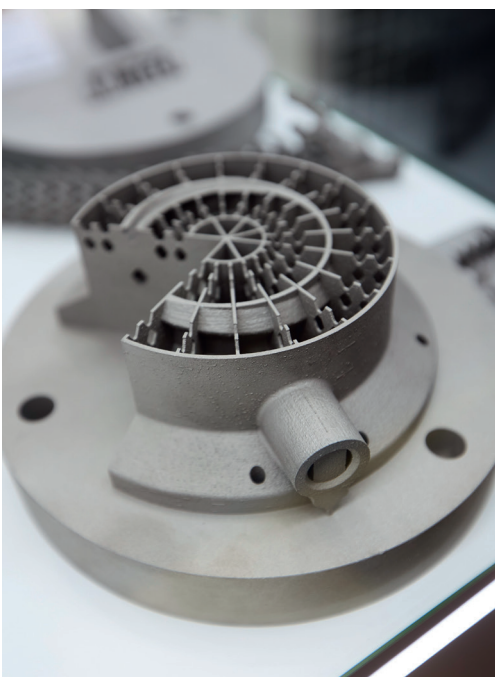
Драйвером развития АТ в России выступает государство. В 2022 году правительство РФ утвердило постановление № 1649, предусматривающее субсидирование разработки отечественного аддитивного оборудования. Одним из бенефициаров этой программы стала компания «НПО «ЗД-Интеграция», которая приступила к созданию линейки промышленных 3D-принтеров для послойного лазерного синтеза металлических порошков.

Российская компания «НПО «ЗД-Интеграция» представила на рынок новую линейку промышленных

аддитивных комплексов под брендом АМ.ТЕСН, которая уже привлекает внимание крупных отечественных производственных предприятий. Эти установки разработаны с прицелом на высокую производительность, повторяемость технологического процесса и надежность в эксплуатации.

Первенцем линейки стал малогабаритный однолазерный 3D-принтер АМТ-16, представленный публике на выставках «Металлообработка» и «Rosmould & 3D-ТЕСН». Несмотря на компактные размеры, эта машина ориентирована на промышленное применение и уже получила первые заказы от высокотехнологичных предприятий.

Ключевым преимуществом АМТ-16 является унификация с более крупными моделями — АМТ-32 и АМТ-64, которые компания планирует выпустить



в ближайшие годы. Это позволит технологам обрабатывать режимы синтеза на доступном малогабаритном принтере, а затем безболезненно масштабировать производство.

Использование сразу нескольких источников лазерного излучения для синтеза одной детали позволяет значительно ускорить процесс печати, сохраняя при этом высокое качество изготавливаемых изделий. Так, модель АМТ-32 оснащена двумя 500-ваттными волоконными лазерами, которые синхронизированы между собой специальным алгоритмом. Это решение, ранее применявшееся только в оборудовании ведущих мировых производителей, теперь доступно и российским промышленным предприятиям.

Важно, что при разработке своего оборудования «НПО «ЗД-Интеграция» делает ставку на максимальную локализацию. Так, в установках используются

отечественные лазеры. Компания также разрабатывает собственное программное обеспечение, которое в перспективе получит сертификат Минцифры РФ, подтверждающий его российское происхождение. ПО PrintMate, разработанное специалистами «НПО «ЗД-Интеграция», обладает широким функционалом, включая интеллектуальную систему контроля качества нанесения порошкового слоя. Это позволяет оператору в режиме реального времени отслеживать ход процесса печати и оперативно вмешиваться в случае возникновения каких-либо отклонений. Кроме того, PrintMate содержит базу данных с отработанными режимами печати для различных материалов, что упрощает настройку оборудования и повышает воспроизводимость технологического процесса. Программное обеспечение также реализует функции цифрового мониторинга и управления производством.



Разработчики AM.TECH уделили особое внимание и вопросам безопасности. Электрический шкаф установок собран по всем нормативам электробезопасности, а использование промышленных контроллеров обеспечивает надежную работу контура безопасности, который гарантированно сработает даже при сбоях в работе операционной системы.

Еще одна особенность аддитивных комплексов AM.TECH — высокая степень герметичности рабочей камеры и газовой системы. Это позволяет значительно экономить на расходе защитного газа (аргона) во время печати, а также обеспечивает стабильность процесса синтеза и высокое качество изготавливаемых деталей. Так, при крейсерском режиме работы потребление аргона в установках AM.TECH составляет менее 1 литра в минуту — показатель, соответствующий мировому уровню.

Таким образом, аддитивные комплексы AM.TECH сочетают в себе высокую производительность, стабильность технологического процесса, развитый функционал программного обеспечения и повышенные требования к безопасности. Все это делает их привлекательным решением для крупных российских промышленных предприятий, заинтересованных во внедрении аддитивных технологий в свои производственные цепочки.

Успешная реализация проекта «НПО «3Д-Интеграция» — яркий пример того, как государственная поддержка стимулирует развитие отечественных аддитивных технологий. Создание линейки промышленных 3D-принтеров, способных конкурировать с зарубежными аналогами, — важный шаг на пути к технологической независимости России в этой перспективной области. ■

Am.tech
+7 (495) 109 11 91
office@am.tech



21–24.10.2024

ТЕХНОФОРУМ



www.technoforum-expo.ru

**«Оборудование
и технологии
обработки
конструкционных
материалов»**

Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

Реклама



12+

65 ЭКСПОЦЕНТР

Флагманские амбиции «Лазерных систем»



Сегодня гость редакции журнала «Аддитивные технологии» — Михаил Талалаев.

Вы стали коммерческим директором компании «Лазерные системы» недавно. Какой вам видится роль вашей компании в развитии 3D-печати в России?

Прежде всего хочу отметить, что у АО «Лазерные системы» большая номенклатура выпускаемой продукции. Мы производим алкорамки и лидары, программное обеспечение для космической отрасли, а также аддитивное оборудование, на котором оказываем услуги 3D-печати. Направление 3D-печати для нас фокусное, и основную задачу компании и свою в частности вижу в том, чтобы сделать его флагманским, в том числе и по выручке. Ощутимыми темпы роста рынка 3D-печати стали с 2020 года, и в данный момент внешние факторы являются его катализатором. Расширение ареала аддитивной отрасли в России происходит как географически, так и по отраслям промышленности. В ближайшие годы я ожидаю резкий рост развития данного направления. Количество компаний, внедряющих у себя аддитивные технологии, будет увеличиваться, и я уверен, что эта тенденция будет устойчивой долгие годы. Стать лидером рынка 3D-принтинга в России по

производству оборудования и услугам печати — задача амбициозная, но достижимая.

При каких условиях 3D-принтинг может стать заменой традиционного способа производства?

Аддитивная печать — удовольствие не из дешевых и массовых, она высокотехнологична. Опытные малосерийные партии изделий, сложного геометрические детали и узлы рентабельны и востребованы на разных отраслевых рынках. А большие серии изделий простой технологической конструкции конкурентоспособнее при традиционных методах производства.

Вы назвали амбициозной целью занятие флагманской позиции на рынке. В связи с этим хотелось бы понимать, как вы формулируете ваши конкурентные преимущества?

В первую очередь, аддитивное оборудование, производимое «Лазерными системами», является российским с локализацией более 70%, включено в реестр ГИСП Минпромторга. Это максимально минимизирует риски влияния и зависимости от внешних факторов. Также основное преимущество, гордость и богатство — это наша команда высококвалифицированных специалистов и управленческого состава, способная решить любую, даже очень сложную задачу. Наши наукоемкие 3D-принтеры при своей компактности не уступают по качеству европейским, американским, азиатским





аналогам, при этом обладая более конкурентоспособной рыночной ценой, и, как следствие, выращенные изделия соответствуют всем заявленным техническим и конструкторским требованиям заказчика. Еще одно наше преимущество — собственное программное обеспечение с возможностью корректировать и менять режимы, подстраиваясь под любой металлический порошок для выращивания, а также контролировать процесс производства, в том числе в онлайн-режиме. Мы серьезно относимся к безопасности хранения данных, не используем облачные хранилища, поэтому наше ПО устанавливается на оборудование локально». Также хочу отметить входящую в стоимость нашего оборудования расширенную комплексную программу обучения, способную в полной мере развить компетенции конструкторов, технологов, операторов клиента.

С какими металлами могут работать ваши установки? Рекомендуете ли вы клиентам использование порошков определенных производителей?

Нержавеющие и жаропрочные стали, титан, алюминий, медь, стали на основе кобальт-хрома и т.д. Принтеры «Лазерных систем» могут работать с порошками любых производителей, в том числе и российских, которые имеют меньший срок поставки, а по качеству не уступают (а иногда превосходят) зарубежные порошки.

Ваше оборудование ориентировано на технологию SLM. Предполагаете ли вы создавать оборудование под другие аддитивные технологии?

На данный момент в этом нет необходимости. Мы планируем расширять модельный ряд. Рынок получит широкую линейку с различными размерами камер построения от небольших принтеров до очень крупных промышленных установок.

По каким поводам чаще всего клиенты обращаются к вашей сервисной службе?

Наши сервисные службы мобильны и работают 24/7, готовы в любой момент прийти на помощь как с запуском нового порошка и корректировкой режимов, так и с заменой вышедших из строя деталей, которые всегда есть на складе. Но такое случается крайне редко и решается в течение нескольких дней.

А какова география поставок вашего оборудования?

Вплоть до Сибири — и в планах расширение до Дальнего Востока.

Неужто китайских производителей намерены потеснить?

Даже не сомневайтесь!

Расскажите, пожалуйста, подробнее о вашем направлении услуг.

Да конечно. В этом году АО «Лазерные системы» открыло свой центр аддитивных технологий с собственным парком оборудования, который печатает заказы для различных коммерческих и государственных организаций. В том числе для окончательного принятия решения потенциального клиента о покупке 3D-принтера наше предприятие выращивает опытные партии деталей для лабораторных исследований и сравнений физико-механических свойств деталей, произведенных аддитивным методом, с аналогами, произведенными традиционными методами производства. На основании постоянно растущего портфеля заказов нам предстоит в ближайшее время нарастить парк оборудования минимум до шести единиц.

Это единичные заказы или есть серии?

Есть единичные и крупные серии, что касается заказчиков, то речь идет о крупных промышленных предприятиях.

Вы сейчас в процессе развития. Чего вы ждете в среднесрочной перспективе?

Мы намерены повысить узнаваемость нашего бренда в разных отраслях промышленности, увеличить долю рынка наших аддитивных установок и услуг 3D-принтинга на предприятиях страны, существенно нарастить рост продаж и выручку. ■

PointShape Design — программное обеспечение для обратного проектирования

Даниил Платонов, специалист инженерно-технического отдела
ООО «Инспект», www.inspect-tech.ru, info@inspectus.ru

Обратное проектирование необходимо и применяется в тех случаях, когда мы имеем физический объект (образец изделия), однако у нас отсутствует проектная документация, необходимая для получения полного представления о нём с целью дальнейшего воссоздания или модернизации. То есть результатом работы является документация, пригодная для максимально точного воссоздания изделия либо для создания на его базе новой, усовершенствованной версии.

Для эффективного решения данной задачи может быть использовано программное обеспечение PointShape Design — единственное официально поставляемое ПО на территорию Российской Федерации без каких-либо санкций. Оно включает в себя функции для 2D- и 3D-эскизирования, моделирования, а также экспорта и импорта файлов разных форматов.

Рис. 1. Выдавливание на основе эскиза

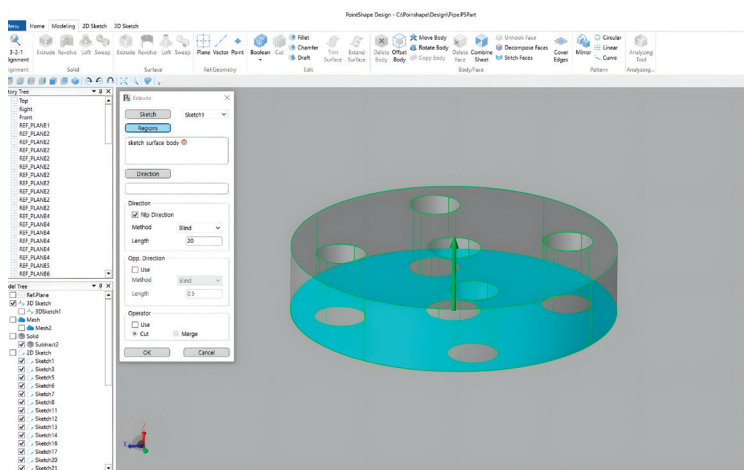
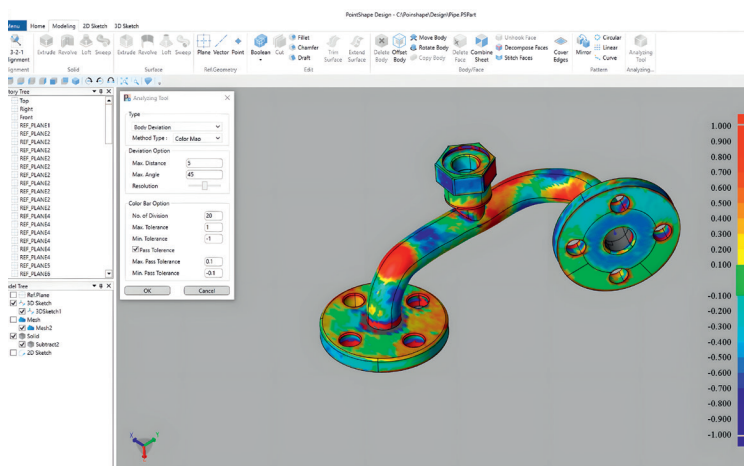


Рис. 2. Сравнение твёрдого тела и облака точек



С его помощью можно загрузить облако точек и получить на его основе твердотельную CAD-модель.

PointShape Design содержит широкий набор инструментов, который встроен в удобный и понятный интерфейс. Набор инструментов для 2D-эскизирования применяется для того, чтобы создать эскизы на основе облака точек, которые в дальнейшем преобразуются в твёрдое тело.

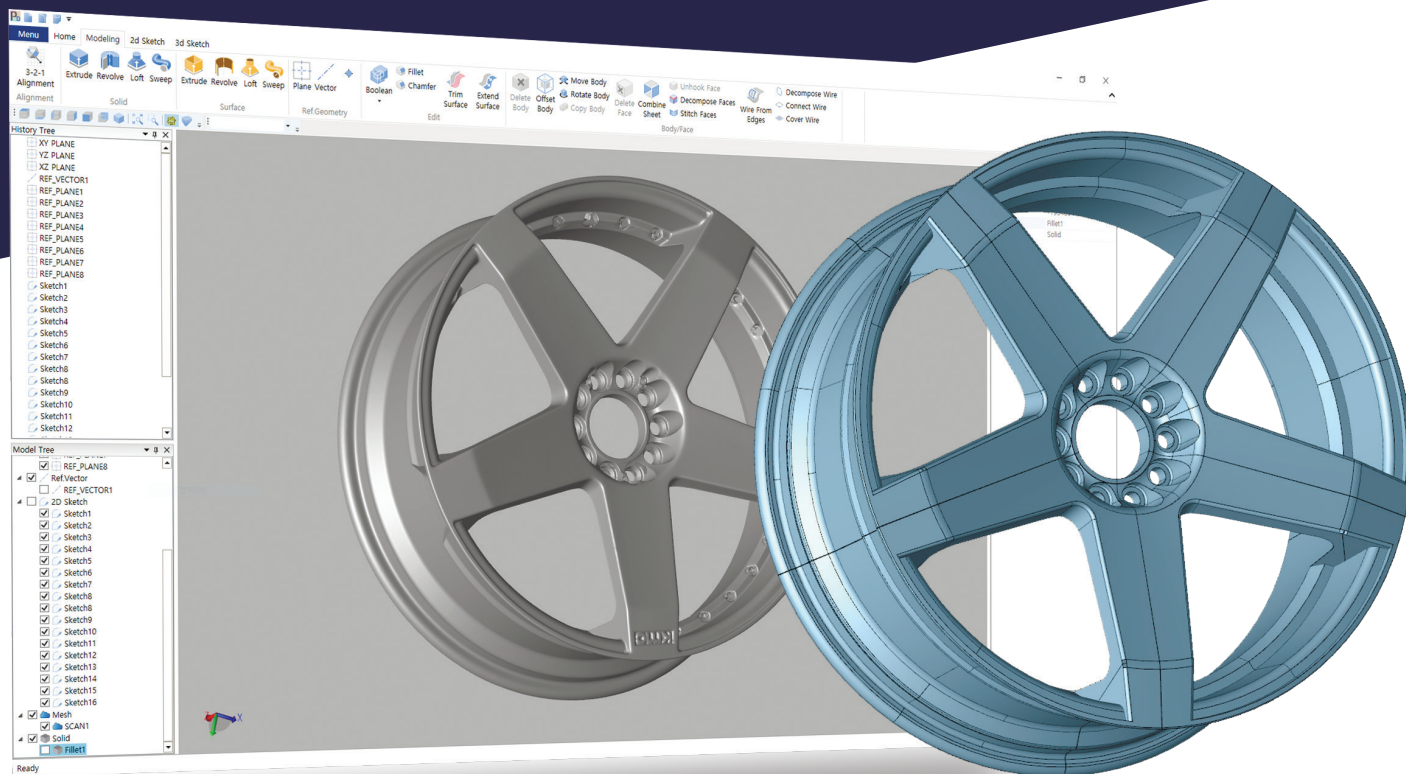
Для моделирования твёрдых тел в PointShape Design встроены различные инструменты. В зависимости от конфигурации эскиза объект может быть получен вращением, выдавливанием (рис. 1), сдвигом или лофтом. Также существуют инструменты для скругления или создания фаски. Таким образом, с помощью данного раздела имеется возможность с лёгкостью воссоздать геометрию любой сложности.

После создания твёрдого тела у пользователя PointShape Design есть возможность сравнить, насколько результат обратного проектирования отличается от изначально импортированного облака точек. При сравнении двух этих объектов мы получаем цветовую карту отклонений. Красным цветом отмечены зоны, где твёрдого тела больше, чем облака точек, синим цветом — наоборот. Диапазоном допустимых значений считаются зоны зелёного цвета (рис. 2). Значения всех этих зон можно изменять в настройках программы. Таким образом, функция сравнения позволяет с большой точностью оценить результат работы и показывает зоны, где есть отклонения от действительной модели (либо вследствие деформации изделия в процессе работы, либо вследствие некорректного обратного проектирования, при котором стоит воссоздать CAD-модель чуть лучше).

PointShape Design — это специализированная программа для обратного проектирования, которая благодаря своему функционалу позволяет легко создать твердотельную CAD-модель на основе данных 3D-сканирования. Представители компании ООО «Инспект» с радостью продемонстрируют возможности данного программного обеспечения и ответят на все интересующие вас вопросы. ■

PointShare™

Программное обеспечение для обратного проектирования и контроля геометрии



**Бесплатные демо-лицензии. Официальные поставки.
Полноценное обучение. Работа с дилерами.
Мы открыты к сотрудничеству!**

ООО «Инспект» — официальный дистрибьютор программного обеспечения PointShare на территории Российской Федерации.



Инспект

ООО «Инспект»

Москва, ул. Золотая, 11, офис 4Б13а

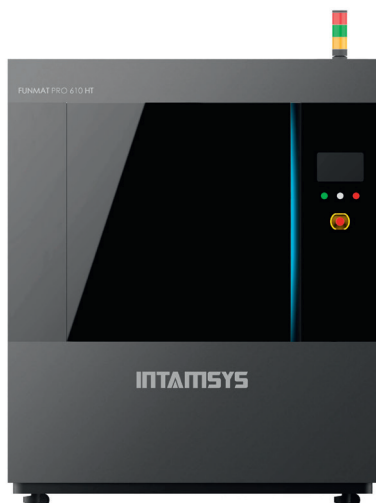
Тел.: +7 (925) 682-19-87

info@inspectus.ru

www.pointshare.online

www.inspect-tech.ru

Промышленные 3D-принтеры INTAMSYS — печать тугоплавкими инженерными полимерами



FUNMAT PRO 610 HT

610x508x508 мм – область построения
300°C – температура нагрева камеры
500°C – высокотемпературный экструдер



FUNMAT PRO 410

305x305x406 мм – область построения
90°C – температура нагрева камеры
160°C – температура нагрева стола
450°C – высокотемпературный экструдер



FUNMAT HT

260x260x260 мм – область построения
90°C – температура нагрева камеры
160°C – температура нагрева стола
450°C – высокотемпературный экструдер

Рис. 1. 3D-принтеры производства Intamsys Technologies

Благодаря высокому качеству и универсальности 3D-принтеры китайской компании Intamsys Technologies отлично зарекомендовали себя в широком спектре промышленных отраслей — от аэрокосмической и автомобильной до медицины, образования и инжиниринга.

Сегодня компания Intamsys, ведущий производитель экструзионных (FDM) 3D-принтеров,

предлагает современные аддитивные решения для печати тугоплавкими полимерами — компактные системы Funmat Pro HT, Funmat Pro 310 и промышленные решения Funmat Pro 410 и Funmat Pro 610 HT (рис. 1).

Эти индустриальные 3D-принтеры с развитым функционалом обладают рядом преимуществ, включая автоматическую юстировку платформ, точную 3D-пе-

чать с высокой повторяемостью, нагрев рабочих камер до 300°C, высокотемпературные экструдеры с прогревом хотэндов до 500°C, собственное программное обеспечение Intamsuite и широкий спектр сертифицированных материалов с отработанными настройками 3D-печати, включая полиэфиримид (PEI, Ultem), полиэфирэфиркетон (PEEK), полиэфиркетонкетон (PEKK) и другие.

