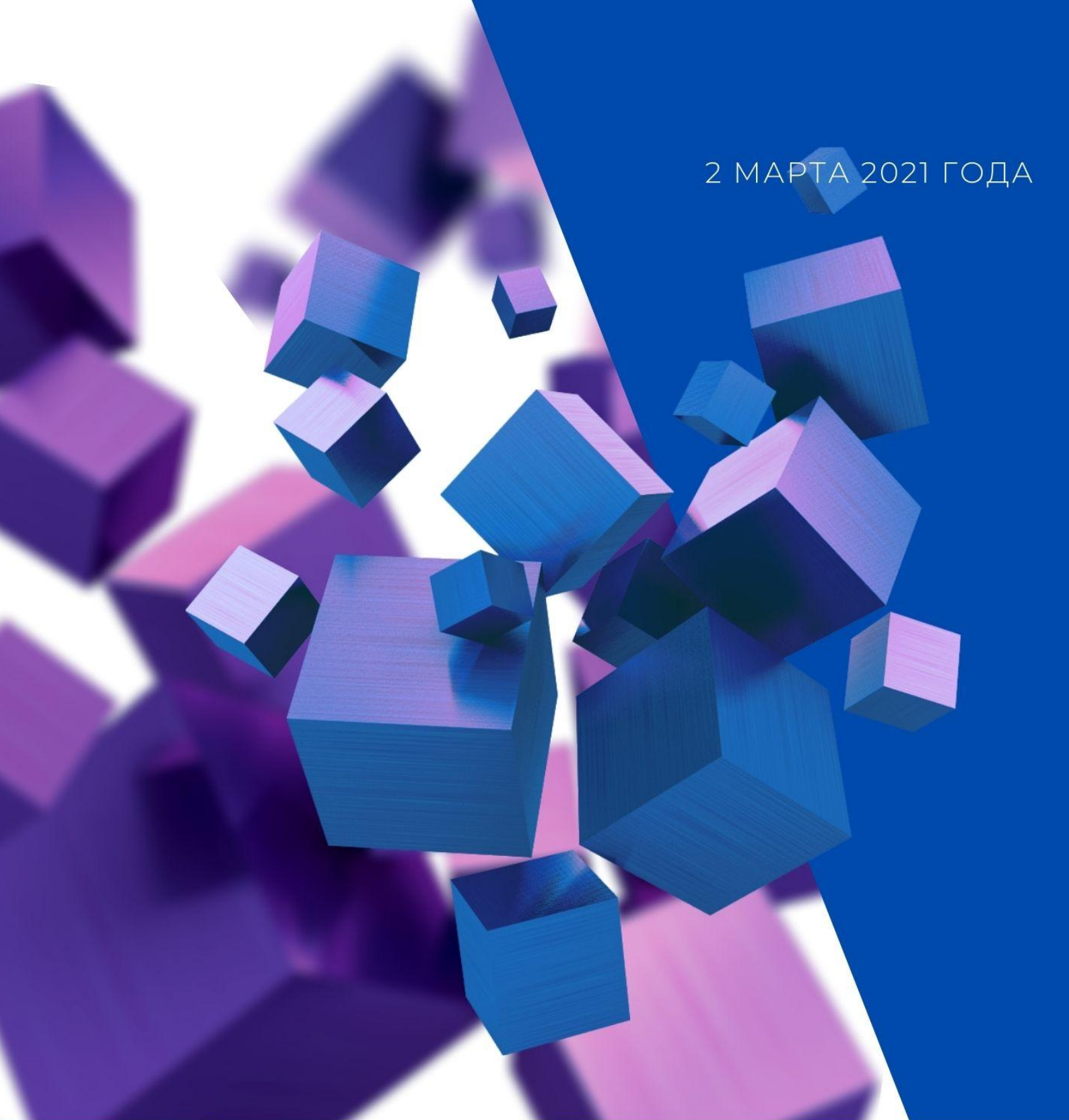




МАТЕРИАЛЫ КРУГЛОГО СТОЛА "АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ: МИРОВОЙ РЫНОК И НАИЛУЧШИЕ ПРАКТИКИ"

2 МАРТА 2021 ГОДА





ЦЕЛЬ КРУГЛОГО СТОЛА

обмен наилучшими практиками применения аддитивных технологий в машиностроении.