Рис. 2. Корпус космического аппарата формата CubeSat, изготовленный из PEEK на 3D-принтере Intamsys Funmat 410



Рис. 3. Прототип беспилотного самолета Cavorite X5 с вертикальным взлетом и посадкой компании Horizon Aircraft оснащен 780 3D-печатными деталями из угленасыщенного композита PEEK-CF, изготовленными на 3D-принтере Intamsys Funmat Pro 410



В статье приведен краткий обзор отраслей и примеры изделий из инженерных полимеров PEEK, Ultem, PEKK, PA12 и других, напечатанных на 3D-принтерах производства Intamsys Technologies.

Аэрокосмическая промышленность

Intamsys предлагает решения для 3D-печати для аэрокосмической промышленности, позволяющие инженерам быстро создавать функциональные прототипы различных конструкций и готовые изделия мелкими сериями (рис. 2–3). С использованием возможностей 3D-печати производители могут оптимизировать конструкции деталей в сторону снижения массы, продления сроков эксплуатации и повышения надежности, сокращать сроки научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также создавать цифровые архивы с 3D-моделями запасных частей.

Автомобильная промышленность

Новозеландская компания Hartley Engines and Motorsport использует аддитивные технологии в производстве функциональных прототипов автомобильных деталей и конечных изделий (рис. 4) в краткие сроки, снижая производственные затраты.

Средства связи

Большинство настольных FDM-3D-принтеров потребительского уровня не могут печатать кронштейны и другие изделия, способные выдерживать высокие нагрузки, включая температурную, так как наиболее распространенные филаменты — PLA, ABS и другие, в основном подходящие для изготовления прототипов и неотвечественных деталей. В условиях жары, влажности и механических

нагрузок требуются более прочные пластики. Кронштейны для крепления усилителя сигнала на мачту, выполненные на 3D-принтере Intamsys Funmat Pro 410, показаны на рис. 5.

Машиностроение

В ряде европейских стран, США и Японии промышленные предприятия широко используют 3D-принтеры Intamsys Funmat в производстве единичных и мелкосерийных изделий, а также функциональных прототипов. Это возможно благодаря расходным материалам из инженерных полимеров, обладающих высокими механическими характеристиками и термо-, бензо-, масло- и кислотостойкостью. Некоторые современные полимеры близки по свойствам к алюминию, а 3D-печать изделий занимает часы, а не недели и месяцы, как в традиционном производстве металлических деталей. На рис. 6–7 показан ряд изделий от клиентов Intamsys в Германии, Италии, Франции и КНР.

Постараемся сделать эту рубрику регулярной и надеемся, что в скором будущем и российские пользователи 3D-принтеров Intamsys приоткроют завесу секретности и ознакомят уважаемую публику со своими достижениями.

Высокотемпературные промышленные FDM-3D-принтеры от Intamsys Technologies отличаются высоким качеством сборки, качественными компонентами и предназначены для круглосуточной 3D-печати с высокой повторяемостью результатов. ■

По вопросам возможностей 3D-принтеров от Intamsys Technologies и 3D-печати изделий из инженерных материалов обращайтесь за консультацией в компанию Z-axis: www.z-axis.ru

Рис. 4. 3D-печатные детали впускного коллектора, изготовленные из стеклонанополненного полиамида PA-CF на 3D-принтере Intamsys Funmat Pro HT. Композиционный материал с высокими температурами даже лучше, чем алюминий

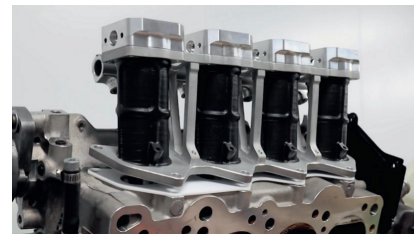


Рис. 5. Кронштейны для крепления двадцати-килограммового усилителя сигнала на мачту. Детали напечатаны на 3D-принтере Intamsys Funmat Pro 410 с использованием тугоплавкого композита PEKK-CF с температурой экструзии около 350°C. Кронштейны эксплуатируются в тропическом климате



Рис. 6. Картер насоса из PEEK, изготовленный на 3D-принтере Intamsys Funmat Pro 410



Рис. 7. Функциональный прототип шестерни из PEEK. Напечатан на 3D-принтере Intamsys Funmat Pro 410



Аддитивные решения для автотюнинга автомобилей

Компания IMPRINTA

Тел.: +7(800)222-90-20, e-mail: sales@imprinta.ru, <https://imprinta.ru/>

Использование 3D-печати в автотюнинге достаточно распространено. И это неудивительно. 3D-принтер — оптимальный станок для изготовления деталей уникальной формы в ограниченном количестве. Прототип или финишное изделие — неважно. Один станок — разные материалы.

Уже несколько лет компания GoshTurboTech использует 3D-принтер Hercules G4 Duo для тюнинга, а также сложного ремонта и обслуживания автомобилей.

Вот несколько примеров применения 3D-печати.

Популярностью пользуется ТПУ-пластик, несмотря на особенности и некоторые сложности при работе с ним. Изготовленные изделия отлично могут сочетаться со многими подкапотными элементами (рис. 1).

Рис. 1. Пример: заглушки для автомобиля Audi R8 из ТПУ-пластика



Одна из распространённых проблем автотюнинга — высокая стоимость запчастей для иномарок. Прототипирование помогает избежать ошибок при заказе деталей, связанных с неправильным выбором размера (рис. 2).

Рис. 2. Пример: воздуховод на Nissan GTR? напечатанный угленаполненным ABS-пластиком

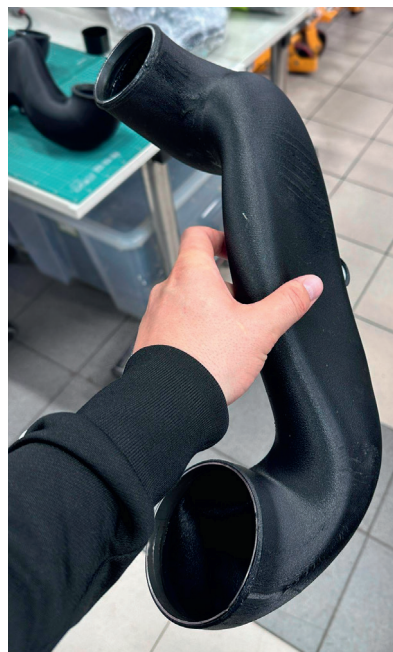


Рис. 3. Пример: воздуховод на Porsche 997, собранный по индивидуальному заказу клиента из стеклонанополненного ABS-пластика Clotho Filaments

Рис. 4. Пример: крепёж для планшетов для организации рабочей зоны



Рис. 5. 3D-принтер Hercules G4 Duo



Всё чаще детали, изготовленные традиционными способами, заменяются на напечатанные. 3D-печать также позволяет выполнять индивидуальные заказы клиентов (рис. 3).

Кстати, 3D-печать активно применяют для организации рабочего пространства. Таких примеров тоже много, и вот один из них (рис. 4).

И это только небольшая часть деталей. Больше интересных решений мы продемонстрировали в нашем выпуске на канале «Аддитивная кухня».

Для изготовления изделий компания GoshTurboTech использует 3D-принтер Hercules G4 Duo (рис. 5) и также материалы Clotho Filaments (рис. 6). ■

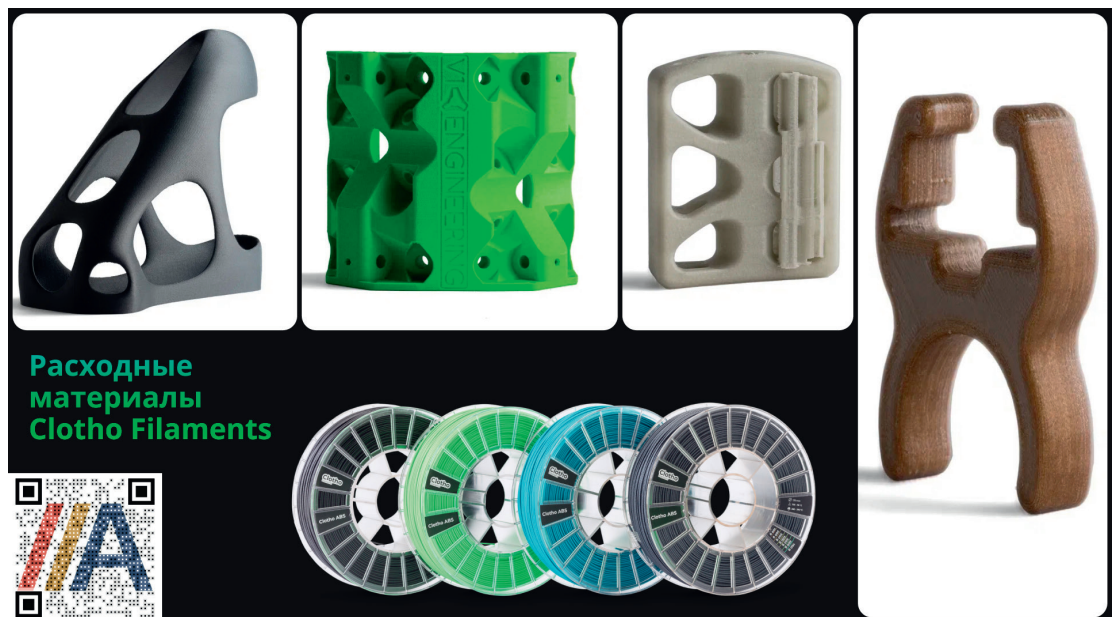


Рис. 6. Материалы Clotho Filaments

Более подробную информацию вы можете получить в выпуске «Аддитивного ликбеза» на канале «Аддитивная кухня»:

YouTube:



VK:



Dzen:



Rutube:



Инновационные 3D-принтеры для печати литейных форм любой конфигурации



«ЗМ Инжиниринг» — производитель 3D-принтеров для послойной печати литейных форм, предлагая клиентам собственные уникальные технологии, способствует развитию российской промышленности и импортозамещению.

О разработках компании и амбициозных планах рассказал исполнительный директор Александр Неткачев.

Расскажите немного о компании.

Наша компания ведет свою историю с 2012 г., когда группа разработчиков из Санкт-Петербурга объединилась, чтобы создать аддитивную установку, аналогов которой не было в России. Совместно с компанией ZIAS в 2016 г. по нашей технологии был изготовлен промышленный образец 3D-принтера для печати литейных форм. В 2019 г. был выполнен первый коммерческий контракт с ПАО «ММК». В 2021 г. — выпущена серия аддитивных установок нового поколения, которые сегодня успешно применяют в различных отраслях.

Какие 3D-принтеры производите в настоящее время и какие технологии используете?

В настоящее время мы производим принтеры с использованием двух технологий. Первая — Binder Jetting — для выпуска песчано-полимерных литейных форм, она является аналогом ХТС-процесса для литья металлов. Вторая — печать полиметилметакрилатом (PMMA), которую также используют в литейной промышленности, но для более точных и сложных изделий.

В модельном ряде оборудования компании можно выделить три типа установок: Mini, Opti и Maxi. Наиболее популярны 3D-принтеры формата Maxi, а Mini востребованы у конструкторских бюро для небольших экспериментальных работ. Оборудование предлагается под торговыми марками ZIAS BPRINT, AVP ZIAS. Технология PMMA нами запатентована, это наше уникальное предложение. Другие компании занимаются разработкой ее аналогов, пытаясь обойти наш патент.

Также разрабатываем технологию печати Metal Binder Jetting для производства сложных металлических изделий небольших размеров в качестве замены литейного производства. Эта технология является экономически более выгодным решением, позволяющим серьезно сократить сроки производства небольших металлических изделий. Подобные 3D-принтеры планируем предлагать клиентам уже в следующем году.

В чем преимущество ваших 3D-принтеров?

Наша компания полностью разработала 3D-принтеры «с нуля»: конструкцию, программное обеспечение, прошивку, алгоритмы работы. Мы обладаем доскональными знаниями о всех элементах 3D-принтера и можем наилучшим образом адаптировать их под самые различные задачи заказчика. Мы предлагаем не просто поставку оборудования «как есть», а законченное решение для получения изделия.

Другое важное преимущество — возможность сократить издержки, что было основным аргументом в пользу нашего оборудования для предприятий нефтегазовой отрасли. Производство рабочих колес с помощью наших 3D-принтеров экономически более выгодно, чем с использованием традиционной технологии.

Стоимость 3D-принтеров компании значительно ниже американских и немецких и на уровне с китайскими аналогами. Сроки изготовления оборудования составляют 4–6 месяцев, в ближайшей перспективе будем осуществлять поставки быстрее, чем китайские производители.

В каких отраслях промышленности используется ваше оборудование?

Его можно применять на всех предприятиях с литейным производством. В первую очередь — в нефтегазовой отрасли, где наши установки используют для выпуска рабочих колес. Эти изделия обладают повышенной сложностью, геометрической точностью, и изготавливать их другим методом невыгодно или очень сложно. Нефтесервисная компания «Римера-Алнас» — один из наших крупных клиентов. Также данные технологии оптимальны для автомобилестроения. Одним из ключевых клиентов нашей компании является «КАМАЗ», которому уже поставили три установки и заключили контракт на четвертую. Еще одна большая и важная отрасль — авиастроение. Наши принтеры отлично подходят для производства сложных ответственных изделий широкой номенклатуры и небольшой серийности.

К чему стремитесь в дальнейшем?

В следующем году запланирован кратный рост компании «ЗМ Инжиниринг», собираемся повысить производительность до 20 машин в год. Более массовое производство снизит стоимость оборудования. Пока 3D-принтеры мы поставляем во все регионы РФ и ближнее зарубежье, но в будущем намерены осуществить выход на рынки дальнего зарубежья. ■



Состав оборудования

Комплекс по производству песчано-полимерных форм BPrint Maxi от AVP ZIAS.

Поставленная задача

Импортозамещение комплектующих в выпускаемой продукции. Снижение брака. Снижение себестоимости и сроков выпуска продукции.

Решение

Приобретение аддитивной установки BPrint Maxi для отработки технологий и новых разработок перед запуском в серийное производство. Импортозамещение комплектующих.

Результаты

Освоение новой продукции. Запуск в производство собственных импортозамещенных комплектующих. Повышение КПД изделий. Снижение брака. Существенное снижение сроков по запуску новых разработок в серийное производство за счет оперативной отработки и своевременного внесения корректировок в конструкторскую документацию после печати и заливки тестовых партий. Запуск опытных образцов двигателей внутреннего сгорания, модификация геометрии ДВС.

Комплекс для оперативного производства СЛОЖНЫХ ОТЛИВОК



Поставленная задача

Отлить три комплекта деталей для прототипа нового авиадвигателя.

Решение

По 3D-моделям заказчика согласован сплав и поверхности для мехобработки, в течение двух недель разработана литейная технология и спроектированы 3D-модели литейных форм, оптимизированные для 3D-печати. После согласования проектов, формы были изготовлены на песчаном 3D-принтере FHZL 1200 и переданы на отливку, обрезку и закалку. От получения 3D-моделей деталей заказчика (корпус, головка блока и блок цилиндров, корпус редуктора) до отгрузки готовых отливок прошло два месяца. Это в разы быстрее и дешевле, чем изготовление прототипов традиционным способом.



Состав оборудования

Комплекс по производству песчаных литейных форм на базе 3D-принтера FHZL 1200.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РАЗВИТИЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИИ

Начало проекта в № 3'2024

Эволюция технологий 3D-печати



Отвечая на вопросы редакции журнала «Аддитивные технологии» о системном развитии аддитивных технологий в России, Павел Петров, доцент кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета, коснулся этапов их развития,

а также факторов, которые будут способствовать переходу от технологий к производству.

Как вы оцениваете уровень развития аддитивных технологий (АТ) в мире и в России?

Давайте попробуем разобраться в том, что произошло за период с 2010 года по настоящее время, 2024 год.

2010 год — начало популяризации экструзионной 3D-печати; появление на рынке аддитивных технологий новых компаний. Причем тогда мало кто мог похвастаться устойчивыми решениями по части FFF-принтеров. Монополия на рынке промышленной экструзионной печати принадлежала компании Stratasys с технологией FDM. Появлялись стартапы, предлагающие решения, подчас опережающие время, например, компания Sintermask GmbH и ее продукт — принтер Fabbster, на котором были опробованы различные технические решения: высокотемпературная печать, печать филаментом с насечками для устранения проскальзывания и повышения точности подачи материала, рабочая платформа со специальным покрытием, реагирующим на повышение температуры, и т.п. Практически все из перечисленного было реализовано в продуктах других компаний после 2014 года, года закрытия проекта Fabbster.

Фотополимерная печать в различных вариантах (технологии DLP, LCD, MJM и др.) также получила достаточно сильное развитие, и к 2024 году есть состоявшиеся примеры применения — стоматология, слухопротезирование, ювелирная промышленность, приборостроение и др.

Селективное лазерное сплавление (SLM и ее модификации) и селективное лазерное спекание (SLS),

появившиеся примерно в одно время и развивавшиеся с одинаковым темпом, начиная с 2010 года по-разному позиционируются на рынке. SLM-технология все больше ориентируется на промышленное применение в различных отраслях, появляются модификации технологии и новые компании, предлагающие свои решения. Пожалуй, пиковая активность среди производителей SLM-оборудования наблюдалась в период с 2016 по 2019 г. SLS-технология находит области применения, в которых есть востребованность в полимерных изделиях с различными эксплуатационными свойствами; патентная активность не такая высокая, как для технологии SLM и ее модификаций.

Все вышесказанное описывает вкратце ситуацию на зарубежном рынке. В РФ возрастание активности производителей оборудования и материалов приходится на период с 2016 и по настоящее время. Наиболее слабым звеном являются фотополимерные принтеры, несмотря на присутствие на рынке производителей материалов.

Какие меры могут увеличить спрос на АТ и ускорить переход от аддитивных технологий к аддитивному производству?

Переосмысление подходов к разработке технологических процессов, совмещение аддитивных технологий с традиционными технологиями производства, учет при разработке новых изделий особенностей выбора материала, применяемого в аддитивных технологиях, в сочетании друг с другом, возможно, приведут к ускорению перехода к аддитивному производству. Дополнительным фактором является подготовка молодых кадров и ускорение производства оборудования для аддитивных технологий, доступного для построения образовательного процесса подготовки.

Кто может стать движущей силой для ускоренного развития АТ в России?

Команды молодых специалистов, объединенных вокруг разработки и продвижения новых идей в области аддитивных технологий, при наличии инфраструктуры, а также мер поддержки для их продвижения. В настоящее время, например, набирает популярность программа поддержки «Студенческий стартап», реализуемая Фондом содействия инновациям. ■

Появился устойчивый спрос на аддитивное производство



Андрей Берюхов, директор бизнес-направления «Аддитивное производство» ООО «Горизонт покрытий», считает, что сейчас надо максимально использовать период, пока заказчики находятся в поиске оптимальных технологических решений с целью импортозамещения, и продвигать аддитивные технологии, отечественные материалы и оборудование.

Как вы оцениваете уровень развития АТ и рынка АТ в России?

Если отвечать на вопрос кратко, то можно сказать, что с точки зрения развития технологий 3D-печати мы прошли этап ажиотажа, когда аддитивные технологии (АТ) были скорее модным трендом, чем реальным производственным инструментом. Теперь наступает эпоха реального внедрения и освоения в рамках существующих и перспективных производственных мощностей. То есть мы переходим от периода развития аддитивных технологий к развитию направления аддитивного производства (АП). Что это означает? В стране уже сформировалась достаточно обширная инфраструктура аддитивного оборудования, материалов для 3D-печати и определенный задел компетенций в данной отрасли. При этом значительную долю во всех трех направлениях стали занимать отечественные продукты и решения. И это в том числе результат реакции на события 2022 года, когда стало понятно, насколько важен технологический суверенитет. Теперь задача участников рынка АТ/АП — осуществить переход к полноценной интеграции технологий 3D-печати в производственные процессы. И если на предыдущих этапах развития во многих случаях заказчик смотрел на АТ, как на что-то «игрушечное», то теперь появляется устойчивый спрос на услуги аддитивного производства со стороны промышленности в широком спектре применений.

Какие меры могут увеличить спрос на АТ и ускорить переход от аддитивных технологий к аддитивному производству?

Мы как участники рынка аддитивного производства ощутили устойчивое увеличение интереса к технологиям 3D-печати начиная с первой половины 2022 года. Вопрос импортозамещения стал как никогда острым, и для АП это стало окном возможностей. Теперь основная задача — максимально использовать период, пока заказ-

чики находятся в поиске оптимальных технологических решений для своих задач по импортозамещению, для оптимизации всех элементов технологической цепочки аддитивного производства (где непосредственно сама 3D-печать занимает от силы 30–40% всего процесса изготовления конечного изделия). Наша ахиллесова пята как производственной технологии — высокая себестоимость заготовки после 3D-печати. Нужно работать совместно с разработчиками аддитивного оборудования над улучшением эксплуатационных характеристик оборудования, давать обратную связь и развивать продукты компаний, работающих в сфере материалов для 3D-печати. Нельзя забывать про образовательный трек, дорабатывая и внедряя образовательные программы для среднеспециального и высшего образования, максимально точно отвечающие запросам отечественной индустрии 3D-печати.

Также важно не оставлять без внимания вопросы разработки национальных стандартов и нормативно-технической документации по направлению.