Аддитивные технологии позволяют создавать легкие, экономичные по ресурсозатратам, кастомизированные изделия, не уступающие по прочностным и эксплуатационным характеристикам изделиям, реализуемым традиционными для отраслей промышленности методами. Реализация имеющегося в аддитивном производстве потенциала является стратегической задачей химической и машиностроительной отраслей.



Оглавление

Ключевые тенденции	4
Раздел «Материалы для аддитивного производства»	7
Раздел «Аддитивные технологии для медицины»	10
Раздел «Аддитивные решения для промышленности»	15

Ключевые тенденции на мировом рынке аддитивного производства

Аддитивные технологии относятся к одной из ведущих технологий четвертого промышленного уклада. Информационная связанность глобальных производственных кластеров и ведущих дизайн-центров позволила заложить основы для изменения производственных процессов по всему миру. Это же послужило отправной точкой для расширения географических рынков применения аддитивных технологий.

Мировой рынок аддитивного производства в 2020 году был оценен в \$11,2 млрд, и по прогнозу аналитического агентства Statista к 2028 достигнет объема в \$30,6 млрд, (CAGR - 26,4%).

Сегодня на долю наиболее перспективных для внедрения аддитивных технологий секторов промышленности приходится порядка \$9 трлн. Аддитивные технологии могут быть задействованы в производстве на 20-40% уже в течение ближайших 5-10 лет. Таким образом, около \$2-3 трлн от общего объема мировой промышленности в скором времени может быть сопряжено с аддитивными технологиями.¹

Ожидается, что уже до конца текущего десятилетия изменится традиционная область применения аддитивного производства – от прототипирования и способа подтверждения гипотез аддитивные технологии перейдут к полноценному встраиванию в цепочки массового производства.

Наблюдается тренд на увеличение масштабов внедрения аддитивных технологий в различные отрасли: уже сейчас 2/3 лидирующих промышленных компаний применяют аддитивное производство в производственных процессах, к 2030 г. 2/3 всей изготавливаемой продукции в мире будет производиться с напечатанными комплектующими, к 2030-2050 гг. в ряде производственных отраслей 3D-печать позволит печатать полностью готовую продукцию.

Технологический прогресс в аппаратной части и развитие цифрового моделирования обеспечивают удешевление аддитивного производства и повышают его доступность, в том числе за счет смены парадигмы в отношении принтеров – вместо продажи оборудования предлагается лизинг или 3D-печать как услуга.

Эксперты SmarTech оценивают рынок полимерной 3D-печати суммарно по оборудованию и сопутствующим материалам в \$11,7 млрд в 2020г. Основные производители полимерных материалов для 3D-печати – DSM (Нидерланды), SABIC (Саудовская Аравия), BASF (Германия), Arkema (Франция) и Solvay (Бельгия), Carbon (США).

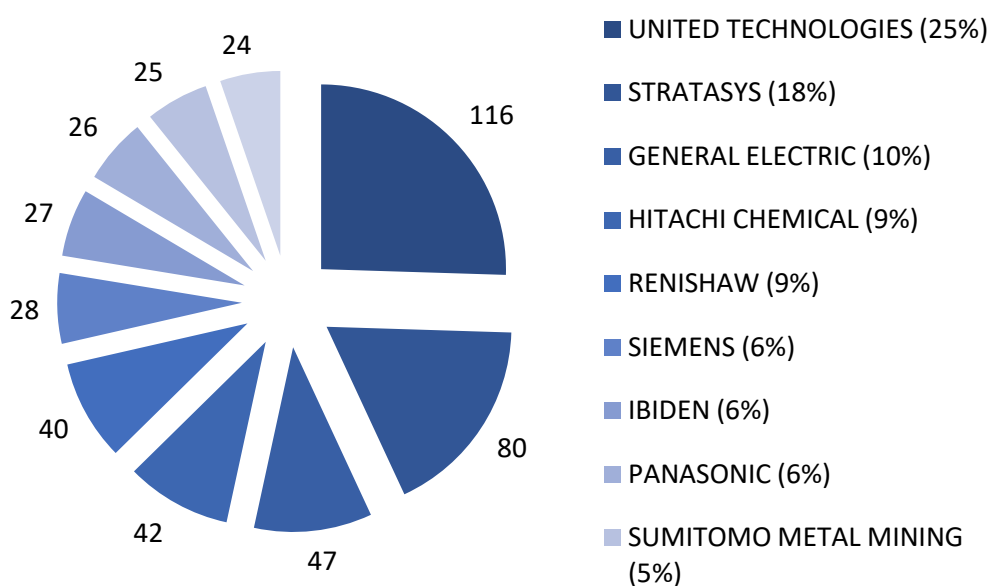
Согласно данным AMPOWER, мировой рынок металлического аддитивного производства в 2019 году оценивался в \$2,44 млрд, включая оборудование, материалы и сервис. По прогнозам к 2024 году эта величина составит \$7,1 млрд. Основные игроки –