Кто может стать движущей силой для ускоренного развития АТ в России?

Импульс развития уже есть в настоящий момент — это актуальные задачи импортозамещения, в рамках которых технологии аддитивного производства раскрываются максимально эффективно, давая нужный экономический и технологический эффект. Повторюсь — важно не упускать этот момент и работать над укреплением позиций АП в существующих технологических пределах различных отраслей.

Какие меры и коммуникации могли бы дать дополнительные возможности для развития вашей организации?

С точки зрения существования коммерческих организаций, работающих в сфере аддитивного производства, одной из основных проблем, тормозящих развитие, становится высокая стоимость оборудования для промышленной 3D-печати. Здесь хорошим подспорьем могли бы стать меры поддержки от государства в виде субсидий, льготных условий на приобретение технологического оборудования. Также есть определенные проблемы с доступностью услуг и оборудования для мехобработки напечатанных заготовок (а мы практически всегда работаем с заказами от клиентов, подразумевающими поставку готовых изделий, где доля непосредственно 3D-печати редко превышает 40–50%). Создание пула доступных для участников рынка 3D-печати мощностей по постобработке было бы хорошим подспорьем. ■

Роль Госкорпорации «Росатом» в развитии аддитивных технологий



Ведущие промышленные корпорации России активно внедряют аддитивные технологии в свои производственные процессы. О задачах и направлениях развития этого направления внутри Госкорпорации «Росатом» редакции журнала «Аддитивные технологии» рассказал директор бизнес-направления «Адди-

тивных технологий» Госкорпорации «Росатом» Илья Владимирович Кавелашвили.

Развитие российского рынка аддитивных технологий идет не так быстро, как мирового, и многие уповают на помощь государства. А какую роль могут сыграть корпорации, в частности Госкорпорация «Росатом», в развитии этого инновационного направления в России?

Когда мы говорим о внедрении аддитивных технологий, важно выделить следующие направления развития: подготовка кадров, разработка оборудования и производство материалов, формирование рынка. В госкорпорации ведется комплексная работа по всем направлениям.

Так, в «Росатоме» разработана программа обучения персонала различного уровня погружения для того, чтобы работники корпорации знали, что такое аддитивные технологии. В прошлом году онлайн-курс прошли более 1000 человек. С аддитивными технологиями «Росатом» также пошел в вузы и школы — наши сотрудники помогают разрабатывать программы обучения. Была открыта специализированная лаборатория в образовательном центре «Сириус» в Сочи. В нашем Центре аддитивных технологий (ЦАТ) проводятся экскурсии для учащихся вузов и школ. К нам привозят победителей детских конкурсов «Большая перемена». Для разработки серьезных программ, требующих образовательной лицензии,

привлекаются специалисты академии «Росатома». Все эти усилия позволят в ближайшем будущем готовить инженеров, которые не на словах знают, что такое аддитивные технологии.

Что касается создания оборудования и материалов, Госкорпорация «Росатом» вкладывает большие средства и усилия в это направление — несколько миллиардов рублей уже инвестированы. Это наиболее значимая, затратная часть всей работы. Собственное оборудование и программное обеспечение, которое разрабатывают специалисты интегратора по аддитивным технологиям, обеспечивают технологическую безопасность и суверенитет России, что является важным критерием при принятии решения о внедрении технологий.

«Росатом» планирует внедрять аддитивные технологии у себя, в том числе при изготовлении различных узлов атомных реакторов, это позволит не попадать в зависимость от какого-либо поставщика. Вход в технологию стоит больших денег и времени с точки зрения сертификации оборудования и материалов. Например, реакторные испытания по новым методикам могут проходить меньше пяти лет, но не менее года, учитывая ресурс работы реактора в 60 лет. И каждый раз при смене 3D-принтера или материалов невозможно проводить новые испытания.

С точки зрения формирования рынка мы работаем с министерствами промышленности регионов, с их поддержкой организуем конференции, куда приглашаются специалисты ведущих предприятий, рассказываем о возможностях аддитивных технологий. Там, где проявляют интерес, мы проводим технологические аудиты, подсказываем возможности внедрения. А далее предприятия начинают практическое знакомство с аддитивкой с точки зрения пробной печати. Специалист в лице главного технолога, конструктора должен поверить в технологию перед тем, как закупить дорогостоящее оборудование. Эта деятельность осуществляется при финансовой поддержке «Росатома».

Эти усилия атомной отрасли сформировали серьезный положительный имидж всей отрасли 3D-печати в стране, не зря дорожная карта развития аддитивных технологий была подписана между правительством РФ и «Росатомом».

Смогут ли малые предприятия — производители оборудования и материалов реализовать свой потенциал, если рядом такой конкурент, как «Росатом»?

Наша цель — внедрять технологию в целом, донести ее преимущества для достижения целей импортозамещения и промышленного развития России. Аддитивные технологии стремительно развиваются, постоянно появляются новые способы и методы печати, материалы. Каждый производитель может найти свою нишу. Конкуренция — драйвер развития, в том числе и для нас — это помогает оставаться в тонусе и не расслабляться.

Достаточно посмотреть на стартапы на выставке «Металлообработка», они уже двухэтажные стенды строят, по восемь машин демонстрируют. Ребята молодые, энергичны. Если государство поддержит, корпорация поможет, вопросов с ростом не будет. Кроме того, их ключевые клиенты — частный бизнес. У нас цели другие, верхнеуровневые. Можно даже сказать, что мы помогаем им, продвигая аддитивные технологии в целом в нашей стране, меняем отношение к ним в сознании инженеров и производителей.

Как обстоит конкуренция с зарубежными производителями? Китайские компании, например, готовы поставлять оборудование сейчас дешево и быстро... Как вы решаете эту задачу?

Да, с китайскими компаниями конкуренция серьезная. В этой конкуренции есть свои плюсы. Это для нас ориентир для развития собственного продукта. Хороший продукт не только повысит нашу конкурентоспособность на рынке, но и сможет открыть заказчику новые возможности в производстве.

Каковы пути перехода от аддитивных технологий к аддитивному производству?

Пожалуй, главное направление — это развертывание сети Центров аддитивных технологий общего доступа (ЦАТОД). Создание ЦАТОД — это возможность позна-

комить регион со своими технологиями и подходами, то есть укрепление позиций на будущее. Представители промышленных предприятий региона могут заказать пробную печать, испытать образцы, сравнить себестоимость аддитивного производства с обычным.

Какие достижения бизнес-направления «Аддитивные технологии» Госкорпорации «Росатом» вы считаете наиболее значимыми? И расскажите о ближайших планах.

Впервые в атомной отрасли реализовано серийное производство 3D-оборудования. Появился серийный принтер RusMelt-310M по печати металлами, который позволяет получать изделия из металлопорошковых композиций. Новая модификация RusMelt 310 усовершенствована по всем ключевым показателям в соответствии с запросами крупных российских промышленных предприятий. Данная модель принтера RusMelt уже включена в Реестр промышленной продукции, произведенной на территории Российской Федерации.

В производстве на площадке ООО «НПО «Центротех» находится десять таких принтеров, почти половина из них имеет потенциальных покупателей. На данный момент нами активно ведется работа по созданию национальной сети центров аддитивных технологий, расположенных в регионах РФ. Один принтер мы уже продали Томскому политехническому университету. Другой принтер отправится в ЦАТОД Уральского федерального университета России имени Б.Н. Ельцина (УрФУ) — соответствующий документ был подписан рамках выставки «Иннопром-2024». Открытие ЦАТОД в Екатеринбурге планируется до конца 2024 г., и он станет четвертым центром, открытым при содействии «Росатома». Также мы договорились с УрФУ об использовании для печати материалов, произведенных на заводах «Росатома».

Еще большим достижением я бы назвал то, что более 30 предприятий госкорпорации внедряют аддитивные технологии. Это важно, поскольку мы от слов перешли к делу. Где-то НИОКР, где-то печать вспомогательных



Фото: <https://vk.com/leaderforum>

узлов, в том числе серийная, также печать изделий, которые не относятся к атомной энергетике, не требуют разрешения Ростехнадзора и т.д.

За 2023 год мы закрыли два больших НИОКР почти на полмиллиарда рублей. В этом году заканчивается проект по большому СЛМ-принтеру и ДМД-принтеру, в планах разработка маленькой модели СЛМ-принтера.

В 2023 году «Росатом» выпустил 20 тонн порошка из нержавеющей стали, который был не только использован внутри корпорации, но и продан заказчику. На Чепецком механическом заводе в этом и следующем году планируется установка трех атомайзеров для производства титанового порошка и сплава инконель.

В прошлом году реализован первый международный контракт. С тремя странами осуществляется тесное взаимодействие по сотрудничеству. При поддержке правительства и министерства промышленности и торговли Республики Татарстан Ассоциацией развития аддитивных технологий был проведен V Лидер-форум в Казани — главное мероприятие по аддитивным технологиям в России. На нем присутствовало 2 тысячи участников, 80 ключевых спикеров провели 12 панельных дискуссий и был организован хакатон «Ночь технологий», в котором состязались девять команд ведущих вузов России. В 2024 году Лидер-форум будет проведен в Москве осенью, поэтому всех интересующихся 3D-печатью приглашаем заочно.

Мы перешли к системному внедрению. По распоряжению генерального директора Госкорпорации «Росатом» Алексея Евгеньевича Лихачева создана рабочая группа, куда вошли более 60 человек: конструкторы, технологи, разработчики, потребители, надзорные органы. Главными конструкторами определены 120 деталей, которые будут печататься в перспективе. Из этих деталей выбраны 10 базовых деталей для набора референций. По сути, «Росатом» перешел к набору доказательной базы, что аддитивка — это серьезно, что это работа вдолгую.

«Росатом» также активно работает над развитием нормативной базы и стандартизацией новой отрасли аддитивных технологий в Российской Федерации. В 2023 году Росстандарт утвердил четыре разработанных интегратором по АТ национальных стандарта, которые устанавливают методы испытаний металлопорошковых композиций для 3D-печати. В этих стандартах описаны методы определения ключевых характеристик металлопорошковых композиций, по которым оценивается их качество и возможность использования в 3D-принтерах. Требования к испытаниям сырья, которые существовали ранее, не учитывали особенности металлопорошковых композиций, предназначенных для трехмерной печати, например, размер фракции и форму частиц порошков.

1 марта 2024 года вступил в действие первый в России ГОСТ на производство порошков для 3D-печати

из титановых сплавов (разработан Чепецким механическим заводом и интегратором по АТ). Стандарт устанавливает общие технические требования, методы испытаний, упаковки и транспортировки металлопорошковых композиций для трехмерной печати, а также требования по безопасности производства и охране окружающей среды.

ВСЕГО В РОССИИ СЕЙЧАС ДЕЙСТВУЕТ 52 СТАНДАРТА В ОБЛАСТИ 3D-ПЕЧАТИ. СОГЛАСНО ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПРОГРАММЕ СТАНДАРТИЗАЦИИ, СОЗДАННОЙ В РАМКАХ «СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДО 2030 ГОДА» (УТВЕРЖДЕНА В 2021 ГОДУ) ПЛАНИРУЕТСЯ РАЗРАБОТАТЬ И АКТУАЛИЗИРОВАТЬ ЕЩЕ БОЛЕЕ 50 ДОКУМЕНТОВ. «РОСАТОМ» В ЛИЦЕ ИНТЕГРАТОРА ПО АТ ПРИНИМАЕТ В ЭТОЙ РАБОТЕ АКТИВНОЕ УЧАСТИЕ.

Первый принтер ООО «РусАТ» был выпущен в 2016 году, прошло восемь лет. Есть опыт по эксплуатации, организации работы, обслуживанию, ремонту?

На первом принтере отрабатывались многие технологии по печати металлами, прорабатывался конструктив принтера. Но это не была коммерческая история, это был опытный формат. Он стал прототипом и основой для того, чтобы появились новые принтеры с учетом всех проблем, дополнительного анализа и опыта. Главную ошибку, которую учли: первый принтер делали в тех параметрах, которые понимали мы, разработчики, а второй — по техническим требованиям, которые разрабатывались с ключевыми заказчиками — корпорациям ОДК, «Ростех», «Роскосмос».

Сейчас даже компании озадачиваются формированием базы знаний. Кто должен ее формировать по большому счету?

Пока нет журналов и книг, где все прописано по стандартным технологиям, они являются конкурентным преимуществом. Мало иметь машину и порошок, надо уметь выращивать. Поэтому когда компании ведут разработки за свой счет и тратят на это немалые деньги, раздавать и даже продавать их, упуская заказчика к конкуренту, никто не будет. У нас было совещание в Минпромторге, где присутствующие высказались за то, что ключевые материалы базы данных необходимо формировать за счет средств государства, тогда она будет общедоступной. И тогда у главного конструктора любого предприятия, частного или государственного, появится «точка опоры». Тогда аддитивная отрасль будет развиваться быстрее. ■

Татьяна Карпова

От аддитивных технологий к аддитивному производству

Что подразумевается под переходом от аддитивных технологий к аддитивному производству? Что нужно сделать, чтобы осуществить этот переход? Может сложиться впечатление, что эти вопросы применительно к российскому авиапрому пока висят в воздухе с точки зрения широты и глубины внедрения. Данной теме посвятил свое выступление на форуме «Инновации. Технологии. Производство» в Рыбинске Александр Корсунский, профессор Сколтеха и ведущий ученый Центра аэрокосмических материалов и технологий (ЦАКМиТ) ПИШ МАИ. Сфера его интересов и исследований лежит в области веществензнания в широком смысле, а также непосредственно связана с расширением применения аддитивного производства металлов. В этом интервью профессор Корсунский предложил основные условия и критерии такого перехода.



Чем отличается применение аддитивных технологий от аддитивного производства?

В своем выступлении я подчеркнул различие между аддитивными технологиями и аддитивным производством. Для этого есть несколько существенных причин. Сейчас на российском рынке присутствует огромное количество устройств для аддитивного производства от западных и восточных производителей, которыми обзавелись различные центры аддитивных технологий и используют их для 3D-печати. Это модно, актуально и административно востребовано: сверху идет команда «внедрять!». Однако на практике деятельность таких центров часто сводится к суетливому поиску инфоповодов и эпизодических договорных услуг, а не к серьезной систематической работе по разработке и внедрению стратегически обоснованных подходов.

Если служебные свойства сводятся к геометрии изделия, свойствам поверхности, внешнему виду — решение таких задач оказывается довольно простым и быстро находит применение. Однако это относительно дешево не ведет к масштабированию экономического эффекта, которое полностью оправдывает капиталовложения.

Когда-то в начале двухтысячных годов, когда мы начинали работать над этой темой в Оксфорде, мои коллеги из Rolls-Royce говорили: «Мы попали во власть геометров-модельеров». Под этим они имели в виду, что во всем процессе превалировала геометрия: если получилось ее воспроизвести, то и замечательно! На самом же деле при использовании любой технологии металлообработки конструктора интересует не только ее форма, но прежде всего то, как деталь устроена внутри. Даже

если аддитивная технология может добиться нужной формы детали, это не значит, что деталь пригодна для производства, особенно серийного. Для этого необходимо обеспечить внешнюю и внутреннюю геометрию, отсутствие дефектов, микроструктуру зерен, а также необходимые механические свойства: статическую прочность, усталостный ресурс, ударную прочность и многие другие параметры, оговоренные в условиях специальной квалификации традиционно изготовленных деталей.

ДЛЯ ТОГО ЧТОБЫ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СТАЛИ ОСНОВОЙ СИСТЕМ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА, НЕОБХОДИМО ДОБИТЬСЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЛУЖЕБНЫХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ.

Итак, для превращения аддитивных технологий в аддитивное производство необходимо сосредоточиться на обеспечении служебных свойств. Следует определить, какие из них мы хотим получить: какими параметрами прочности, жесткости, долговечности, износостойкости должна обладать деталь. Мы должны перечислить эти параметры, а потом проследить путь производства до финального продукта, на всех этапах обеспечить оптимум, чтобы свойства были не ниже заданных. Результат такой работы заслуживает называться производством, а не просто эпизодическим использованием кем-то разработанной технологии. Возникает правомерный вопрос: зачем такое количество людей и компаний

разрабатывают принтеры для 3D-печати, покупают их, что-то с их помощью печатают, если мы не успели договориться, каким образом мы будем добиваться обеспечения служебных свойств?

На Западе каждый разработчик самолета, двигателя решает эту задачу по-своему: это хоть и дорого, но приемлемо для больших конкурентных рынков. Росту крупных западных компаний производителей планеров и двигателей особенно помогли возможности масштабирования их производства в течение последних тридцати лет, когда советский авиапром так «своевременно» освободил место. Например, компания GE (производитель авиадвигателей) разработала внутренние технологические требования, сформулировала методику их соблюдения при производстве и строго ее придерживается. Это стало возможным потому, что для них основным критерием качества производства была и остается прочность детали.

В России мы пытаемся развить аддитивное производство в условиях, когда есть свои ограничения и особенности: мы это делаем в условиях ограниченных ресурсов и небольшого рынка. Это значит, что параллельно или повторно разрабатывать одни и те же подходы к внедрению аддитивного производства деталей в разных КБ потребует слишком больших затрат денег и времени. Нужен скоординированный единый подход, который был бы доступен всем отечественным разработчикам и производителям.

В существующей практике испытания и квалификация прочности проводятся на уровне планера или двигателя в целом, а не на уровне детали. Поэтому для конструктор оказывается проще придерживаться традиционных методов производства — ведь ему никто не предоставил инструкции, как правильно провести расчет узлов с аддитивно произведенными деталями. Очевидно, что неправильно закладывать свойства материала, полученные испытаниями проката иликовки, — но тогда как?

На мой взгляд, нужно формулировать целевые показатели служебных свойств деталей, проводить их специальную квалификацию, строить цифровые карты прочности и их использовать при проектировании. Фундаментальная работа над научно-техническим заделом в этой области уже ведется в рамках крупного проекта МАИ «Расчетно-экспериментальная корреляция», но над внедрением новых подходов в практику еще предстоит потрудиться.

Может быть для начала надо понять, какие возможности могут дать аддитивные технологии?

Оценить возможности, которые могут дать аддитивные технологии, на первый взгляд, нетрудно — но важно отделять зерна от плевел. Например, в новостях была история про шведскую компанию, которая целиком

напечатала ракету и запустила ее в космос. Это хайп: получили где-то денег и на уровне компании красиво о себе заявили. Один раз смогли — замечательно. Но гораздо важнее сделать этот процесс продолжительным, экономически устойчивым. Экономическая устойчивость достигается различными способами. Почему, например, SpaceX Илона Маска, на которого NASA переложило ответственность за космические разработки (вместе с большим количеством денег), смогла добиться значительных успехов и их воспроизводимости? Это пример правильного инженерного подхода, который стал возможен потому, что Илон Маск не только гениальный менеджер и маркетолог, который знает, как продать свои идеи и достижения, но и технически образованный руководитель. А иначе получаются лишь единичные вспышки в новостях о том, что кто-то там что-то еще напечатал, — на это даже не стоит обращать внимания.

ЛЮДИ ГОТОВЫ МНОГОЕ СДЕЛАТЬ, ЧТОБЫ ПОКРАСОВАТЬСЯ И ПРОДВИНУТЬ ПОВЕСТКУ, НО ЭТО РЕДКО МЕНЯЕТ РЕАЛЬНУЮ КАРТИНУ ВЕЩЕЙ НА ПРОИЗВОДСТВЕ.

А что делать? С чего начать?

Всем известно, что АТ дают невероятную гибкость с точки зрения проектирования, быстрого перехода от цифровой модели к физическому объекту. Но, если вы хотите не только быстро менять модель, но и переходить к производству, то необходимо пройти через все этапы обоснования надежности продукции.

В тот момент, когда вы напечатали первую демонстрационную деталь с правильной геометрией и поверхностью, у вас появляется потенциал использования ее в производстве, но путь к реализации еще ожидает проработки. В перспективе, когда этот путь будет проделан неоднократно, корреляции найдены и реализованы в алгоритмах машинного обучения, тогда станет возможным использовать критические преимущества АТ: не менять на заводе линию, оснастку, все формы, а просто печатать видоизмененное или новое изделие. Но без детальной проработки корреляций невозможно использовать опыт демонстрационной печати для использования в серийном производстве.

ПРЕИМУЩЕСТВА АТ НА ТЕКУЩИЙ МОМЕНТ НЕ РЕАЛИЗОВАНЫ ПОТОМУ, ЧТО НУЖНО НАУЧИТЬСЯ МЫСЛИТЬ НЕ КРАТКОСРОЧНЫМИ ЗАДАЧКАМИ, А СРЕДНЕСРОЧНЫМИ И ДОЛГОСРОЧНЫМИ ПРОГРАММАМИ РАЗВИТИЯ НА СРЕДНИХ И ВЕРХНИХ УРОВНЯХ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ.

Недостатком АТ по сравнению с другими технологиями также называют стоимость. Но ведь низкая стоимость традиционных методов производства, например штамповки, связана с тем, что штампуются миллионы штук. Если же не нужны миллионы, то расчет нужно проводить иначе. Да и с точки зрения использования материалов одно дело купить болванку размером в кубический метр и отрезать от нее 95% материала, что неэффективно, а другое — использовать 3D-печать, при которой расход материалов значительно меньше. Для всех этих аспектов должны быть разработаны шаблоны расчетов, основанные на конкретных примерах, которые помогут обосновать выгоду от внедрения АТ в серию.

Возможно ли и надо ли говорить о системном подходе развития АТ в России или все определит рынок?

Рынок — дело хорошее: он требует определенной честности подхода, так как отвергает все наносное и искусственно навязанное. Но рассчитывать, что рынок сам сформирует видение будущего и стратегию движения к нему, так же наивно, как полагать, что бессмертная обезьяна с пишущей машинкой когда-нибудь напечатает «Войну и мир»!

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД НЕОБХОДИМ, НО СЛОЖИТЬСЯ В РОССИИ ОН СМОЖЕТ ТОЛЬКО ТОГДА, КОГДА ЕГО БЕЗАЛЬТЕРНАТИВНОСТЬ ПОЙМУТ В РУКОВОДСТВЕ МИНИСТЕРСТВ И ВЕДОМСТВ. ПОМЕНЬШЕ ФОРМАЛЬНОЙ ОТЧЕТНОСТИ, ПОБОЛЬШЕ ЖЕЛАНИЯ РАЗОБРАТЬСЯ В СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОБЛЕМАХ, НАЙТИ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ И ДОБИВАТЬСЯ ИХ ИСПОЛНЕНИЯ.

На мой взгляд, в авиакосмической отрасли интегратором подходов в области АТ может выступить Передовая инженерная школа МАИ — ведь ее *raison d'être* как раз и состоит в том, чтобы развивать новый технологический уклад, помогать внедрять его в практику и воспитывать новое поколение инженеров, способных реализовать его на местах. Этому способствует ключевая роль МАИ как научно-образовательного и исследовательски-конструкторского «хаба» этой отрасли в России и существующие там заделы по созданию баз данных, знаний и экспертизы, которые уже сегодня активно используют большинство профильных отечественных организаций. ■

alexander.korsunsky@gmail.com

Татьяна Картова

Изучайте вещественное прибавление*

в Передовой инженерной школе Московского авиационного института!

Передовая инженерная школа (институт 14 МАИ) — флагманский научно-образовательный институт отечественного авиастроения в области разработки новых технологий для российских самолетов сегодняшнего и завтрашнего дня, внедрения прорывных решений в массовое производство, воспитания новых поколений инженеров-конструкторов.

Определяющую роль в работе ПИШ МАИ играет Центр аэрокосмических материалов и технологий (ЦАКМиТ), который включает лаборатории аддитивного производства металлов (АПМ) и полимерных композиционных материалов (ПКМ).

В центре работают и преподают специалисты мирового уровня с опытом руководства исследовательскими и образовательными программами в лучших университетах и ведущих компаниях мира, которые щедро делятся с учащимися секретами мастерства ученого, инженера, конструктора.

В процессе обучения широко применяется проектно-ориентированный подход: магистранты принимают участие в конструировании, изготовлении, испытании новых приборов, узлов и систем, что обуславливает их высокую востребованность и вознаграждение в отрасли и за ее пределами по окончании обучения всем аспектам специальности 15.04 «Машиностроение».

Некоторые основные направления ЦАКМиТ ПИШ МАИ:



Ракетный двигатель «Раптор» компании SpaceX

- Новое материаловедение аддитивного производства: от Гиббса и Колмогорова до Илона Маска.
- Современные цифровые методы в испытании и моделировании материалов: от электронной микроскопии микроструктуры до ее предсказания с помощью уравнений реакции — диффузии, метода фазового поля, моделей клеточных автоматов и нейросетей.
- Корреляционные методы в конструировании авиакосмической техники: сочетание и анализ больших данных цифровой корреляции изображений (ЦКИ) и конечно-элементного моделирования (КЭМ).
- Система менеджмента аддитивного производства (СМАП@МАИ): сквозная оптимизация проектирования, изготовления, обработки и испытания деталей 3D-печати для обеспечения высочайшей надежности их работы.

- Обратное конструирование (ОК): как перепроизвести дефицитные детали и устройства, делая их лучше.

В обучении и НИР широко используется программирование python, методы машинного и человеческого обучения, искусственного и естественного интеллекта.



Контактная информация:

Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993
 Оршанская ул., д. 3, Москва, 121552
pish@mail.ru
<https://institutes.mai.ru/advanced/>

*«Вещественное прибавление» — полный русский перевод понятия material addition, также известного под названием «аддитивные технологии» и «3D-печать».



АДДИТИВНЫЙ КОНГРЕСС #1

20 сентября 2024 года в Москве состоялось долгожданное событие для всех, кто следит за развитием современных производственных технологий, — «**Аdditивный конгресс #1**», организованный **Академией аддитивных технологий «Цифра Цифра»**. Конгресс объединил ведущих экспертов в области аддитивных технологий, представителей промышленных предприятий, ученых и инженеров, чтобы обсудить тренды и достижения в сфере 3D-печати и аддитивного производства.

Мероприятие собрало более 400 участников, среди которых присутствовали представители крупных промышленных производств, компаний-интеграторов, производителей отечественного оборудования и материалов для 3D-печати, исследовательских институтов, стартапов, студий 3D-печати и реверс-инжиниринга, а также ведущих технических вузов страны.

В роли отраслевых партнеров события выступили 12 компаний: 3D Vision, HARZ Labs, RangeVision, AM.TECH, REC, Imprinta, Kompo 3D, «Лазерные системы», F2 innovations, 3Def, IGO3D и Omitec.

В мероприятии участвовало более 40 спикеров — практиков, активно ведущих разработки или внедрение

в сфере АТ. Мероприятие торжественно открыла генеральный директор Академии аддитивных технологий «Цифра Цифра» Дарья Дмитриева.

Программа конгресса была нестандартной и даже немного неформальной для сферы. Ключевая особенность мероприятия в том, что с презентациями выступали только конечные пользователи технологии: Антон Егоров — заместитель руководителя Курчатовского комплекса химических исследований (ИРЕА), Максим Канищев — преподаватель магистерской программы «Промдизайн и инжиниринг» НИТУ МИСИС, Денис Прудник — аэрокосмический инженер, популяризатор космонавтики, лауреат премии «Знание», Дмитрий Гуров — инженер-проектировщик центра тюнинга и обслуживания автомобилей Gosha Turbotech, Сергей Грищенко — технический директор инженерно-производственного центра ЕМС.

В дискуссионных секциях «Аддитивной прожарки промышленности» в качестве экспертов выступили отечественные производители, интеграторы и руководители технологических центров: Михаил Родин, генеральный директор AM.TECH; Алексей Ким, директор департамента аддитивных технологий АО «Лазерные





системы»; Евгений Матвеев, генеральный директор F2 innovations; Денис Чесноков, заместитель начальника отдела развития аддитивных технологий «АО Композит»; Михаил Артюшков, генеральный директор «Иннфокус», Александр Юрасов, сооснователь и технический директор HAZ Labs; Константин Бабкин, начальник отделения аддитивных технологий ИЛИСТ СПбГМТУ; Виталий Смелов, директор Института двигателей и энергетических установок СГАУ, и Александр Корсунский, директор ЦАКМиТ ПИШ МАИ.

Середина дня была посвящена секции «Акулы голубых океанов АТ», где спикеры представили новые разработки и рынки АТ и их применение в различных отраслях, а также крайне актуальной сейчас теме «Реверс-инжиниринг и АТ». Здесь в роли докладчиков выступили: Алексей Розов — изобретатель и основатель «Лерто», Рушан Хасянов — директор по науке REC, Артем Соломников — генеральный директор Imprinta, Екатерина Евсеева — директор по развитию Академии аддитивных технологий «Цифра Цифра» — с совместным докладом с Павлом Ладновым, руководителем продуктового направления селективного лазерного сплавления AM.TECH, Юрий Чайкин — генеральный директор RangeVision, Роман Давыдов — коммерческий директор КБ INNOPOL.

Мероприятие посетили Антон Барданов, операционный директор Ассоциации развития аддитивных технологий, и Роман Лукшин, руководитель проектов Правительства Москвы «Московская техническая школа» и «Промышленный дизайн в Москве», участвовав в секции «Вечерний аддитив: как развивается отрасль в России» — неформальной открытой дискуссии с представителями разных сфер АТ в формате живого подкаста.

На «Аддитивном конгрессе #1» были представлены презентации инновационных проектов в области аддитивных технологий, которые в ближайшем будущем могут кардинально изменить подходы к производству в различных отраслях. На мероприятии обговаривались соглашения о стратегическом партнерстве между компаниями-партнерами и промышленными предприятиями, что может открыть новые возможности для развития технологий на российском рынке.

Кроме того, более 50 участников посетили три тематических мастер-класса, которые прошли в рамках мероприятия: реверс-инжиниринг, мастер-класс по FDM-технологии и технологии фотополимерной печати.

В финале вечера всех гостей ожидала неформальная часть с «Аддитивным стендапом» и выступлением кавер-группы.

Конгресс показал высокий уровень интереса со стороны бизнеса и научного сообщества к теме аддитивных технологий и продемонстрировал важность сотрудничества для достижения новых технологических высот. Организаторы выразили уверенность в том, что «Аддитивный конгресс» станет ежегодной площадкой для обмена знаниями и опытом, способствуя дальнейшему развитию этой перспективной отрасли.

Академия аддитивных технологий «Цифра Цифра» выражает отдельную благодарность коллегам по отрасли аддитивных технологий: Михаилу Шишкину за техническое оснащение мероприятия и организацию экспозиции, а также Артему Соломникову и его команде «Аддитивная кухня» за организацию программы и неформальной части мероприятия.

Благодарим участников, партнеров и организаторов за проведение потрясающего аддитивного мероприятия! Следите за анонсами на сайте www.2cifra.ru, чтобы не пропустить новые мероприятия. ■





Первая конференция по аддитивным технологиям в строительстве



Фото: ГК «АМТ»

4–5 июня 2024 года в Московском государственном строительном университете (НИУ МГСУ) прошла первая международная конференция «Аддитивные технологии в строительстве». Ее организаторами выступили НИУ МГСУ и агентство «Квинтет» (<https://baltimix.ru/>) при поддержке Ассоциации профессионалов аддитивного строительства, Российской гипсовой ассоциации, Комитета по науке и инновационному развитию строительной отрасли Российского союза строителей. Спонсором стал крупнейший производитель белого цемента в России – компания СЕМІХ. Модерировал конференцию директор НИИ СМиТ НИУ МИСИС **Алексей Адамцевич**.

Процессы цифровизации медленно, но верно охватывают и такую консервативную отрасль, как строительство. Примерами тому являются здания и сооружения, построенные в мире и в России с помощью 3D-печати. Они отличаются оригинальностью, привлекают внимание широкой общественности и, по мнению участников конференции, являются наглядной демонстрацией практической значимости разработок в области строительной 3D-печати. Основными драйверами развития строительной 3D-печати специалисты называют: дефицит рабочей силы на строительных площадках, урбанизацию, которая стимулирует строительство, внимание к устойчивому строительству и экологическим аспектам строительства, здоровье и безопасность людей.

Серьезный разговор между ведущими отечественными специалистами, причастными к этой инновационной теме в строительстве, давно назрел, поскольку широкому применению новых разработок должны предшествовать такие процессы, как нормативное обеспечение и стандартизация аддитивного строительного производства, проектирование и расчет зданий и сооружений, возводимых методом строительной 3D-печати, перспективные исследования и разработки технологий, консолидация участников рынка, формирование рынка оборудования и материалов и др.

По сообщению модератора, в зале присутствовали производители и поставщики оборудования для АТ-производства, застройщики и девелоперы, которые на практике применяют строительную 3D-печать, производители компонентов и добавок для строительных смесей, производители строительных смесей и материалов, представители профильных ассоциаций и союзов, науки и образования, архитекторы, проектировщики и скульпторы, представители профильных журналов и профильных технических комитетов по стандартизации (ТК 182, ТК 400, ТК 465). Как уточнил Алексей

Адамцевич: «Если вы посмотрите на коллег вокруг вас, то по большому счету их руками, с использованием их оборудования, их материалов и компонентов и т.д. в России возведено 100% объектов, которые построены по технологии 3D-печати».

Приветствовали участников конференции такие известные специалисты в области строительства, как **Павел Акимов**, ректор НИУ МГСУ, **Константин Буравлев**, исполнительный директор Российского союза строителей, **Алексей Гагулаев**, директор Ассоциации профессионалов аддитивного строительства, **Александр Бурьянов**, исполнительный директор Российской гипсовой ассоциации, **Роман Борисов**, управляющий Союза производителей сухих строительных смесей.

Докладчики рассмотрели целый спектр составляющих и аспектов 3D-печати в строительстве:

- перспективные материалы и добавки к материалам (**Андрей Пустовгар**, к.т.н., доц., научный руководитель НИИ СМиТ НИУ МГСУ, председатель комитета по науке и инновационному развитию строительной отрасли РСС; **Андрей Благоев**, генеральный директор компании Pologlass; **Екатерина Паршкова**, эксперт компании ФорУС в области строительной 3D-печати);
- оборудование (**Александр Маслов**, основатель и генеральный директор группы компаний «АМТ»; **Илья Медведев**, технический директор, соучредитель ООО «СмартБилдСервис»; **Вадим Тарасов**, технический директор «РВС 3Д»);
- опыт выполнения 3D-строительных проектов (**Роман Павленко**, основатель и руководитель проекта 3D4Art, **Дмитрий Черепков**, основатель и руководитель компании Nayada, экопарка «Ясно Поле», проекта «WonderDom – 3D-печать удивительных домов»; **Инна Карасёва**, финансовый директор компании «Дом из принтера»);



- исследования, проводимые с целью оценки и совершенствования материалов и технологии аддитивного строительства (**Олег Кабанцев**, д.т.н., профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции», директор научно-технических проектов НИУ МГСУ; **Рустем Мухаметрахимов**, к.т.н., руководитель лаборатории аддитивных технологий строительного производства, доцент КГАСУ; **Наталья Копаница**, д.т.н., профессор ФГБОУ ВО ТГАСУ);

- тенденции развития технологий и вызовы, стоящие перед профессиональным сообществом (**Максим Неретин**, исполнительный директор компании «Аспира»; **Алексей Адамцевич**, к.т.н., директор НИИ СМиТ НИУ МГСУ, председатель ПК 7 ТК 400);

- цели и задачи Ассоциации профессионалов аддитивного строительства (**Алексей Гагулаев**, генеральный директор Ассоциации профессионалов аддитивного строительства);

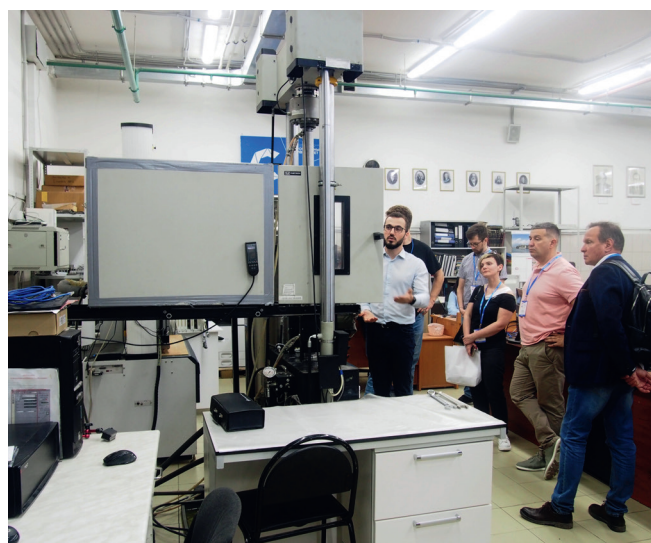
- подготовка кадров (**Ираида Ласкина**, директор ГАПОУ МО «Межрегиональный центр компетенций — Техникум имени С.П. Королева»);

- техническое регулирование и стандартизация применения аддитивных технологий (**Роман Борисов**, управляющий Союза производителей сухих строительных смесей).

Говорили о развитии строительной 3D-печати как отрасли с акцентом на системные проблемы, которые касаются всех участников этого перспективного рынка, а также про объединение возможностей участников для новых впечатляющих проектов.

По общему мнению, данная конференция носила знаковый характер, поскольку именно сейчас закладывается новый этап в развитии строительства. И это будущее находится в руках присутствовавших — профессионалов, энтузиастов своего дела, которые без помощи государства переводят проблемы в задачи и успешно их решают.

Первый день завершился экскурсией по профильным научным центрам и испытательным лабора-



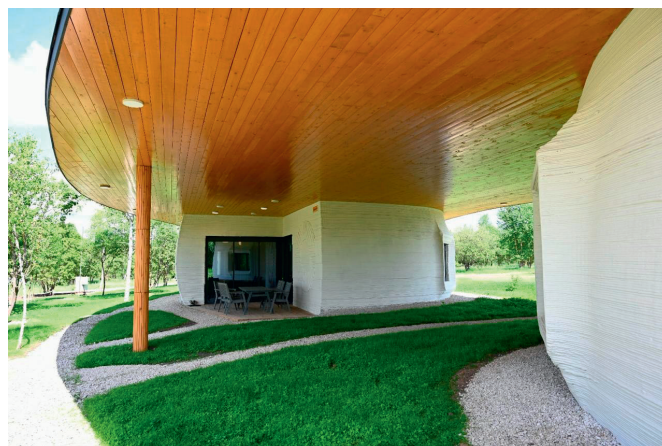
ториям НИУ МГСУ, НИИ строительных материалов и технологий, НИИ экспериментальной механики.

Во второй день конференции состоялась экскурсия в экопарк «Ясно Поле» в Тульской области, где с помощью 3D-печати выполнены уютные домики для отдыхающих. Экскурсию провел основатель экопарка Дмитрий Черепков. Участники поездки осмотрели несколько строений, прекрасно вписавшихся в сельское экологическое пространство, увидели процесс возведения стен при помощи 3D-принтера, продегустировали фермерский обед из натуральных продуктов, и в целом оценили, насколько эффективным может быть применение аддитивных технологий, если их использует увлеченный, творческий человек для воплощения своих смелых замыслов.

Следующая конференция 3DMIX состоится в 2025 году и, учитывая ускоренное развитие отрасли строительной 3D-печати, обещает много новой информации как для специалистов, так и для тех, кто следит за достижениями в этом интересном направлении. ■

Татьяна Карпова

Фото: НИУ МГСУ



Создание формообразующей оснастки методом FDM-печати для литья в холодно-твердеющие смеси

А.М. Зайцев, к.т.н., заместитель технического директора завода по подготовке производства ПАО РКК «Энергия», alexey.zaitsev@rsce.ru;
Г.В. Калугин, главный металлург, начальник отдела ПАО РКК «Энергия», grigoriy.kalugin1@rsce.ru;
А.Н. Гудков, инженер-конструктор III категории ПАО РКК «Энергия», andrey.gudkov3@rsce.ru

В статье рассматриваются основные этапы изготовления методом FDM-печати модельной формообразующей оснастки деталей РКТ для создания литейных форм на основе холодно-твердеющих смесей.

Введение

Для получения деталей методом литья в холодно-твердеющие смеси используют специальную формообразующую оснастку, изготавливаемую чаще всего из дерева или металла.

Металлические модели и ящики применяют при серийном производстве отливок с повышенным классом точности. Такая оснастка обладает высоким качеством поверхности, точностью и прочностью, что позволяет совершать до 15000 съемов.

Древесина является широко используемым материалом при изготовлении модельных комплектов. Оснастка из такого материала характеризуется малой плотностью и хорошей обрабатываемостью режущими инструментами [1]. Из недостатков деревянной модельной оснастки следует отметить повышенную гигроскопичность, коробление и неоднородность структуры.

Однако изготовление металлической или деревянной модельной оснастки при единичном или мелкосерийном литье представ-

ляет существенную трудоемкость, которая не обеспечивает сроки создания перспективных изделий РКТ. Для автоматизации процесса, уменьшения цикла изготовления и снижения себестоимости изготовления модельных комплектов применяют технологию FDM-печати. Применение данного метода также обладает высокой точностью и особо эффективно в условиях опытного производства, когда требуется частая корректировка деталей, их заготовок и, соответственно, применяемой модельной оснастки [2].

Проектирование модельного комплекта

Модельная формообразующая оснастка состоит из нескольких элементов:

1. Мастер-модель основной детали с учетом формовочных выступов для установки центрального песчаного стержня (рис. 1). Для удобства формовки выступ в верхней полуформе сделан разборным. В модель добавлено центральное отверстие с резьбой для выемки оснастки из песчаной полуформы.

2. Мастер-модель прибылей (рис. 2). Для удобства формовки и выемки моделей из формы задается угол наклона в 5 градусов.