¹ Source: A.T. Kearney Analysis (3D Printing Ensuring Manufacturing Leadership in the 21st Century)

GKN Plc (Великобритания), Rio Tinto (Великобритания), Hitachi Chemical (Япония), ATI Powder Metals (США), Sandvik (Швеция).

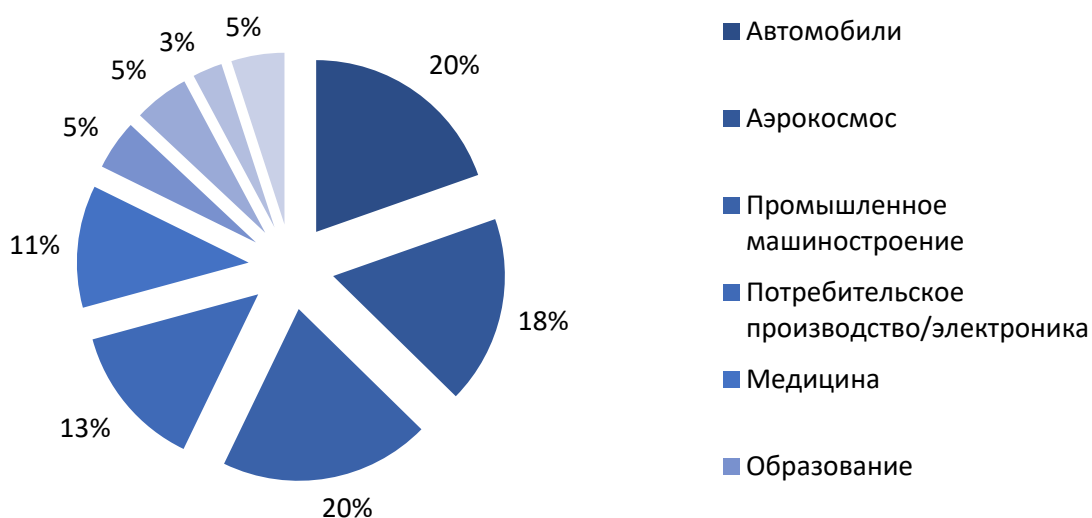
Анализ патентной и публикационной активности по тематике аддитивного производства и технологий свидетельствует о растущем интересе, как к самой технологии, так и сферам ее применения. Страны-лидеры по публикационной и патентной активности в этом направлении за последние пять лет – США, Китай, Германия, Великобритания.

Наибольшее количество патентов в области аддитивных технологий среди мировых компаний имеет United Technologies:



В ближайшие 10 лет индустрия аддитивных технологий продолжит рост высокими темпами, причем ежегодный рост будет варьироваться от 18% до 36% для различных сегментов рынка:

Области применения АП



Большие надежды участники рынка связывают с аэрокосмической отраслью, которая, как ожидается, войдет в тройку отраслей-лидеров.

Самым объемным рынком останется автомобилестроение (более \$7 млн.), за которым следуют потребительские товары, аэрокосмическое, коммерческое и промышленное оборудование, а также прототипирование. Три наиболее быстрорастущих сегмента связаны с медицинским применением: медицинская и стоматологическая отрасль - 27,3% , диагностика и лечение в медицине и стоматологии - 28,2%, протезирование - 36,4% .