Рис. 1. Мастер-модель отливки

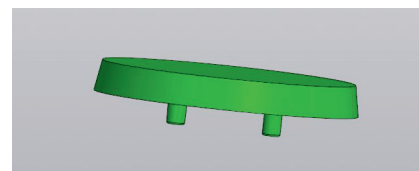
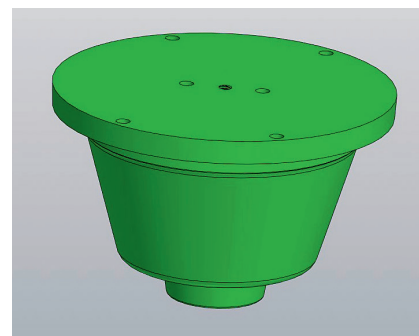


Рис. 2. Мастер-модель прибылей

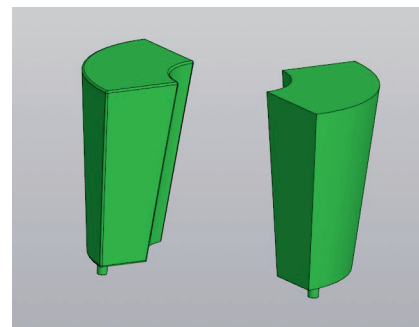


Рис. 3. Комплект стержневого ящика

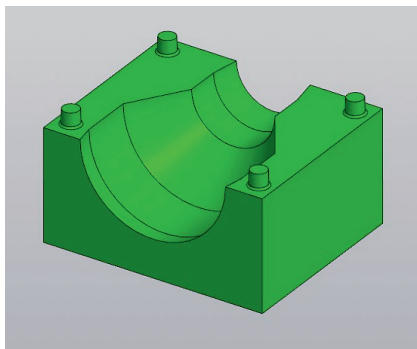
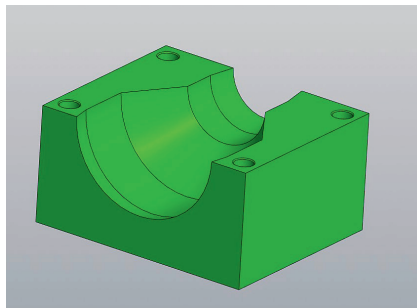


Таблица 1. Основные параметры печати деталей

Наименование	Величина	Наименование	Величина
Материал	PETG	Заполнение	30 %
Температура экструзии	255°C	Толщина слоя	0,08 мм
Температура платформы	70°C	Диаметр сопла	0,4 мм

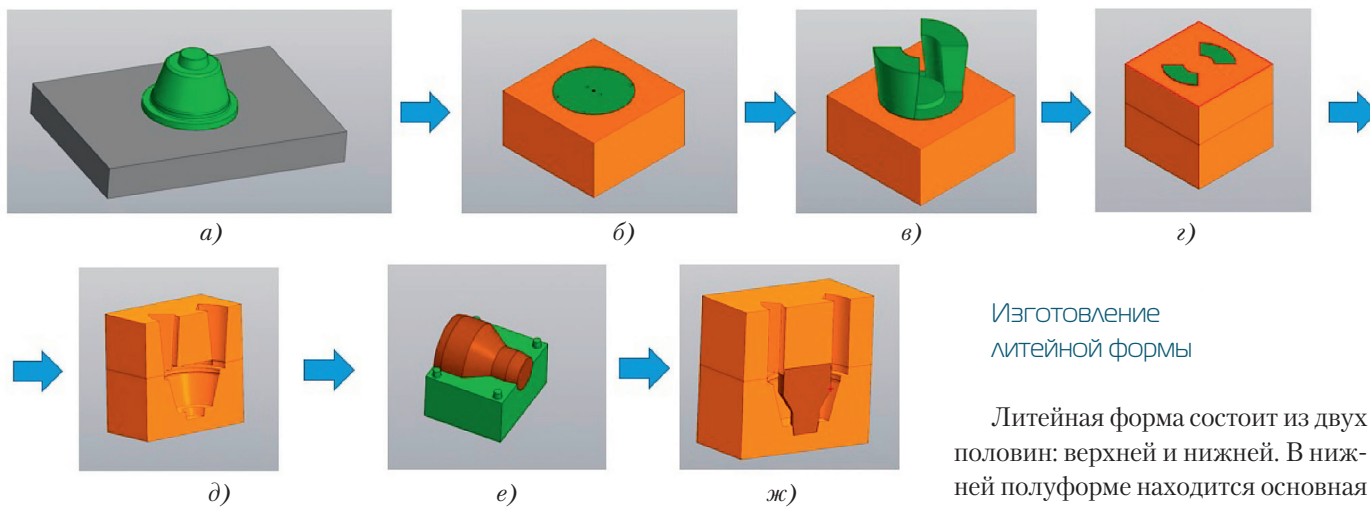
3. Ящик для изготовления центрального формообразующего стержня (рис. 3).

Изготовление модельного комплекта

В качестве основного материала был выбран пластик PETG (полиэтилентерефталат гликоль). Данный термопласт характеризуется высокой технологичностью при печати, малой усадкой (до 1%), низкой гигроскопичностью. Все детали

печатались с помощью FDM-принтеров Bambu Lab X1C. Суммарное время изготовления всех деталей составило 18 ч 53 мин. Время изготовления модельного комплекта из дерева составило бы 28 часов, из металла — 37 часов. Стоимость изготовления модельного комплекта из термопластика составила 6 тыс. руб. Стоимость подобной оснастки из дерева составила бы 16 тыс. руб., из металла — 49 тыс. руб. Основные параметры печати представлены в таблице 1.

Рис. 4. Изготовление литейной формы



Изготовление литейной формы

Литейная форма состоит из двух половин: верхней и нижней. В нижней полуформе находится основная часть отливки и формообразующий стержень. В верхней полуформе располагаются прибыли и верхняя часть песчаного стержня. В данном случае прибыль устанавливается над всей отливкой для предотвращения усадочных дефектов. Для изготовления форм используется кварцевый песок и жидкое стекло (ЖС) в качестве связующего. Для отверждения формы используется продувка углекислотой. Данная технология позволяет получать отливки 7–8 класса точности по ГОСТ 26645-85 с высоким качеством поверхности.

Рис. 5. Отливка из сплава АК9



Изготовление литейной формы состоит из следующих этапов:

1. Установка формообразующей оснастки на модельную плиту (рис. 4а). Засыпка формовочной смесью.

2. Кантовка нижней полуформы (рис. 4б). Продувка формы углекислотой с целью отверждения смеси.

3. Установка мастер-модели стержня и прибылей (рис. 4в). Засыпка верхней формы формовочной смесью.

4. Засыпка верхней формы формовочной смесью (рис. 4г) и продувка углекислотой для отверждения.

5. Разбор формы с целью извлечения мастер-моделей отливки, стержня и прибылей (рис. 4д).

6. Формовка стержня в формовочном ящике и продувка его углекислотой для отверждения (рис. 4е).

7. Сборка всей формы перед заливкой и установка центрального формообразующего стержня (рис. 4ж).

В качестве материала отливки используется алюминиевый сплав АК9 ГОСТ 1583-93. После заливки жидкого металла отливку очищают от остатков формы и стержня. Полученные размеры на отливке соответствуют требованиям КД. Видимых литейных дефектов на отливке не обнаружено (рис. 5).

Выводы

- Показана возможность изготавливать отливки с заданной точностью с помощью формообразующей оснастки из термопластиков.
- Формообразующая оснастка из термопластика сохраняет свою геометрическую точность до 30 съёмов.
- При малой серийности выгоднее применять формообразующую оснастку из термопластов. ■

Литература

1. Изготовление деревянных модельных комплектов в литейном производстве. В.В. Балабин. 3-е изд. М.: Высшая школа, 1976 г. 256 с.
2. Н.К. Толочко, А.А. Андрушевич, П.Н. Василевский, П.С. Чугаев. Применение технологии экструзионной 3D-печати в литейном производстве // Литье и металлургия. 2018. № 3. С. 139–144.

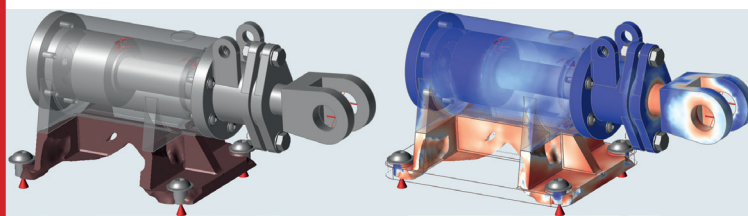


МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ

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 российское и зарубежное программное обеспечение.

ОСНОВНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТОК КАФЕДРЫ ЯВЛЯЮТСЯ:

- исследование технологических свойств материалов для аддитивных технологий и выбор термомеханических режимов 3D-печати;
- разработка технологий и оборудования для аддитивного производства;
- обратный инжиниринг и топологическая оптимизация для решения задач обработки давлением и аддитивного производства;
- листовая и объёмная штамповка, прокатка — разработка, исследование, внедрение технологий на опытное или серийное производство;
- разработка, исследование, внедрение технологий изготовления метизных и крепежных изделий;



- специальные процессы штамповки: изотермическая штамповка и штамповка с кручением чёрных и цветных сплавов;
- повышение стойкости штамповой оснастки и кузнечно-штамповочного оборудования;
- разработка моделей материалов для компьютерного моделирования технологий обработки давлением.

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 и заготовительного производства» (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



Анализ комплекса свойств фотополимерного материала для DLP/LCD аддитивной технологии

П.А. Петров^{1*}, А.В. Бушланова¹, М.А. Гапържанов¹, Н.С. Шмакова², И.А. Чмутин²

¹ Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

² Технологический центр коллективного пользования АО «Технопарк Слава», г. Москва, Россия

e-mail *petrov_p@mail.ru

Фотополимеризация в ванне (англ. — VAT-photopolymerization) — процесс аддитивного производства, в котором жидкий либо пастообразный фотоотверждаемый полимерный материал выборочно полимеризуется в ванне световым излучением (ГОСТ Р 57558-2017, ГОСТ Р 57589-2017). За период с 1984 по 2024 г. количество патентов на совершенствование, модификацию и применение процесса «фотополимеризация в ванне» увеличилось и составляет более шести тысяч. Первая технология, относящаяся к данной группе, — селективная лазерная стереолитография (Stereolithography Apparatus, SLA), запатентованная в 1984 г. (патент US4575330). Модификация технологии SLA привела к тому, что вместо лазерного луча отверждение фотополимерного материала обеспечивается за счет направленного потока света длиной волны в диапазоне от 385 до 410 нм (рис. 1). В случае применения в качестве источника света проекционной системы на основе DMD-матрицы технология 3D-печати получила название DLP (Digital Light Processing — цифровая обработка света); эта технология подобна технологии масочной стереолитографии (Solid Ground Curing, SGC), появившейся в 1986 году (патент US5031120A, EP0250121B1, US5139338A). Разработчик и производитель оборудования для технологии SGC — компания Cubital Ltd. В последующем, после закрытия компании Cubital Ltd, большая часть интеллектуальной собственности перешла в компанию Object Geometries Ltd.

Технологию DLP активно развивают компании — производители оборудования примерно с середины 2000-х годов. Конкурирующая с ней технология — LCD (Liquid Crystal Display — матрица на жидких кристаллах, ЖК-матрица); в основе проекционной системы — LCD-матрица.

Таким образом, различия между технологиями SLA, DLP, LCD связаны со следующим:

— SLA предполагает применение УФ-лазеров в качестве источника излучения для отверждения фотополимерного материала;

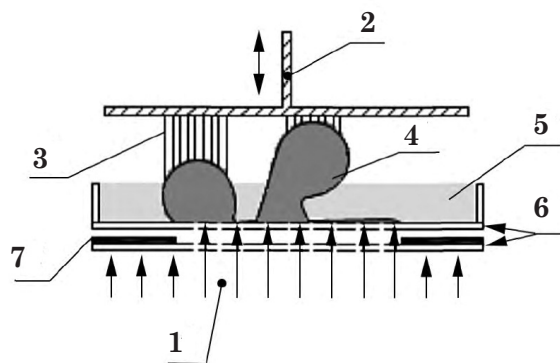
— DLP предполагает применение проекционной системы с DMD-матрицей для формирования источника излучения;

— LCD предполагает применение проекционной системы с LCD-матрицей для формирования источника излучения.

Формализованная модель технологического процесса фотополимерной 3D-печати показана на рис. 2.

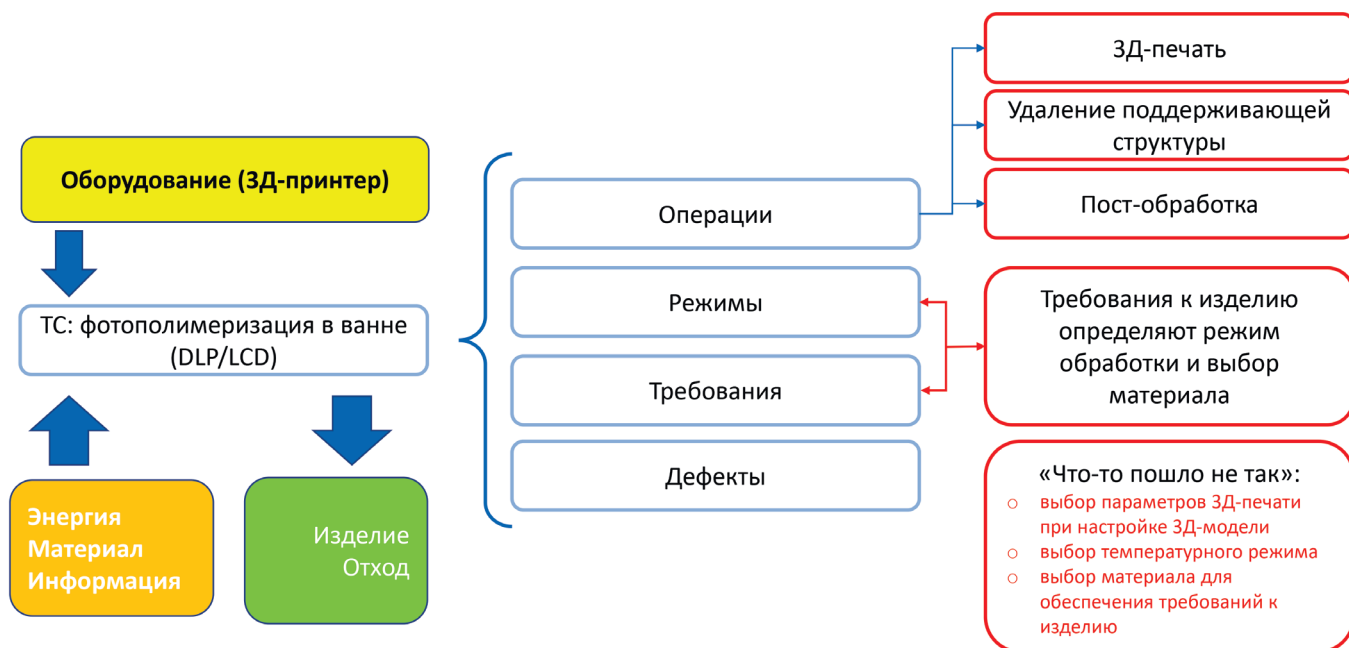
На этапе конструирования формируется перечень требований, которым при эксплуатации должно соответствовать изделие. При разработке технологического процесса 3D-печати может учитываться температурный интервал обработки выбранного материала, принято-

Рис. 1. Схема рабочей области оборудования для реализации процесса DLP/LCD



- 1 — Источник света;
- 2 — строительная платформа и подъемник;
- 3 — поддерживающая структура;
- 4 — получаемый продукт;
- 5 — ванна, заполненная фотополимеризующимся составом;
- 6 — прозрачные пластины;
- 7 — фотошаблон

Рис. 2. Модель технологии «фотополимеризация в ванне» (DLP/LCD)



го для изготовления изделия. Известны технические решения в области DLP/LCD-3D-принтеров, обеспечивающие подогрев фотополимерного материала для уменьшения его вязкости при формировании изделия. При выполнении операции «3D-печать» (рис. 2) в обрабатываемом материале происходят физико-химические процессы, управление которыми позволяет получать бездефектное изделие, соответствующее требованиям, сформулированным конструктором.

Интересно отметить, развитие технологий, относящихся к категории «фотополимеризация в ванне», сопровождается совершенствованием фотополимерных материалов с учетом потребительских требований. Например, компания Anycubic совершенствует материалы серии Standard, усиливая потребительские характеристики (рис. 3). В приведенном на рис. 3 примере производитель ориентируется на две характеристики —

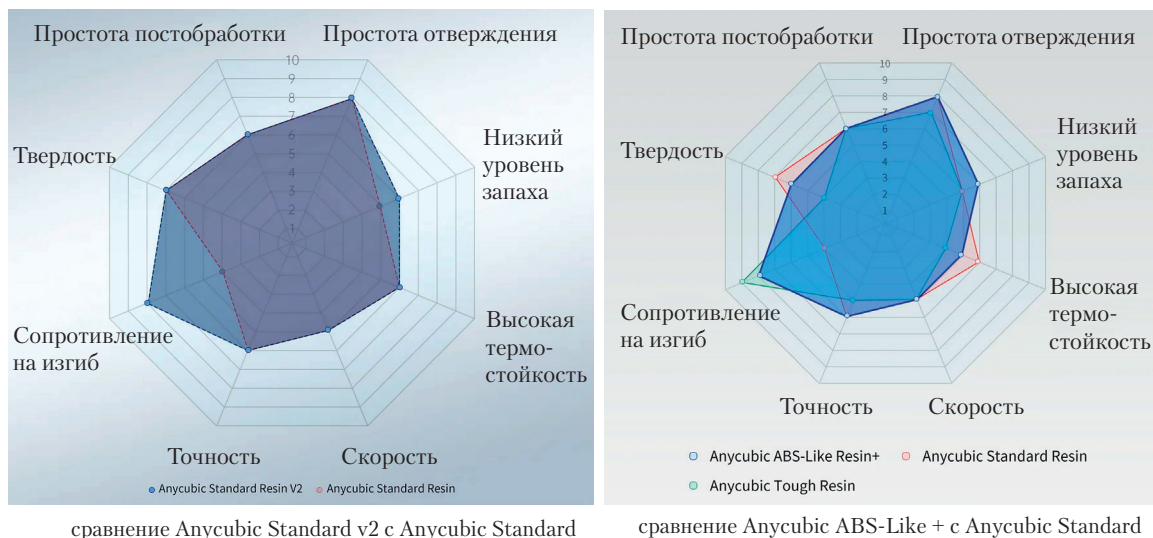
отсутствие запаха (low odor) и высокое сопротивление на изгиб (bending resistance).

Технология DLP/LCD предполагает изменение набора параметров настройки отверждения материала. Далее на примере нескольких фотополимерных материалов (Anycubic ABS like + Translucent green, Anycubic Standard Clear v2) будут показаны параметры настройки для LCD-3D-принтера — Anycubic Photon Mono.

Электрические свойства характеризуют способность материала проводить электрический ток и поляризоваться под действием внешнего электрического поля. Поскольку эти две способности независимы друг от друга, поведение изотропного материала в электрическом поле характеризуется двумя независимыми свойствами.

Для описания взаимодействия полимерных диэлектриков с электрическим полем и оценки качества

Рис. 3. Сравнение усовершенствованных материалов с предыдущим поколением



диэлектрика в научной литературе используется пара параметров (диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери). В технической литературе и в инженерных расчетах вместо диэлектрических потерь используют другую характеристику — тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$), который определяется как отношение относительной диэлектрической проницаемости к диэлектрическим потерям. Это связано с тем, что в течение многих лет $\text{tg } \delta$ можно было измерить гораздо проще, чем диэлектрические потери, и получить оценку качества материала в качестве диэлектрика. Показатель $\text{tg } \delta$ характеризует потери энергии электрического поля, рассеиваемой в электроизоляционном материале. В идеальном диэлектрике без потерь $\text{tg } \delta = 0$. Чем больше $\text{tg } \delta$ диэлектрика, тем сильнее он нагревается в переменном электрическом поле, а значит, менее приемлем в качестве изолятора.

Диэлектрическая проницаемость, в свою очередь, также может рассматриваться как показатель качества изделия, изготовленного с применением аддитивной технологии [1]. При наличии в изготовленном 3D-печатном изделии несплошностей (поры, пустоты, характеризующие стиль заполнения при 3D-печати, дефекты структуры) значение диэлектрической проницаемости изменяется.

Реологические свойства зависят от технологических свойств полимерного материала и характеризуют способность полимерного материала деформироваться в расплавленном состоянии под воздействием внешних сил. Характер течения полимера зависит также от структуры, формируемой к моменту приложения внешней нагрузки. Для фотополимерного материала деформация оказывается необратимой. Однако в случае 3D-печати фотополимерным материалом, воспроизводящим свойства силиконов и полиуретанов, деформация может включать упругую составляющую, приводящую к искажению геометрических размеров изделия в процессе и по окончании 3D-печати.

Технологические свойства определяют состав и перерабатываемость полимера в изделие. Температура стеклования и молекулярная масса чувствительны к составу полимера; перерабатываемость определяется температурно-скоростным режимом об-

работки и параметрами режима 3D-печати, относящимися к оборудованию, реализующему DLP- либо LCD-технологиию.

Термические (теплофизические) свойства характеризуют способность полимерного материала изменять свои физические характеристики, зависящие от температуры, определяют возможность и параметры его переработки в изделие, а также свойства полимерного изделия в процессе его эксплуатации. К таким свойствам, например, могут быть отнесены механические свойства. Одной из существенных характеристик является температура стеклования. Для фотополимерных материалов для 3D-печати по технологии «фотополимеризация в ванне» эффект стеклования наблюдается в минусовой области температур по шкале Цельсия.

Механические свойства определяют качество изделия и характеризуют способность материала изделия воспринимать внешнюю нагрузку без нарушения его сплошности. К ним относят предел текучести, предел прочности (временное сопротивление), твердость, относительное удлинение. Механические свойства чувствительны к изменению теплофизических свойств и, соответственно, технологических, реологических и электрических свойств.

В последнее время появилось большое количество работ, в которых исследуются свойства изделий из фотополимерных и термопластичных материалов, главным образом механические, полученных с помощью 3D-печати при различных режимах печати и способах постобработки. Работ, в которых исследуются электрические свойства, значительно меньше [2–10].

В данной статье приводится оценка свойств фотополимерных материалов, отличающихся друг от друга по температуре стеклования и динамической вязкости, — электрических свойств (диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь) и механических свойств. Результаты наших исследований позволят расширить данные о свойствах современных фотополимерных материалов, применяемых для LCD-печати.