Настоящий дайджест представляет актуальные разработки в области аддитивных решений, реализуемые ведущими научными группами в России. Сегодня этот рынок активно формируется и есть высокая вероятность, что разработчики, которые сегодня активно занимаются разработками в сфере аддитивных технологий, станут полноправными участниками национального рынка промышленности уже в среднесрочной перспективе.

Раздел «Материалы для аддитивного производства»

➤ **Керамические материалы нового поколения**

Основным препятствием, тормозящим проекты по широкому распространению технологии 3D-печати в строительстве, является отсутствие строительного материала, который был бы прочным, быстро схватывался и держал форму. Традиционные бетон и кирпич здесь не подходят, а новые материалы требуют тщательных и долговременных испытаний.

На сегодняшний день существует острая потребность в разработках новых способов получения полимерно-керамических материалов, которые бы позволяли быстро производить неорганические керамические компоненты сложных геометрических форм с минимальной усадкой.

По сравнению с традиционным строительством, можно понять, что при 3D-печати происходит меньше материальных потерь, минимизируется использование человеческих ресурсов и снижается стоимость опалубки, что составляет около 40% от общего бюджета. Потенциал автоматизации, устранения опалубки, сокращение или устранение отходов и производство сложных геометрий делает 3D-печать интересной перспективой для строительной отрасли.

На основании ранее проведенных исследований было решено создать состав с комплексом добавок, изменяющих реологию вяжущего. Были определены оптимальные концентрации добавок для создания комплекса. Гиперпластификатор Melflux 1641 (ГП) показывает наилучшие показатели при содержании добавки в количестве 0,3%, редуцирующий полимерный порошок (РПП) так же при 0,3 %. Наилучшие показатели продемонстрировали эфиры целлюлозы FMC 21010 (ЭЦ) в количестве 0,1 %. Модификатор реологии Obtibent 1056 (МР) служит для придания растворной смеси вязкости. Но в отличие от эфиров, он не снижает прочностные показатели цементного камня, а по заверению производителей, модификатор реологии и эфиры целлюлозы обладают синергетическим воздействием при совместном введении, что подтверждается проведенными исследованиями по измерению вязкости раствор.

Был разработан состав с комплексом добавок (гиперпластификатора Melflux в количестве 0,3 %, 0,3 % редуцирующего порошок VINNAPAS, 0,1 % эфиров целлюлозы FMC 21010 и 0,2 % модификата реологии Obtibent).и заполнителем с соотношением цемента и песка 1:1. Данный состав обладает малой растекаемостью (1 мм), высокой вязкостью (1,526 Па·с) и является

удобоукладываемым. Для него характерна повышенная прочность (на сжатие 47,2 МПа на 28 сутки твердения) в сравнении с составом без наполнителя (42,7 МПа).²

Формование керамических деталей непосредственно методами быстрого прототипирования имеет существенные ограничения. Объект, полученный таким способом, как правило, является пористым, поскольку частичная упаковка свободных частиц ограничена. Пористость также появляется в результате послойного достраивания, используемого в большинстве подобных способов, в частности тех, которые опираются на применение липких слоев для связывания частиц порошка в единое целое. Керамика, произведенная с помощью 3D-печати, зачастую требует последующей обработки, чтобы изделие имело необходимую плотность.

Следует отметить, что для материалов, консолидация которых осуществляется путем спекания, особую важность приобретает подбор связующего вещества, с тем, чтобы обеспечить его полное удаление при обжиге без разрушения заготовок. Альтернативным способом получения изделий из керамики является применение аддитивных технологий для изготовления полимерных форм и прототипов порового пространства с заданной геометрией для технологии шликерного литья, подобный подход обсуждается в работах. Его несомненным достоинством, по сравнению с существующими приемами (литье из водных шликеров в гипсовые и полимерные формы, литье термопластичных шликеров (горячее литье) в обогреваемые металлические формы), является возможность создавать полностью неразъемную «жертвенную» форму, удаляемую путем растворения либо при обжиге, что существенно расширяет доступную геометрию изделий. В процессе печати такой формы могут быть выполнены любые необходимые технологические элементы (каналы для подачи теплоносителя, ребра жесткости и пр.).

Реализация методами аддитивных технологий вспомогательных функций при использовании традиционных приемов формования (шликерного литья) существенно расширяет доступную геометрию изделий, давая возможность создавать полностью неразъемную «жертвенную» форму, удаляемую путем растворения либо при обжиге, при этом характеристики получаемых изделий зависят только от параметров процесса формования. Использование форм из растворимых полимеров открывает возможность для возврата материала формы в технологический цикл, тем самым уменьшая нагрузку на окружающую среду и

² <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-stroitelnoy-smesi-dlya-3d-pechati/viewer>

способствуя повышению ресурсоэффективности производства изделий из керамики.³

➤ **Новый способ увеличения плотности сплавов для 3D-печати**

Микроструктура 3D-печатных сплавов зачастую состоит из больших и удлиненных кристаллов, это делает их практически непригодными для применения в технике из-за невысоких механических характеристик и повышенной склонности к трещинам во время печати.

В своем исследовании ученые из Мельбурнского королевского технологического университета нашли способ справиться с этой проблемой. Они обработали экспериментальные сплавы ультразвуком и оказалось, что такое воздействие в корне меняет микроструктуру материала: кристаллы становятся очень тонкими и приобретают более правильную форму (формируются одинаково во всех направлениях).

Авторы продемонстрировали свой подход на двух основных применяемых производителями сплавах: титановом Ti-6Al-4V, из которого делают детали летательных аппаратов и биомеханические имплантаты, и никелевом суперсплаве Inconel 625, часто используемом в морской и нефтяной промышленности. Оба образца показали улучшение механических характеристик⁴.

➤ **Кастомизированный синтез полимеров**

Разработка новых материалов предполагает обширную экспериментальную работу и испытания в различных условиях. Синтез полимеров с заданными свойствами является сложной задачей, которая часто требует значительного времени и ресурсов. Возможность прогнозировать свойства новых материалов имеет большое значение, поскольку она позволяет определять и корректировать направление исследований и ускоряет цикл разработки. Предсказательное моделирование и расчет физических свойств полимеров в настоящее время перестало быть сугубо теоретической областью науки о полимерах и все чаще применяется для решения прикладных задач не только научными организациями и университетами, но и коммерческими организациями. Данный раздел науки о высокомолекулярных соединениях позволяет предсказывать физические и химические свойства полимеров исходя только из знания их химического строения.

³ <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30514686>

⁴ <https://www.nature.com/articles/s41467-019-13874-z>

Сопоставление расчетных и экспериментальных величин показало удовлетворительную точность (ошибка не превышает 5-10%), что является удовлетворительным результатом, особенно для абсолютно новых, неописанных мономеров и полимеров на их основе и позволяет сделать предварительный вывод о целесообразности синтеза этих новых полимеров и проведения натуральных экспериментов по определению их свойств.⁵

Эпоксидные смолы имеют много достоинств, однако достаточно высокая горючесть ограничивает области их практического применения. Перспективными способами повышения термостойкости и огнестойкости эпоксидных смол является их модификация органофосфазенами. В настоящее время актуальна задача разработки более простых и технологичных способов синтеза функциональных органофосфазенов, обладающих при этом более низкой вязкостью для повышения технологичности. В настоящей работе был осуществлен одностадийный синтез модифицированных эпоксидных олигомеров, содержащих органопроизводные гексахлорциклотрифосфазена (ГХФ). Реакцию проводили при мольном соотношении ГХФ и бисфенола F равном от 1:24 до 1:6 в избытке эпихлоргидрина и гидроксида калия или натрия. Полученные эпоксидные олигомеры представляли смесь низкомолекулярного олигоэпоксида с молекулярной массой в пределах 300-1000 с преобладанием диглицидилового эфира бисфенола F и высокомолекулярной фосфазеновой фракции (средняя молекулярная масса около 1500 по данным массспектрометрии MALDI-TOF и ГПХ).⁶

Проект «Полиофит» - малое инновационное предприятия РХТУ им. Д.И. Менделеева ведет широкий спектр работ в области синтеза полимерных композиционных материалов в том числе для нужд аддитивного производства.