В таблице 1 показаны характеристики исследуемых материалов. Измерения проведены в исходном, неотвержденном состоянии фотополимерных мате-

Таблица 1. Характеристики фотополимерных материалов

Условное наименование фотоотверждаемого полимерного материала для LCD-3D-печати	Значение характеристики		
	Температура (средняя) стеклования, °C	Динамическая вязкость при температуре, мПа·с	
		25° C	50° C
Anycubic Standard Clear v2	-67,08	330,0	70,8
eSun Standard Clear	-67,78	266,0	62,4
Phrozen Aqua-Clear	-78,38	717,0	22,5
Anycubic ABS-like + Translucent Green	-68,60	151,0	37,2
Phrozen ABS-like-Creamy White	-73,48	719,0	22,6

Таблица 2. Режимы 3D-печати фотополимерных материалов

Параметр режима 3D-печати	Значение параметра для материала	
	Anycubic Standard Clear v2	Anycubic ABS-like + Translucent Green
Толщина слоя, мм	0,050	0,050
Время засветки (погmal), с	2,00	2,50
Пауза в нижнем положении (off time), с	0,50	0,50
Время засветки базовых (нижних) слоев (bottom), с	40,00	40,00
Количество базовых (нижних) слоев	6	6
Anti-alias	1	1
Высота подъема рабочей платформы (Z lift distance), мм	6,00	6,00
Скорость подъема рабочей платформы (Z lift speed), мм/с	4,00	6,00
Скорость опускания рабочей платформы (Z retract speed), мм/с	6,00	4,00
Поддержки	нет	нет
Заполнение, %	100	100
Количество слоев	20	20

риалов. Исключение составляет твердость по Шору, измеренная на образцах, изготовленных по технологии LCD-печати.

Определение температуры стеклования выполнено методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с применением прибора компании Mettler Toledo. По результатам испытания определена средняя температура стеклования. Режим проведения опыта по методу ДСК: нагрев в диапазоне от $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в среде N2.

Динамическая вязкость определялась методом ротационной реометрии с применением реометра Physica MCR301 (Anton Paar; компания «Аврора», г. Москва). Рабочий узел конус – плоскость, с диаметром конуса 50 мм, угол конусности 1° . Испытания проводились в условиях стационарного течения в режиме сканирования по температуре в диапазоне $25\text{--}55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Скорость нагревания $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, постоянная скорость сдвига 20 с^{-1} (для образцов Anycubic Standard Clear v2, Anycubic ABS-like + Translucent Green) и 50 с^{-1} (для образцов

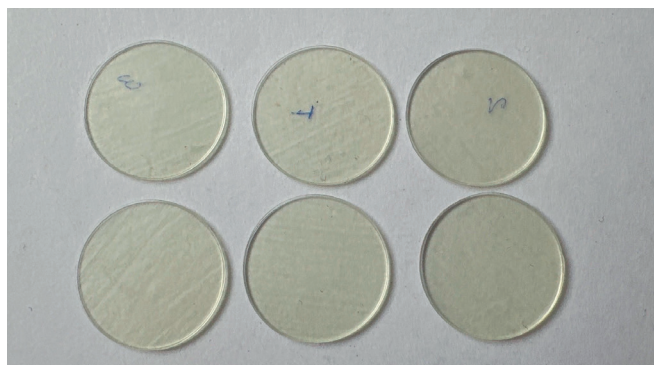
eSun Standard Clear, Phrozen Aqua-Clear, Phrozen ABS-like-Creamy White).

Образцы для определения электрических свойств изготавливали в форме диска с размерами: диаметр 20,0 мм и толщина 1,0 мм. В таблице 2 представлено описание параметров, характеризующих режим 3D-печати образцов для испытания электрических свойств.

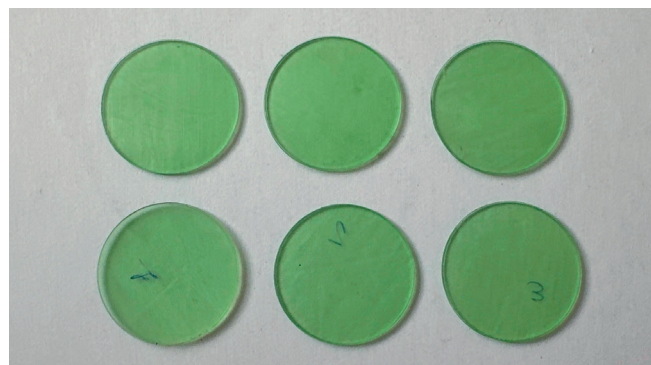
Диэлектрическая проницаемость фотополимерных материалов образцов после их обработки по LCD-технологии 3D-печати может быть оценена методом широкодиапазонной диэлектрической спектроскопии с использованием прецизионного измерителя LRC в диапазоне частот от 20 Гц до 5 МГц. Внешний вид образцов показан на рис. 4, из каждого материала изготавливали по шесть образцов.

В соответствии с ГОСТ 22372-77 характеристическими значениями частоты, для которой оценивается диэлектрическая проницаемость, являются: 100 Гц, 1 кГц, 100 кГц, 1 МГц. Далее анализируем полученные результаты и их сопоставимость со значением ди-

Рис. 4. Внешний вид образцов для испытания



а) Anycubic Standard Clear v2



б) Anycubic ABS-like + Translucent Green

Таблица 3. Значения диэлектрической проницаемости фотополимерных материалов

Тип образца	Расчетное значение диэлектрической проницаемости (см. формулу 1)					Справочное значение диэлектрической проницаемости материала-аналога [13, 14]
	100 Гц	1 кГц	100 кГц	1 МГц	среднее	
Anycubic Standard Clear v2	3,834	3,759	3,617	3,489	3,663	2,7–4,5 (акриловая смола — основа большинства фотополимеров)
Anycubic ABS-like + Translucent Green	3,495	3,386	3,212	3,085	3,289	2,4–5,0 (АБС-пластик, акрилонитрилбутадиенстирол)

Таблица 4. Значения тангенса угла диэлектрических потерь фотополимерных материалов

Тип образца	Измеренное значение $\text{tg } \delta$				Справочное значение диэлектрической проницаемости материала-аналога [15–20]	
	100 Гц	1 кГц	100 кГц	1 МГц		
Anycubic Standard Clear v2	0,0074	0,0105	0,0169	0,02262	Эпоксидные смолы отвержденные	0,02–0,2 (частота 10^3 – 10^5 Гц)
Anycubic ABS-like + Translucent Green	0,0220	0,0152	0,0192	0,02425	АБС-пластики	0,008–0,020

электрической проницаемости полимерных материалов-аналогов.

Результаты и обсуждение

В таблице 3 представлены расчетные значения диэлектрической проницаемости для исследованных фотополимеров; в таблице 4 — значения тангенса $\text{tg } \delta$.

Полученные значения диэлектрической проницаемости для каждого из фотополимерных материалов показывают взаимосвязь с частотой электрического поля. Увеличение частоты приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости (см. таблицу 3).

Определение механических свойств (предел прочности; относительное удлинение) выполнено методом растяжения образцов. Форма и размеры образцов (тип А12, ГОСТ 11262-2017 и ГОСТ 33693-2015) представлены в таблице 5.

Испытания на растяжение проводились на универсальной испытательной установке «Tinius Olsen 50ST» двухколонного типа с максимальной нагрузкой 50 кН (5000 кгс). До начала испытаний замерялось при помощи штангенциркуля поперечное сечение каждого образца исследуемого материала; после установки и закрепления каждого образца в захваты испытательной установки — расстояние между захватами; в процессе проведения испытаний регистрировали текущее значе-

Таблица 5. Размеры образца для испытания на растяжение

Параметр	Значение
Образец для испытания на одноосное растяжение	Тип А12
Общая длина L , мм	75,0
Расстояние между широкими частями с параллельными сторонами L_1 , мм	58,0
Ширина головки b_2 , мм	10,0
Ширина узкой (рабочей) части b_1 , мм	5,0
Толщина h , мм	2,4
Радиус закругления r , мм	30,0

ние силы растяжения и величину перемещения активного захвата испытательной установки. В результате автоматической обработки данных об испытании определялись значения предела прочности и относительное удлинение (таблица 6).

Выводы

1. Выполненные в данной работе исследования показали, что диэлектрическая проницаемость большинства образцов, изготовленных с использованием 3D-печати по технологии LCD, практически не отличается от свойств образцов, изготовленных традиционными методами.

Таблица 6. Размеры образца для испытания на растяжение

Тип образца	Предел прочности, МПа		Относительное удлинение, %	
	ориентация 0 градусов	ориентация 90 градусов	ориентация 0 градусов	ориентация 90 градусов
Anycubic Standard Clear v2	54,4	55,7	5,78	4,84
Anycubic ABS-like + Translucent Green	44,03	41,05	7,59	6,935

2. Сходство значений диэлектрической проницаемости исследуемых фотополимеров (таблица 3) может свидетельствовать о сплошности образцов, изготовленных по технологии LCD.

3. Сходство значений температуры стеклования исследуемых фотополимеров (таблица 1) не может являться однозначным показателем, определяющим комплекс прочих свойств. Исследуемые материалы характеризуются динамической вязкостью, различающейся примерно в два раза при комнатной температуре. Это, возможно, приводит к несколько различным настройкам 3D-печати (время засветки и скорость подъема, см. таблицу 2). Влияние температуры стеклования на механические свойства возможно сопоставить, ориентируясь на полученные значения (см. таблицу 6). Материал с большей вязкостью характеризуется более высоким значением диэлектрической проницаемости, предела прочности (см. таблицу 1 и 6) и, соответственно, меньшим значением относительного удлинения.

4. Тангенс угла диэлектрических потерь исследованных в данной работе фотополимеров практически не изменяется при увеличении частоты электрического поля (таблица 4).

5. Величины тангенса угла диэлектрических потерь, полученные в данной работе, варьируются от 0,01 до 0,024, что свидетельствует о том, что все исследуемые материалы являются диэлектриками и могут использоваться для изготовления электроизоляционных изделий, предназначенных для работы в слабых и средних электрических полях. Изделия, изготовленные из исследуемого фотополимера Anycubic ABS-like+ с использованием 3D-печати по технологии LCD, могут заменить изделия, изготавливаемые из ABS-пластика по классической технологии.

6. Полученные значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь могут быть использованы для выбора материала при проектировании изделий и их последующего изготовления из исследованных фотополимеров с применением LCD аддитивной технологии. ■

Литература

1. Вивтоненко А.С., Таксимбаева Д.А., Петров П.А., Шмакова Н.С., Чмутин И.А. Контроль пористости формообразующего инструмента из СБС-пластика // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 8. С. 680–686.
2. Chaudhary, R., Fabbri, P., Leoni, E., Mazzanti, F., Akbari, R., Antonini, C.: Additive manufacturing by digital light processing: a review // Progress in Additive Manufacturing. 2023. 8 (2). 331-351. doi: 10.1007/s40964-022-00336-0.
3. Taormina G., Sciancalepore C., Messori M., Bondioli F. 3D printing processes for photocurable polymeric materials: technologies, materials, and future trends // Journal of Applied Biomaterials and Functional Materials. 2018. 16 (3). 151–160. doi: 10.1177/2280800018764770.
4. Swetha S., Sahiti T.J., Priya G. S. et al. Review on digital light processing (DLP) and effect of printing parameters on quality of print // Interactions. 2024, 245 (178). doi: 10.1007/s10751-024-02018-5.
5. Malas A., Isakov D., Couling K., Gibbons G.J. Fabrication of High Permittivity Resin Composite for Vat Photopolymerization 3D Printing: Morphology, Thermal, Dynamic Mechanical and Dielectric Properties // Materials (Basel). 2019, 12, 3818. doi: 10.3390/ma12233818.
6. Huang P., Fu H., Tan M. W.M., Jiang Y., Lee P. S. Digital Light Processing 3D-Printed Multilayer Dielectric Elastomer Actuator for Vibrotactile Device // Adv. Mater. Technol. 2024, 9, 2301642. doi: 10.1002/admt.202301642.
7. Monkevich J.M., Le Sage, G. P. Design and Fabrication of a Custom-Dielectric Fresnel Multi-Zone Plate Lens Antenna Using Additive Manufacturing Techniques // IEEE Access. 2019, 7, 61452-61460. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2916077.
8. Wu Y., Isakov D., Grant P. S. Fabrication of Composite Filaments with High Dielectric Permittivity for Fused Deposition 3D Printing // Materials. 2017, 10, 1218. doi: 10.3390/ma10101218.
9. Fu Y., Li W., Xu M., Wang Ch., Zhang L., Zhang G. Dielectric Properties and 3D-Printing Feasibility of UV-Curable Resin/Micron Ceramic Filler Composites // Advances in Polymer Technology. 2022, 15, 1-14. doi: 10.1155/2022/9483642.
10. Tsolakis, I.A.; Papaioannou, W.; Papadopoulou, E.; Dalampira, M.; Tsolakis, A. I. Comparison in Terms of Accuracy between DLP and LCD Printing Technology for Dental Model Printing // Dent. J. 2022, 10, 181. doi: 10.3390/dj10100181.
11. Вивтоненко А.С., Таксимбаева Д. А., Петров П. А., Шмакова Н. С., Чмутин И. А. Электрические свойства СБС-пластика после 3D-печати по экструзионной технологии // Аддитивные технологии. 2023. № 3. С. 24–27.
12. Поляков К.А., Баранов Т. В., Булич И. Ю., Петров П. А., Шмакова Н. С., Чмутин И. А. Электрические свойства ТПУ-пластика после 3D-печати по экструзионной технологии // Аддитивные технологии. 2024. № 2. С. 58–65.
13. Диэлектрическая проницаемость некоторых материалов [электронное издание] URL: <https://rusautomation.ru/articles/dielektricheskaya-pronitsaemost/>
14. АБС-пластик [электронное издание] URL: <https://nvph.ru/abs-plastik/>
15. Энциклопедия Полимеров. Ред. коллегия: В.А. Каргин и др. Т. 3 – М., «Советская Энциклопедия», 1974. С. 581.
16. Референсные значения тангенса угла диэлектрических потерь наиболее часто применяемых диэлектриков [электронное издание] URL: <https://test-energy.ru/tangens-ugla-dielektricheskikh-poter/>
17. Электронный справочник: Значения тангенса угла диэлектрических потерь tg δ некоторых полярных полимеров при 20 °С [электронное издание] URL: <https://www.chemport.ru/data/data254.shtml>
18. Электрические свойства полимерных материалов [электронное издание] URL: <https://radioprogram.ru/post/663>
19. Нейлон, Полиамид 66 что это? [электронное издание] URL: <https://r-meister.ru/info/nejlon-poliamid-66/>
20. Шевелев А.В., Михайлова О.В. Разделение воска и меда, с учетом диэлектрических характеристик // Научный электронный журнал «Меридиан». 2020, выпуск № 13(47). С. 1–9.
21. О заливочных компаундах [электронное издание] URL: <https://alet.pro/blog/o-zalivochnyh-kompaundah/>

Технологии получения резьбовых соединений изделий аддитивного производства

Андрей Николаевич Афонин,
профессор кафедры информационных и робототехнических систем НИУ БелГУ
E-mail: aamru@yandex.ru

Резьбовые соединения являются наиболее распространенным видом разъемных соединений деталей. Они отличаются универсальностью, удобством применения и надежностью. В связи с этим они сохраняют свое значение и для изделий, получаемых с помощью аддитивных технологий. Однако получение их на данных изделиях вызывает существенные технологические трудности [1, 2]. Резьбовые поверхности имеют достаточно сложную форму и при этом требуют обеспечения относительно высокой точности изготовления для их взаимного сопряжения. Это делает их формирование аддитивными способами непростой задачей. Рассмотрим применяемые на сегодняшний день способы ее решения на примере деталей, получаемых наиболее распространенной в настоящее время технологией FDM (экструзия расплавленного материала на поверхность). Рассматриваемые подходы, впрочем, во многом справедливы и для других аддитивных технологий.

Как правило, на получаемых 3D-печатью деталях формируются внутренние резьбы, так как в качестве сопрягаемых с ними деталей с наружной резьбой обычно используются стандартные крепежные изделия: болты, винты и шпильки. В связи с этим рассмотрим особенности изготовления внутренних резьб. Так же как и в любых пластмассовых изделиях, в изготовленных по FDM-технологии деталях они могут быть получены следующими способами [3]:

1. Непосредственной 3D-печатью резьбы.
2. Нарезанием резьбы метчиками или самонарезающими винтами.

3. Установкой в деталях металлических резьбовых вставок.

Рассмотрим эти способы более подробно.

3D-печать резьбы

Непосредственная 3D-печать резьбы представляется на первый взгляд наиболее логичным способом ее получения в аддитивном производстве. Однако, как уже было сказано выше, получение резьбовых поверхностей аддитивными методами вызывает значительные трудности. Напечатанная по FDM-технологии резьбовая поверхность будет иметь значительные погрешности, вызванные слоистостью детали, усадкой материала и т.д.

Значительное влияние на качество получаемой 3D-печатью резьбы оказывает ориентация резьбового отверстия относительно стола принтера. Установлено, что удовлетворительного качества резьбы можно добиться, только если ее ось будет перпендикулярна столу [1]. В дальнейшем будем рассматривать только такой случай.

При расположении резьбового отверстия перпендикулярно столу слоистость детали вызывает погрешность вследствие того, что слои при печати будут иметь форму тора, не совпадающего с теоретическим геликоидом резьбовой поверхности (рис. 1, для наглядности показана наружная резьба). Программа-слайсер, задающая траекторию перемещения печатающей головки, будет позиционировать точки этого тора, имеющие наибольший диаметр, по теоретическому профилю резьбы. Величину

Рис. 1. Слоистость детали при 3D-печати резьбы шагом 2 мм с разной толщиной слоя

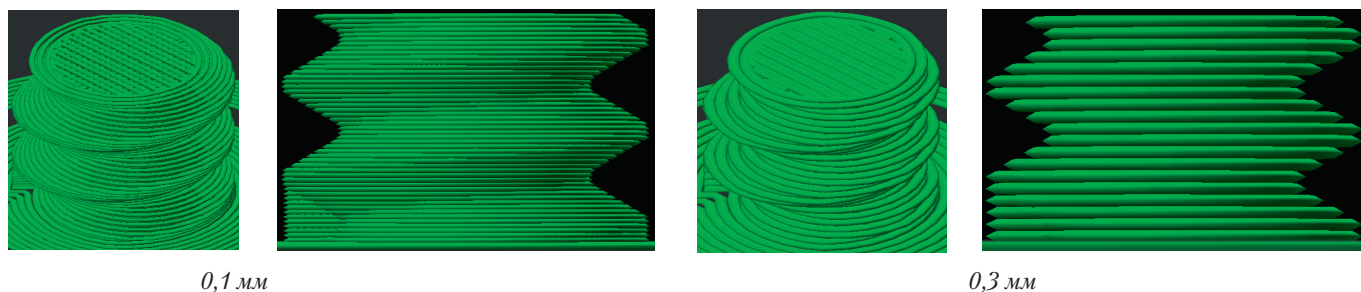
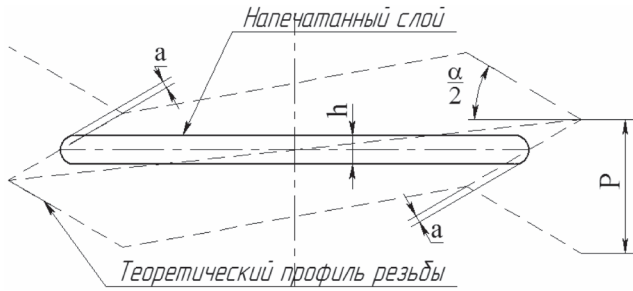


Рис. 2. Схема для определения погрешности резьбы, вызванной слоистостью детали



погрешности, вызванной слоистостью детали, можно определить, исходя из геометрических соображений. Для треугольной резьбы (рис. 2) она будет равна [2]:

$$\alpha = h \frac{1 - \sin(\alpha/2)}{2}, \quad (1)$$

где h — толщина слоя, мм,
 α — угол профиля резьбы.

Для компенсации погрешности резьбы от слоистости детали с целью обеспечения собираемости соединения можно увеличить диаметр резьбы в отверстии детали (рис. 3), что, однако, приведет к снижению прочности резьбового соединения.

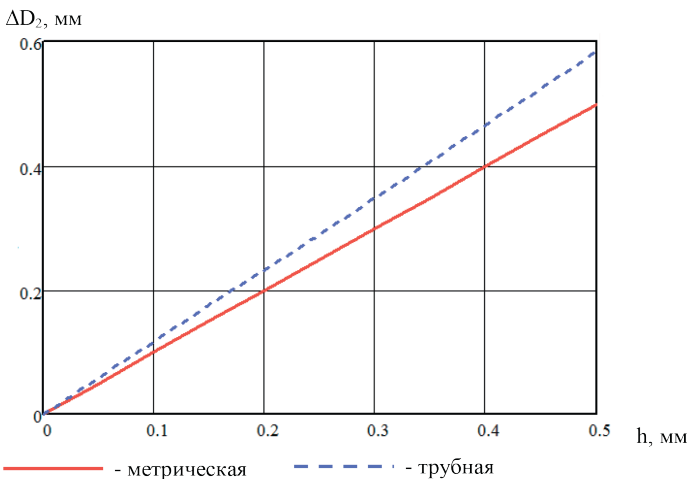
Если толщина слоя при 3D-печати будет больше, чем ширина выступа или впадины резьбы, искажение резьбового профиля будет столь значительно, что сборка соединения станет невозможной. Следовательно, 3D-печать метрической резьбы по FDM-технологии возможна только при выполнении условия [4]:

$$h < P/8, \quad (2)$$

где P — шаг резьбы, мм.