Раздел «Аддитивные технологии для медицины»

➤ Технология 3D-печати для создания конструкции для регенерации костей

Исследователи из России смогли создать новую технологию 3D-печати персонализированных изделий из биоактивной керамики. Ученые провели доклинические исследования на крупных животных и показали, что экспериментальные образцы ген-активированных материалов могут использоваться для направленной регенерации костных тканей.

⁵ <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44058759>

⁶ <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44058739>

Сегодня в мире наблюдается большое количество пациентов с дефектами костей скелета. Они могут возникать в результате травм, онкологических патологий, врожденных деформаций и аномалий развития, дегенеративно-дистрофических и воспалительных заболеваний. Согласно Федеральной службе государственной статистики, в 2015 году в нашей стране было выявлено три миллиона травм костей скелета.

При костных дефектах сегодня применяют реконструктивно-восстановительное лечение, которое основано на использовании костных аутотрансплантатов. Это обуславливается тем, что остеопластические материалы эффективны только при небольших дефектах.

Альтернативным вариантом аутотрансплантации могут стать методы, позволяющие быстро и индивидуализированно восполнить утраченную структуру и функцию поврежденных костей. Такие методы должны учитывать уникальные особенности скелета и дефектов кости, а также способны заменить часть или даже всю костную ткань. На сегодня лучше всего для осуществления этих целей подходит 3D-печать биорезорбируемых имплантатов с использованием генетических технологий.

Российские ученые смогли создать уникальную технологию трехмерной печати персонализированных изделий из биоактивной керамики. С помощью нового метода авторы создали персонализированные ген-активированные имплантаты. После разработки технологии исследователи смогли создать первые прототипы таких материалов и провели их комплексный физико-химический и биохимический анализ. Затем авторы провели и первые доклинические исследования на крупных животных⁷.

➤ **3D-печать гелевыми материалами с целью получения аэрогелей на основе альгината натрия**

Ученые РХТУ им. Д.И. Менделеева предложили способ 3D-печать гелевыми материалами. Формирование трехмерных объектов с помощью разработанной конструкции 3D принтера и подобранного состава материала состоит из нескольких этапов. Первым этапом является формирование трехмерных моделей в среде автоматизированного проектирования Autodesk Inventor 2019. После чего следует этап преобразования трехмерной модели в специальном программном обеспечении- слайсере. В качестве данного программного продукта выступает программа RepetierHost. Ее функционал позволяет производить точную настройку процесса печати, а именно скорости формирования слоя, его толщину, а также материала для печати. Заключительным этапом является трехмерная печать

⁷ <https://indicator.ru/medicine/3d-pechat-konstrukcii-regeneracii-kostei-15-06-2020.htm>

разработанных моделей. Процесс печати проводится при скорости перемещения печатающего устройства 7 мм/с, температура рабочей области 20°C, экструдера 25°C. Объемный расход гелевого материала составил 275 мм³/с. После окончания процесса печати полученные образцы помещаются в раствор 1 масс.% CaCl₂ для завершения этапов формирования твердой трехмерной структуры. Полученные материалы могут найти применение в электронике, медицине, а также как один из способов доставки лекарственных препаратов.⁸

➤ Мягкие имплантаты, напечатанные на 3D-принтере

Исследователи из Массачусетского технологического института создали мягкий печатаемый материал, вызывающий гораздо меньшее отторжение нейроимплантатов живыми тканями и позволяющий более точно стимулировать мозговые структуры и фиксировать их активность.

Авторы новой работы придумали, как можно печатать на 3D-принтере гибкие зонды и другие устройства для введения в мозг. Такие приборы создаются из электропроводящего полимера. Эти материалы стали интересны ученым в последнее время благодаря сочетанию их хорошей проводимости сопоставимой с гибкостью. Проводящие полимеры используются в коммерческих целях в качестве антистатических покрытий, поскольку они могут эффективно переносить электростатические заряды.