При необходимости печатать резьбы меньшего шага можно уменьшить погрешность, увеличив угол профиля резьбы до 90° или используя полукруглую резьбу. Однако в данном случае потребуются изготавливать

Рис. 3. Приращение среднего диаметра внутренней резьбы для компенсации погрешности от слоистости детали



такую же нестандартную наружную резьбу на сопрягаемой детали, что в большинстве случаев будет затруднительно.

При 3D-печати крупных резьб с шагом больше 3 мм может возникнуть потребность в подержках, удаление которых из резьбового отверстия является нетривиальной задачей.

Другим фактором, влияющим на точность резьбы при 3D-печати по технологии FDM, является усадка материала при остывании детали. Она приводит к уменьшению диаметра отверстия. Величина усадки зависит от материала и размеров детали и условий печати и в настоящее время не может быть определена теоретически. Для определения размеров детали с учетом усадки требуется проведение экспериментов.

Нарезание резьбы метчиками или самонарезающими винтами

Нарезание внутренней резьбы по целому метчиками или самонарезающими винтами в деталях, полученных FDM-технологией, из-за хрупкости применяемых пластмасс приводит к возникновению дефектов [5], например, частичному выкрашиванию витков нарезаемой резьбы. Особенно сильно выкрашивается резьба при использовании самонарезающих винтов. Наличие дефектов снижает прочность резьбового соединения и резко ограничивает количество возможных циклов его сборки/разборки. В связи с этим данный способ резьбоформообразования имеет ограниченное применение.

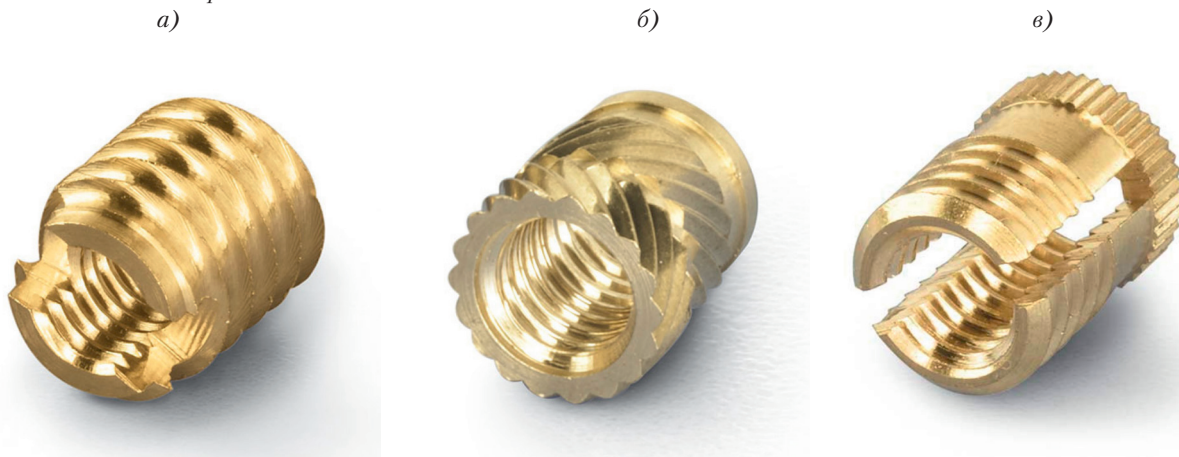
При калибровке предварительно напечатанной резьбы метчиком дефектов будет значительно меньше [6]. В связи с этим такая комбинированная технология является вполне приемлемой. Калибровку напечатанной резьбы рекомендуется производить вручную, чтобы обеспечить попадание зубьев метчика в резьбовую канавку.

В отверстиях под нарезание или калибрование резьбы метчиком необходимо делать канавки для выхода резьбы по ГОСТ 10549-80.

Установка резьбовых вставок

Металлические вставки являются наиболее оптимальным способом формирования внутренних резьб на деталях, полученных FDM-технологией. Они представляют собой латунные или стальные втулки (рис. 3), на внутреннюю поверхность которых нанесена требуемая резьба, а на внешней имеются рифления, обеспечивающие прочную фиксацию вставки в детали. Резьбовые вставки устанавливаются в гладкие цилиндрические отверстия деталей путем холодной запрессовки (рис. 4а), запрессовки с нагревом (рис. 4б) или вкручивания (рис. 4в) [3]. Вставки для холодной запрессовки имеют коническую форму с прорезями и при вкручи-

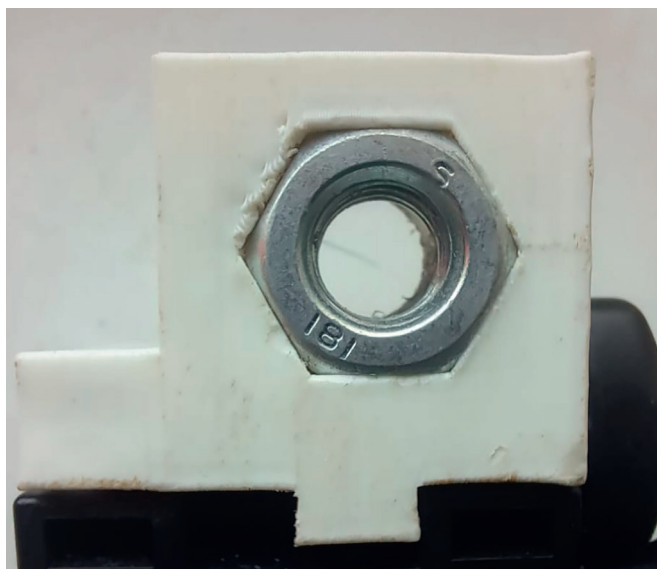
Рис. 4. Металлические резьбовые вставки для пластмассовых деталей



вании в них детали с наружной резьбой раскрываются подобно дюбелям. Вставки для запрессовки с нагревом устанавливаются с помощью паяльника, оплавляя пластик в отверстии детали. Вставки для вкручивания представляют собой самонарезающие винты. Диаметр отверстия в детали под установку вставок должен быть равен внутреннему диаметру рифлений на вставке. Обычно припуск составляет около 0,5 мм на диаметр.

В качестве металлической резьбовой вставки также могут использоваться обычные гайки (рис. 5). Так как поле допуска наружного размера гайки под ключ задается по h13 или h14, оно будет превосходить по величине допускаемые натяги в соединении, и гарантированный натяг при запрессовке гайки в отверстие может быть обеспечен без опасности появления трещин в детали только при селективной сборке. При этом прочность сцепления гайки с отверстием в любом случае будет ниже, чем прочность сцепления рифленых поверхностей специальных резьбовых вставок. В связи с этим гайки не рекомендуется использовать в качестве резьбовых вставок при наличии знакопеременных осевых нагрузок

Рис. 5. Шестигранная гайка в качестве резьбовой вставки



на соединение. Повысить прочность сцепления гайки с отверстием при необходимости можно с помощью клея.

Для расчета максимально допустимого натяга N_{max} при запрессовке гладкой вставки в отверстие можно воспользоваться известной формулой для гладких соединений с натягом [7]:

$$N_{max F} = P_{max} \cdot d \left(\frac{C_D}{E_D} + \frac{C_d}{E_d} \right), \quad (3)$$

где d – наружный размер вставки (для гайки размер под ключ), мм,

ED, Ed – модули упругости материала детали и гайки, Н/м²,

P_{max} – максимально допустимое давление, которое определяют из условия прочности сопрягаемых деталей. В качестве P_{max} берется меньшее из значений давлений для вала и втулки. Для стальной вставки и отверстия в пластмассовой детали таковым будет давление для детали:

$$P_{доп} = 0,58 \cdot \sigma_{T,D} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{d_2} \right)^2 \right];$$

где σ_T – предел текучести материала детали, Н/м²,

C_D, C_d – коэффициенты, определяемые по формулам:

$$C_D = \frac{\left[1 + \left(\frac{d}{d_2} \right)^2 \right]}{\left[1 - \left(\frac{d}{d_2} \right)^2 \right]} + \mu_D; \quad C_d = \frac{\left[1 + \left(\frac{d_1}{d} \right)^2 \right]}{\left[1 - \left(\frac{d_1}{d} \right)^2 \right]} - \mu_d$$

где d_1 – внутренний диаметр резьбы вставки, мм, d_2 – наружный размер детали в зоне отверстия, мм, μ_D и μ_d – коэффициенты Пуассона материалов детали и вставки.

Недостатком резьбовых вставок является то, что для резьб крупнее М10 их применение становится затруднительным, поскольку размеры вставок становятся достаточно большими и их запрессовка в отверстие может приводить к растрескиванию детали.

Выводы

Разнообразие существующих технологий позволяет создавать резьбовые соединения деталей, полученных аддитивными способами, по прочности не уступающие прочности основного тела деталей.

Наиболее высокие характеристики резьбового соединения по прочности и точности обеспечивают металлические резьбовые вставки. При этом их характеристики не зависят от ориентации резьбового отверстия при 3D-печати детали, то есть от расположения слоев. Следовательно, металлические вставки могут быть рекомендованы в качестве основного способа формирования внутренних резьб небольших размеров в ответственных нагруженных деталях, получаемых аддитивными технологиями.

Для относительно крупных резьб (M12 и более) становится возможным изготовление резьбы непосредственно 3D-печатью по FDM-технологии. Однако получение качественного резьбового соединения таким способом потребует экспериментальной подборки размеров резьбы и режимов ее формирования. Для повышения качества напечатанной резьбы возможна ее калибровка метчиками.

Приведенные рекомендации справедливы и для других аддитивных технологий за исключением того, что с помощью таких технологий, как стереолитография и струйная 3D-печать, могут быть непосредственно получены качественные внутренние резьбы меньшего диаметра [8].

Литература

1. Diciu V. Study regarding the Printing of Metric Threads on a FDM 3D printer. Scientific Bulletin, Serie C, Fascicle: Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology. Vol. 2019. No. XXXIII.
2. Tronvoll S.A., Elverun C. W., Welo T. Dimensional accuracy of threads manufactured by fused deposition modeling. Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 26. Pp. 763–773.
3. Brennan N. The Best Ways to Add Screw Threads to 3D Printed Parts. 07.06.2023 <https://www.nklabs.com/post/screw-threads-3d-printed-parts>.
4. Фарниев А.С., Новиков П.А. Математическая модель точности аддитивной печати профиля внутренней резьбы в зависимости от параметров деления 3D-модели // Современные технологии: проблемы и перспективы. Сб. статей всеросс. научно-практ. конф. Севастополь, 2021. С. 5–10.
5. Нефёлов И.С., Баурова Н.И. Особенности изготовления и структура резьбовых поверхностей в деталях, изготовленных методами 3D-печати В сб.: Энергоресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительных отраслях. Матер. междунар. научно-практ. конф. Белгород, 2017. С. 169–176.
6. Фарниев А.С., Новиков П.А. Точность внутренних резьб, полученных комбинированными методами механической обработки и аддитивными технологиями // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2021. № 3 (73). С. 176–181.
7. Берникер Е.И. Посадки с натягом в машиностроении. Справочное пособие. М.: Машиностроение, 1966. 168 с.
8. Kajzer W., Gieracka K., Pawlik M., Basiaga M. Tests of Threaded Connections Made by Additive Manufacturing Technologies. Innovations in Biomedical Engineering. 2019. Pp. 329–337.

The advertisement features a dark blue background with a network of glowing lines and several 3D cubes in shades of blue and yellow. On the left, a dark blue box contains the 'rosmould' logo in white and yellow, a QR code, and the website 'rosmould.ru'. A central white box with a light blue border contains the text: 'Международная выставка пресс-форм, штампов, инструмента и производственных технологий' and '17–19 июня 2025 МВЦ «Крокус Экспо», Москва'. At the bottom left, a yellow box with a blue border says '20 ЛЕТ в отличной форме'. At the bottom right, the 'GEFERA MEDIA' logo is visible.

Дефекты экструзионной 3D-печати

К.С. Ерохин, С.А. Наумов, В.П. Анаников
Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского
val@ioc.ac.ru, valentin.ananikov@gmail.com

Метод послойного наплавления 3D-печати (Fused Filament Fabrication, FFF) играет ключевую роль в современных производственных процессах благодаря своей доступности, универсальности и способности создавать структуры сложного строения. Однако дефекты, возникающие в процессе печати, значительно снижают качество и функциональность изделий, что ограничивает применение этой технологии в критически важных областях. Предотвращение и минимизация дефектов являются необходимыми условиями для повышения надежности и долговечности продукции. В этом контексте разработанная нами классификация дефектов, основанная на их размере, топологии, природе и локализации, предоставляет важный инструмент для систематического анализа и предотвращения образования дефектов, способствуя повышению качества и прогнозированию характеристик напечатанных изделий.

Введение

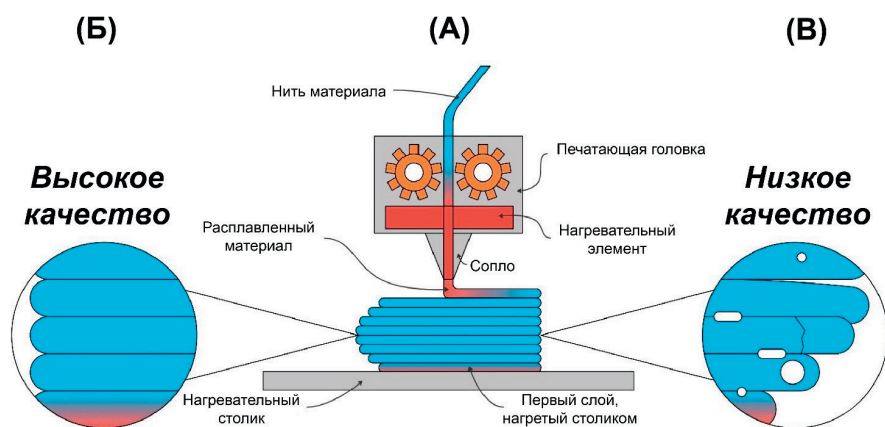
Развитие аддитивных технологий, в частности экструзионной 3D-печати методом FFF (Fused Filament Fabrication), демонстрирует стремительный рост в последние годы. Этот прогресс обусловлен несколькими ключевыми факторами: 1) во-первых, удешевление и повсеместная распространенность оборудования для FFF- и SLA-печати (stereolithography) сделали эту технологию доступной не только для профессионалов, но и для широкого применения; 2) во-вторых, значительное улучшение качества материалов, включая разработку новых полимеров и композитов, расширило возможности применения FFF в различных отраслях, от прототипирования до массового производства; 3) в-третьих, развитие программного обеспечения для 3D-моделирования и подготовки к печати, а также совершенствование алгоритмов управления процессом позволили достичь большей точности и предсказуемости результатов. Немаловажна поддержка и развитие открытого сообщества: обмен опытом и идеями способствует быстрому внедрению инноваций и совершенствованию технологий. В совокупности эти факторы привели к тому, что FFF стала одной из наиболее востребованных и динамично развивающихся технологий в сфере 3D-печати, способствуя переходу от концептуальных моделей к полноценным функциональным изделиям.

Аддитивные технологии, включая FFF, оказывают значительное влияние на различные отрасли жизни человека. В здравоохранении эти технологии позволяют создавать индивидуализированные медицинские изде-

лия, такие как протезы, ортопедические имплантаты и модели для планирования хирургических операций, что значительно улучшает качество лечения и восстановления пациентов. В производственной сфере 3D-печать открывает новые возможности для быстрого прототипирования и малосерийного производства, что сокращает время выхода продукта на рынок и снижает производственные затраты. В автомобильной и аэрокосмической отраслях аддитивные технологии применяются для создания легких, но прочных деталей, которые могут существенно снизить вес транспортных средств, что, в свою очередь, приводит к экономии топлива и уменьшению вредных выбросов. В образовании и науке 3D-печать способствует более эффективному обучению, позволяя студентам и исследователям создавать и тестировать физические модели, что упрощает понимание сложных концепций и ускоряет научные открытия. Также в сфере искусства и дизайна FFF открывает новые горизонты для создания уникальных произведений и экспериментальных форм, ранее недоступных с использованием традиционных методов.

В научных исследованиях подчеркивается важность аддитивных технологий в химии, биохимии, фармацевтике и смежных областях [1]. 3D-печать открывает новые возможности в этих сферах, особенно благодаря доступности технологий и материалов для 3D-печати методами FFF и SLA. Эти методы позволяют создавать уникальные химические реакторы, смесители и другую лабораторную оснастку, оптимизированную для конкретных экспериментов. Кроме того, важность аддитивных технологий проявляется в возможности быстрого прототипирования и персонализированного производ-

Рис. 1. Схема процесса и возможные дефекты в экструзионной 3D-печати (FFF). (А) — принцип изготовления изделий методом FFF, (Б) — напечатанное изделие высокого качества, (В) — напечатанное изделие низкого качества, в котором присутствуют различные дефекты. Рисунок из работы [2] воспроизводится по лицензии СС-BY.



ства, что делает их незаменимым инструментом для научных исследований и образовательных целей.

Данные технологии способствуют развитию новых подходов в таких областях, как химия, биохимия, фармацевтика и образование [1]. В химии и биохимии эти технологии уже используются для создания уникальных химических реакторов, микрожидкостных систем и другой лабораторной техники, которая позволяет проводить эксперименты с высокой точностью и эффективностью. В фармацевтике 3D-печать открывает возможности для производства индивидуализированных лекарственных форм, таких как капсулы и таблетки, что улучшает эффективность лечения и позволяет адаптировать терапию под конкретного пациента. Также эти технологии найдут применение в производстве специальных инструментов и прототипов для научных исследований, что ускорит процессы разработки новых материалов и технологий. Практическое применение 3D-печати будет несомненно расширяться, охватывая все больше научных и промышленных областей.

Однако существенным сдерживающим фактором является низкое качество изделий. Минимизация и устранение дефектов в аддитивных технологиях, таких как FFF, являются критически важными для дальнейшего развития и внедрения их в производство новых продуктов [2]. Наличие дефектов в 3D-печатных изделиях может существенно снизить их качество и функциональность, делая их непригодными для использования, особенно в высокоточных и критических приложениях, таких как химические реакторы. Дефекты, возникающие из-за неправильных параметров печати или некачественных материалов, могут привести к ухудшенным механическим характеристикам (напр., прочности), нарушению герметичности и потере реакционной массы. Важно понимать причины возникновения дефектов и разрабатывать эффективные стратегии их предот-

вращения, чтобы обеспечить высокое качество конечных продуктов и расширить область применения аддитивных технологий. Без этого в области производства и научных исследований будет существенно затруднен, а потенциал 3D-печати останется недооцененным.

Дефекты при FFF-печати и их классификация

В недавнем аналитическом обзоре были рассмотрены дефекты, которые могут возникать в процессе 3D-печати методом FFF, описаны основные характеристики дефектов и предложена их систематическая классификация [2]. Дефекты разделены на категории по размеру, пространственной топологии, природе возникновения и месту их локализации.

Такой подход к классификации позволяет понять, какие параметры процесса печати или свойства материалов нужно регулировать, чтобы предотвратить возникновение этих дефектов.

На рис. 1А показан общий процесс, где нить материала подается в сопло и наносится на столик, а затем охлаждается и затвердевает, формируя слой за слоем. В идеале, как показано на рис. 1Б, этот процесс должен приводить к созданию идеально выровненных слоев с прочной адгезией между ними, обеспечивая высокое качество и точность готового изделия.

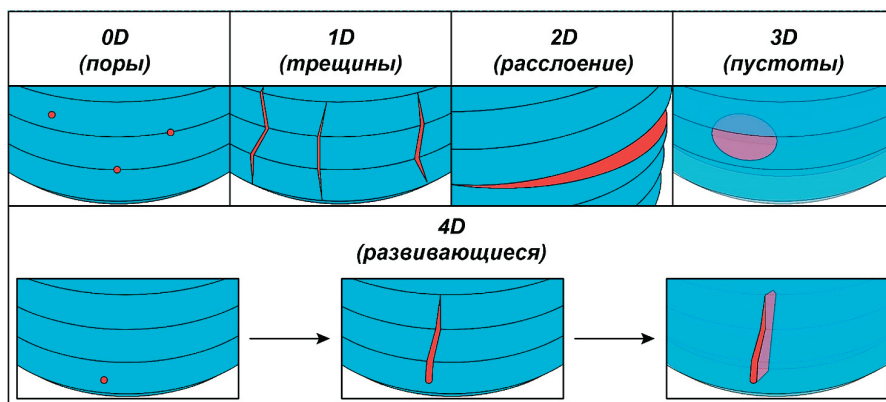
Однако на практике, как показано на рис. 1В, нагрев и последующее охлаждение термопласта могут вызвать возникновение внутренних напряжений, что приводит к деформациям и дефектам. Эти дефекты могут возникать на макро- и микроуровнях из-за изменений в объеме материала при его затвердевании, различий в скорости охлаждения, а также неоптимальных параметров печати. Такие факторы, как неправильные настройки температуры и скорости подачи, а также низкое качество материала, могут привести к формированию усадки, коробления, трещин, расслоения и других дефектов.

Таблица 1 описывает классификацию дефектов, возникающих в процессе FFF-печати, по четырем ключевым характеристикам: размеру, пространственной топологии, категории и локализации. Размер дефектов варьируется от сантиметров до ангстремов, что позволяет оценить их влияние на прочность и функциональные характеристики изделий. Пространственная топология включает дефекты от точечных (0D) до объемных (3D) и динамически меняющихся во времени (4D) (рис. 2). Категория дефектов определяется их природой — деформационные дефекты или отклонения от нормы ко-

Таблица 1. Общая классификация дефектов в продуктах, изготовленных методом печати FFF.
Таблица из работы [2], воспроизводится по лицензии СС-ВУ.

Дефект	Размерный диапазон	Пространственная топология	Категория	Локализация
Усадка	см	3D	Деформационный	Комбинированные
Коробление		3D		Комбинированные
Смещение слоев		3D		Комбинированные
Расслоение/ слабое связывание		2D		Внешние/внутренние/ комбинированные
Скручивание/ неровные углы		3D		Комбинированные
Пустоты	см/мм	3D/4D	Отклоняющиеся от нормы кол-во материала	Внешние/внутренние/ комбинированные
Нити		1D		Внешние
Переэкструзия	мм	2D/3D		Внешние/внутренние
Недоэкструзия		2D/3D		Внешние/внутренние
Ребристость		3D		Внешние
Трещины	мм/мкм	1D/2D/4D	Деформационный	Внешние/внутренние
Пузыри		0D	Отклоняющиеся от нормы кол-во материала	Внешние
Поры	мкм/нм	0D/4D		Внешние/внутренние
Молекулярные дефекты	Å	0D	–	Внешние/внутренние/ комбинированные

Рис. 2. Типы дефектов в зависимости от топологии. Рисунок из работы [2], воспроизводится по лицензии СС-ВУ.



фект, тем сильнее он влияет на механическую прочность, геометрию и внешний вид изделия. Например, крупные дефекты, такие как усадка или коробление, могут полностью изменить форму изделия и сделать его непригодным для использования, тогда как микроскопические дефекты, такие как поры, могут привести к снижению прочности и долговечности изделия. Кроме того, разные типы дефектов могут взаимодействовать друг с другом,

создавая более сложные комбинированные дефекты.

Рисунок 3 иллюстрирует схему различных типов дефектов, классифицированных по их размеру. На рисунке показаны пять основных категорий дефектов:

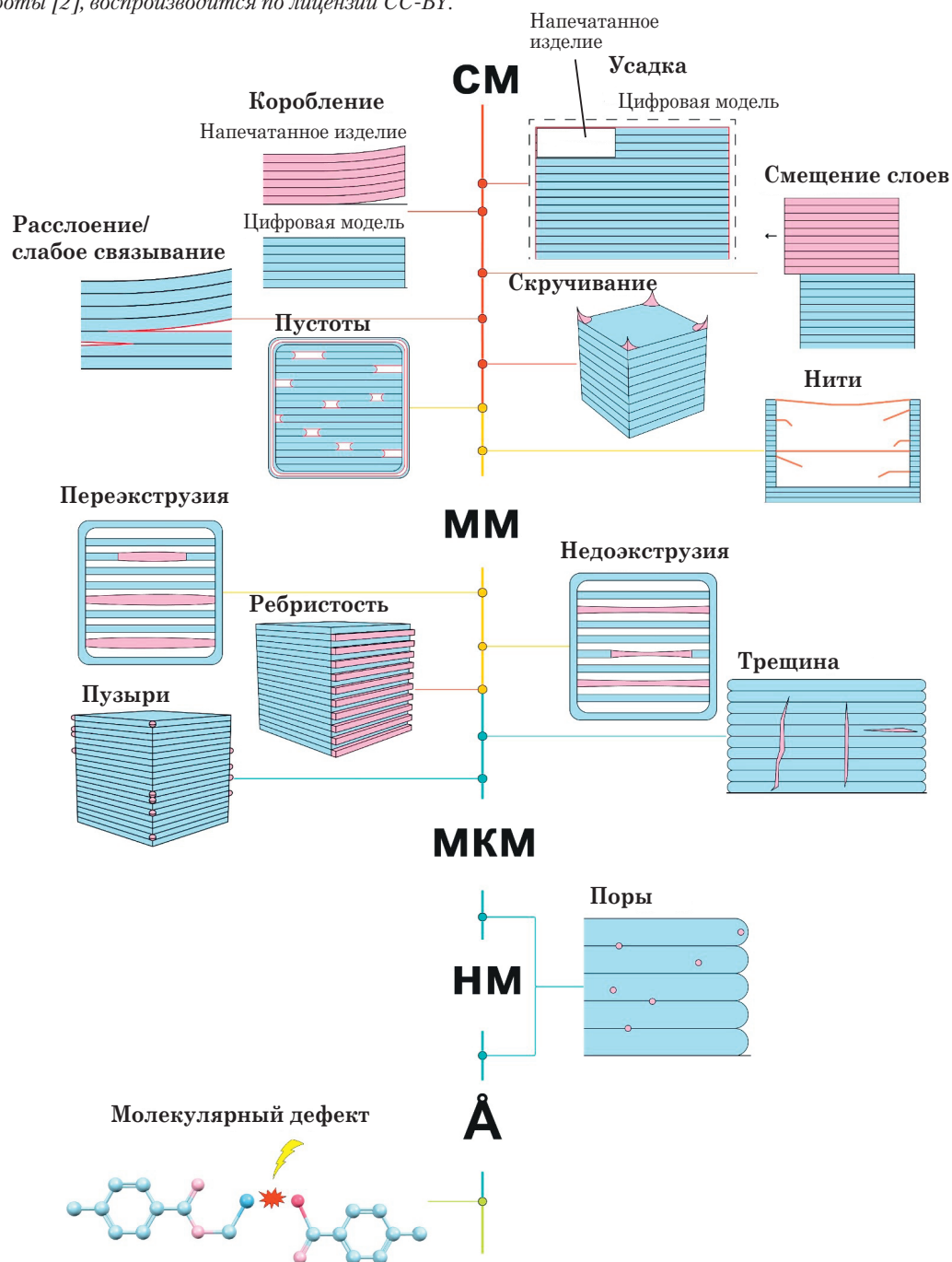
1. Сантиметровые дефекты. Это наиболее крупные дефекты, размер которых может достигать одного сантиметра или более. Примеры включают усадку, коробление и смещение слоев. Такие дефекты легко обнаруживаются визуально и оказывают сильное негативное влияние на форму и прочность изделия.

2. Миллиметровые дефекты. Их размер варьируется от одного до десяти миллиметров. К этой группе относятся такие дефекты, как полости, нити, переэкструзия и недоэкструзия.

личества материала. Локализация дефектов указывает, где они возникают: на поверхности изделия, внутри материала или одновременно и там, и там (комбинированные дефекты). Эта классификация помогает систематизировать подходы к выявлению, анализу и устранению дефектов, улучшая общее качество продукции, изготовленной методом FFF.

Размер дефекта играет ключевую роль в определении степени его влияния на свойства готового изделия. Дефекты различаются по размеру от крупных, видимых невооруженным глазом (сантиметрового и миллиметрового масштаба) до микроскопических и нанометровых, которые могут быть обнаружены только при использовании специальных методов анализа. Чем больше де-

Рис. 3. Схематичное изображение дефектов в соответствии с их размерами.
Рисунок из работы [2], воспроизводится по лицензии СС-ВУ.



3. Микрометровые дефекты. Размеры этих дефектов находятся в диапазоне от одного до тысячи микрометров. Примеры включают трещины, пятна и пустоты.

4. Нанометровые дефекты. Это очень мелкие дефекты, размеры которых меньше одного микрометра. К этой категории относятся пустоты на наноуровне.

5. Дефекты ангстремного диапазона. Самые маленькие дефекты, размер которых измеряется ангстремами. К этой категории относится молекулярный дефект, который приводит к разрушению полимерной цепи на молекулярном уровне.

Более крупные дефекты оказывают значительное влияние на свойства изделия, тогда как мелкие дефекты

могут быть менее заметными, но также могут приводить к ухудшению характеристик изделия при накоплении или взаимодействии с другими дефектами.

В статье [2] описаны различные типы дефектов, которые могут возникать при печати методом FFF. Графические материалы по дефектам 3D-печати дают подробную иллюстрацию для каждого типа дефектов [3]. Рассмотрим краткие описания каждого типа дефекта:

1. Усадка. Уменьшение объема материала во время его охлаждения и затвердевания, что приводит к деформации формы изделия и отклонению от заданных размеров.

Таблица 2. Причины формирования дефектов и способы их минимизации и устранения.
Таблица из работы [2], воспроизводится по лицензии СС-ВУ.

Дефект	Причина образования	Способ устранения/минимизации
Усадка	1) Быстрое охлаждение слоя 2) Влажный материал 3) Некачественный материал	1) Увеличение скорость печати 2) Увеличение высоты слоя 3) Сушка пластика
Коробление	1) Термомеханические напряжения в детали при охлаждении 2) Высокое отношение длины к ширине 3) Большая толщина стенки 4) Высокий процент заполнения	1) Постоянная температура окружающей среды 2) Очистка поверхности столика 3) Использование адгезивных средств 4) Уменьшение процента заполнения до менее чем 20 5) Использование не более двух или трех стенок по периметру 6) Увеличение числа полей (brim)
Смещение слоев	1) Неправильное перемещение экструдера	1) Проверка подвижной части осей системы позиционирования на наличие механических повреждений и люфтов 2) Оптимизация 3D-модели, чтобы избежать сложной для печати геометрии, особенно для моделей с большими выступающими частями, которые имеют тенденцию деформироваться во время печати
Расслоение/ слабое связывание	1) Сильная усадка материала 2) Недостаточная температура экструдера и/или нагревательного столика 3) Чрезмерный обдув и/или переохлаждение детали	1) Постоянная температура окружающей среды 2) Установка защитного кожуха области печати от потоков воздуха 3) Повышение температуры экструдера на 5–10°C
Скручивание	1) Прилипание к соплу и к экструдату перегретого или недостаточно охлажденного материала 2) Неконтролируемое вытекание материала	1) Уменьшение скорость печати 2) Увеличение интенсивности обдува детали 3) Уменьшение температуры экструдера на 5–10 °C
Пустоты	Плохая адгезия как между слоями, так и между отдельными частями потока	1) Увеличение температуры экструдера и/или столика 2) Уменьшение скорости печати 3) Уменьшение высоты слоя и увеличение ширины экструзии 4) Увеличение процента заполнения детали
Нити	1) Температура экструдера слишком высокая 2) Неправильные настройки втягивания материала	1) Уменьшение температуры экструдера и столика 2) Регулировка скорости втягивания в настройках слайсера
Переэкструзия	1) Высокая температура экструдера 2) Высокий коэффициент подачи материала	1) Уменьшение температуры экструдера 2) Уменьшение коэффициента подачи материала
Недоэкструзия	1) Низкая температура экструдера 2) Низкий коэффициент подачи материала	1) Увеличение температуры экструдера 2) Увеличение коэффициента подачи материала
Ребристость	1) Подается недостаточное количество материала 2) Неправильное положение по оси Z	1) Регулировка механики оси Z 2) Обеспечение чистоты сопла 3) Увеличение коэффициента подачи материала/ температуры экструдера
Трещины	Нагрузка при наличии пустот	1) Уменьшение пористости детали 2) Использование сопла с большим диаметром отверстия 3) Увеличение высоты слоя
Пузыри	1) Неправильные настройки втягивания в конечных точках перемещения 2) Нестабильный диаметр филамента	1) Регулировка настроек втягивания 2) Использование качественного филамента со стабильным диаметром
Поры	1) Накопление влаги в материале из-за его гигроскопичности 2) Низкая межслоевая адгезия материала во время печати	1) Сушка филамента 2) Увеличение температуры экструдера 3) Уменьшение высоты слоя и увеличение ширины экструзии 4) Увеличение процента заполнения детали
Молекулярный разрыв	Локальный перегрев прутка во время печати	1) Использование качественного филамента 2) Строгий температурный контроль

2. Коробление. Изменение плоскостности напечатанной детали, вызванное термомеханическими напряжениями, возникающими при охлаждении. Это может привести к поднятию углов или краев изделия, делая его непригодным для использования.

3. Смещение слоев. Неправильное позиционирование слоев относительно друг друга, что приводит к изменению формы детали и ухудшению ее механических свойств. Этот дефект часто вызван неправильным позиционированием печатающей головки принтера по осям при экструзии.

4. Расслоение/слабое связывание. Возникает из-за недостаточной адгезии между слоями, что приводит к образованию трещин вдоль слоев. Этот дефект снижает прочность изделия и может сделать его непригодным для использования.

5. Скручивание. Деформация верхних углов детали из-за перегрева или недостаточного охлаждения, что приводит к неправильной форме и снижению качества поверхности.

6. Пустоты. Полости внутри или между слоями, вызванные недостаточной адгезией или недостаточным количеством материала. Эти дефекты могут ослабить изделие и снизить его герметичность.

7. Нити. Образование тонких нитей материала между разными частями детали, вызванное неконтролируемым вытеканием материала из сопла. Образование нитей приводит к снижению качества поверхности изделия и требует дополнительной постобработки.

8. Переэкструзия. Подача избыточного количества материала, что приводит к отклонению формы изделия от цифровой модели и ухудшению его механических свойств.

9. Недоэкструзия. Недостаточная подача материала, что приводит к образованию полостей, пустот и снижению прочности изделия.

10. Ребристость. Неровная поверхность изделия, вызванная недостаточной подачей материала или проблемами с позиционированием по оси Z. Это ухудшает внешний вид и механические свойства изделия.

11. Трещины. Возникновение трещин в материале, особенно при использовании композитов. Эти дефекты снижают прочность и долговечность изделия.

12. Пузыри. Появление вздутий на поверхности изделия, вызванное неправильными настройками втягивания филамента или нестабильностью его диаметра.

13. Поры. Области внутри изделия, которые остаются незаполненными материалом. Эти дефекты могут снижать прочность и герметичность изделия, а также служить источником трещин.

14. Молекулярный дефект. Термическое разложение полимера из-за перегрева, приводящее к разрушению полимерной цепи и образованию новых про-

дуктов с измененными свойствами. Этот дефект может существенно изменить характеристики материала изделия.

Эти дефекты являются основными, с которыми сталкиваются при 3D-печати методом FFF, и их минимизация и устранение является важной задачей для повышения качества и надежности напечатанных изделий (таблица 2).

Алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ) играют все более важную роль в анализе и предотвращении дефектов в процессе 3D-печати. Использование ИИ позволяет значительно повысить качество продукции за счет автоматического обнаружения дефектов на ранних стадиях печати и оптимизации параметров процесса в реальном времени.

Одним из наиболее распространенных методов применения ИИ является машинное обучение, которое используется для анализа больших объемов данных, получаемых в процессе печати. Алгоритмы машинного обучения могут обучаться на основе опубликованных данных о 3D-печати, выявляя закономерности и предсказывая вероятные дефекты. Исходными данными являются текущие параметры печати, такие как скорость экструзии, температура сопла и стола, высота слоя и другие. Это позволяет заранее корректировать параметры, чтобы минимизировать риск возникновения дефектов, таких как коробление, расслоение, переэкструзия и другие.

Еще одним важным применением ИИ является использование компьютерного зрения для онлайн-детектирования дефектов. В сочетании с камерами высокого разрешения или цифровыми микроскопами ИИ может анализировать изображения слоев в процессе их нанесения и автоматически выявлять дефекты, такие как смещение слоев, наличие пустот или нитей. Это позволяет в режиме реального времени реагировать на выявленные проблемы и вносить коррективы в процессе печати, что значительно снижает вероятность производства бракованных изделий.

Кроме того, ИИ может быть использован для оптимизации конструкции изделия и выбора оптимальных параметров печати. Например, с помощью генеративных моделей можно создать дизайн изделия, который будет менее подвержен образованию дефектов, или подобрать такие параметры печати, которые обеспечат наилучшую адгезию слоев и минимальные внутренние напряжения.

В перспективе применение ИИ в 3D-печати будет становиться все более распространенным, позволяя достигать еще большей точности и надежности в производстве сложных изделий. Разработка и внедрение продвинутых моделей ИИ помогут не только улучшить качество печати, но и снизить затраты на производство, сокращая количество брака и времени на постобработку.

Выводы

Использование единой классификации дефектов, возникающих при 3D-печати методом FFF, имеет важное значение. Единая классификация позволяет стандартизировать подходы к выявлению и анализу дефектов, облегчая их диагностику и устранение. Это особенно важно в контексте производства сложных и ответственных изделий, где даже незначительные дефекты могут привести к серьезным сбоям или ухудшению функциональности. Систематизированный подход к классификации дефектов также способствует лучшему пониманию причин их возникновения и разработке эффективных стратегий по их предотвращению, что, в свою очередь, приводит к улучшению технологических процессов и повышению качества конечной продукции.

Предложенная классификация дефектов является удобной на практике, поскольку она охватывает все ключевые аспекты дефектов, включая их размер, пространственную топологию, природу возникновения и локализацию [3]. Это позволяет всесторонне оценить влияние дефектов на свойства изделий и подобрать оптимальные методы их устранения. Классификация структурирована таким образом, что она может быть легко применена как на этапе проектирования, так и на этапе производства, что делает ее полезной для широкого круга специалистов, включая инженеров, исследователей и операторов 3D-принтеров. Благодаря своей универсальности и детализации данная классификация становится надежным инструментом для повышения качества и прогнозирования характеристик 3D-печатных изделий.

В заключение дефекты экструзионной 3D-печати остаются основным вызовом для достижения производства высококачественных изделий. Их возникновение неизбежно из-за самой природы процесса 3D-печати, включающего термомеханические напряжения и вариации в параметрах печати. Разработанная классификация дефектов, основанная на их размере, топологии, природе и локализации, предоставляет систематизированный подход к их выявлению и устранению. Понимание причин и эффективная профилактика дефектов необходимы для улучшения качества печатных изделий, расширения области применения технологии FFF и достижения более надежных и функциональных конечных продуктов.

Для тех, кто заинтересован в более глубоком понимании темы и детальном изучении классификации и способах предотвращения формирования дефектов экструзионной 3D-печати, рекомендуется обратиться к оригинальной статье [2], где представлена полная информация и расширенный анализ. ■

Литература

1. Гордеев Е. Г., Анаников В. П. Общедоступные технологии 3D-печати в химии, биохимии и фармацевтике: приложения, материалы, перспективы. Обзор // Успехи химии. 2020. 89, 1507.
2. Ерохин К. С., Наумов С. А., Анаников В. П. Анализ, классификация и предотвращение образования дефектов в экструзионной 3D-печати // Успехи химии. 2023. 92, 11, RCR5103.
3. Иллюстрированный атлас дефектов 3D-печати: <https://zioc.ru/science/3dp-defects>

5 декабря
2024 г.

с 11:00 до 15:00

VII Конференция «Цифровая стоматология и аддитивные технологии для медицины»

в рамках деловой программы форума «Российская неделя здравоохранения»
Москва, ЦВК «Экспоцентр», павильон «Форум», презентационная площадка

Основные темы

- Цифровые протоколы в стоматологии
- 3D-решения для цифровой медицины и стоматологии
- 3D-технологии в протезировании
- Производство индивидуальных имплантатов
- Применение фотополимерной смолы 3D-печати в медицине
- 3D-печать для предоперационной подготовки хирургических операций
- 3D-технологии для производства ортопедической обуви
- Индивидуальные 3D-ортезы
- 3D-биопринтинг



Организаторы:

ООО «АМ-Согэ», АО «Экспоцентр»

Информационное сопровождение:

Журнал «Аддитивные технологии»

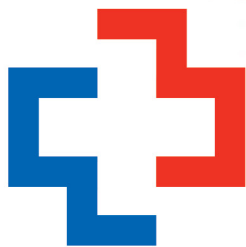
Принимаются заявки на участие.

Дополнительная информация:

Тел. +7 (499) 678-12-35

координатор конференции — Екатерина Астриева

assist@am-core.ru, www.am-core.ru



РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ RUSSIAN HEALTH CARE WEEK

Ежегодно входит в план научно-практических мероприятий Министерства здравоохранения РФ



РОССИЯ, МОСКВА, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



Здравоохранение

«Медицинская техника,
изделия медицинского назначения
и расходные материалы»



Здоровый образ жизни

«Средства реабилитации и профилактики,
эстетическая медицина, фармацевтика и товары
для здорового образа жизни»



MedTravelExpo

Санатории. Курорты. Медицинские центры

«Медицинские и оздоровительные услуги,
технологии оздоровления
и лечения в России и за рубежом»

**2-6
декабря 2024**

**2-5
декабря 2024**

WWW.ZDRAVO-EXPO.RU

Организаторы:

Государственная Дума ФС РФ
Министерство здравоохранения РФ
АО «ЭКСПОЦЕНТР»

При поддержке:

Совета Федерации ФС РФ
Министерства промышленности и торговли РФ
Министерства экономического развития РФ

Под патронатом ТПП РФ

12+

РЕКЛАМА



65 ЭКСПОЦЕНТР

Специализированный проект и конференция
по аддитивным технологиям
в промышленности



Additive Minded
21-24 ЯНВ
2025
Москва, Россия

в рамках выставки:



Международная специализированная
выставка пластмасс и каучуков

RUPLASTICA

Место проведения:

 **ЭКСПОЦЕНТР**
МЕЖДУНАРОДНЫЕ ВЫСТАВКИ И КОНГРЕССЫ
МОСКВА

Организатор:


ЭКСПО
ФЬЮЖН