Ученые смогли так изменить обычно жидкий проводящий полимер под названием PEDOT:PSS, что он превратился в вещество, похожее на вязкую зубную пасту. Эту субстанцию затем пропускали через обычный 3D-принтер, чтобы создать стабильные электропроводящие узоры.

Чтобы проверить работоспособность нового полимерного материала, ученые напечатали небольшой резиновый электрод размером с частичку конфетти. Электрод состоит из слоя гибкого прозрачного полимера, поверх которого нанесен электропроводящий полимер в виде тонких параллельных линий. Такие линии сходились на кончике электрода около 10 микрон в ширину – этого вполне достаточно, чтобы принимать электрические сигналы от одиночного нейрона.

Команда напечатала несколько мягких электронных устройств, включая небольшой резиновый электрод, который они имплантировали в мозг мыши. Мыши дали возможность свободно перемещаться в контролируемой среде, при этом зонд был способен уловить активность отдельного нейрона. Мониторинг этой активности может дать ученым наиболее детальное представление о работе мозга животного в те или иные моменты времени, а также помочь в разработке методов

⁸ <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44694662>

лечения и долгосрочных имплантатов головного мозга для терапии различных неврологических расстройств⁹.

➤ **Технология печати персонализированных нейропротезов**

По данным Всемирной организации здравоохранения, более миллиарда человек, то есть около 15 % населения Земли, имеют различные формы инвалидности. Кроме того, ежегодно до полумиллиона человек получают травмы спинного мозга, которые зачастую сопровождаются потерей чувствительности и возможности ходить, а также нарушениями работы внутренних органов. Чтобы найти способы вернуть людям с инвалидностью здоровье, исследователи занимаются разработкой инвазивных нейропротезов, способных проводить электрический сигнал в спинной и головной мозг и восстанавливать утраченные функции.

Одна из главных проблем, с которыми сталкиваются врачи и ученые, это подстройка нейропротезов к окружающим нервным тканям того или иного человека. Несмотря на биосовместимые эластичные материалы, не всегда удается быстро адаптировать устройство под анатомические и возрастные особенности пациента. Решение этой проблемы предложила команда ученых под руководством профессора Павла Мусиенко из Института трансляционной биомедицины СПбГУ и профессора Ивана Минева из Университета Шеффилда. Они разработали новую технологию 3D-печати, которая позволяет достаточно быстро изготавливать индивидуальные нейроимпланты для восстановления и мониторинга двигательных функций и функций внутренних органов при поражениях нервной системы.

Такой персонализированный подход стал возможен благодаря технологиям гибридной 3D-печати NeuroPrint. Сначала в принтере создается геометрия будущего нейроимпланта из силикона, который также служит изолирующим материалом. Затем на основу наносятся микрочастицы платины или другого электропроводящего элемента импланта. После чего проводится активация поверхности при помощи холодной плазмы. Причем количество и конфигурацию электродов в нейроимпланте можно менять, получая устройства для имплантации в ткани спинного мозга, головного мозга или мышц. Среднее время производства от создания проекта до получения прототипа может составлять всего 24 часа.

Нейробиологи уже использовали технологию NeuroPrint для проведения исследований на различных модельных объектах — млекопитающих и рыбках данио-рерио. Им удалось продемонстрировать, что новые нейроимпланты имеют высокий уровень биоинтеграции и функциональной стабильности, а также не

⁹ <https://www.nature.com/articles/s41467-020-15316-7>

уступают своим аналогам в работе с восстановлением двигательных функций конечностей и контролем функций мочевого пузыря. Кроме того, ученые смогли напечатать мягкие имплантаты, по форме и механическим характеристикам близкие к наружной соединительнотканной оболочке мозга.

В исследовании приняли участие ученые СПбГУ, Института физиологии имени И.П. Павлова РАН, Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова, Санкт-Петербургского научно-исследовательского института фтизиопульмонологии Минздрава РФ, Уральского федерального университета, Дрезденского технического университета (Германия) и Университета Шеффилда (Великобритания)¹⁰.

➤ Прототип протеза руки

Новосибирские студенты из команды «CyberBionic» разработали бионический протез правой кисти человека, управляемый при помощи движений пальцев по желанию владельца. В корпусе протеза установлен датчик, который улавливает электромагнитный импульс, возникающий в мышце руки, и преобразует его в механическую работу.

Главные отличия протеза, разработанного ребятами, от всех существующих – низкая стоимость и быстрая подгонка. По приблизительным подсчетам студентов его стоимость составляет от сорока до пятидесяти тысяч рублей, а себестоимость – не более двадцати тысяч.

Для управления протезом команда написала собственную программу. Все жесты программируются. «Надеваем датчик, получаем сигналы мышечной активности и потом их используем. Например, одно сжатие – одно действие, два сжатия – другое», – рассказывает программист и студент факультета прикладной математики и информатики НГТУ НЭТИ Максим Валяев.

Новосибирские студенты уже провели две встречи с человеком с ограниченными возможностями здоровья, сделали замеры, сняли слепок с его руки и выяснили, какие функции он хочет видеть в протезе, а также показали, что у них уже готово. На сегодняшний день они создали свою печатную плату и заказали все необходимые комплектующие. Детали для протеза печатаются на 3D-принтере из специального пластика¹¹.

➤ Модель 3D-принтера для печати биоразлагаемых имплантатов

¹⁰ https://spbu.ru/news-events/novosti/uchenye-razrabot?fbclid=IwAR3j_1IQRkWAdgkLsRLjAQ9y6LAguQBMKIVqId_Ws0oUcyX89XcEg6c5xHc

¹¹ https://www.nstu.ru/news/news_more?idnews=128801

В медицине на сегодняшний день уже применяются имплантаты из титана, печатаемые на 3D-принтере. Они используются в челюстно-лицевой хирургии, травматологии, ортопедии, онкологии. Эти инородные для человеческого организма изделия фиксируются в дефектах кости с помощью винтов и остаются в организме навсегда.

Ученые из нескольких институтов РАН объединились для работы над моделью 3D-принтера для печати биоразлагаемых имплантатов. Исследования проходили параллельно: пока в НИОХ СО РАН в дефекты черепа крыс имплантировали порошок, в Векторе изучали действие тех же веществ на клетки костной ткани человека. В ходе экспериментов ученые определили состав апатита, который наиболее эффективен как “в пробирке”, так и на живых организмах — стимулирует образование новой костной ткани и ускоряет вживление имплантируемого материала. При этом родные клетки костной ткани человека не умирают, а активно размножаются.

Планируется, что разрабатываемый 3D-принтер будет печатать по технологии селективного лазерного плавления, поэтому ученые проверили действие лазерного излучения на полученный состав апатита. Выяснилось, что при плавлении порошка вещество не разрушается и, пока имплантат будет печататься, он не потеряет свои лечащие свойства. ИАиЭ СО РАН — еще один исполнитель проекта вместе с ИХТТМ СО РАН — разработал программное обеспечение и модуль управления основными узлами создаваемого макета 3D-принтера. В этом году ученые будут разрабатывать блокпослойной печати — последовательное нанесение слоев гидроксиапатита друг на друга. В ИХТТМ преследуют другую цель — материал, из которого будет напечатано изделие, со временем растворится в организме человека и превратится в собственную кость.

Печатаемые изделия будут индивидуальными: они должны проектироваться из данных томографии конкретного человека. Ученые надеются, что разрабатываемая модель 3D-принтера будет востребована на рынке, а проводимые исследования расширят возможности по применению синтетического гидроксиапатита в медицине¹².

Раздел «Аддитивные решения для промышленности»

➤ Металлические нанопорошки

В настоящее время, в связи с развитием нанотехнологий, а также микро- и наноэлектроники в частности, с каждым годом возрастает потребность в высокочистых наночастицах различного состава и размера, а, следовательно,

¹² <http://www.solid.nsc.ru/news/0/16699/>

существует очевидная потребность снижения их себестоимости и уменьшения затрат на их производство. Кроме того, развитие различных областей науки и техники приводит к увеличению спроса и ведет к увеличению мощностей производства, что ухудшает экологическую ситуацию при использовании традиционных реагентов для получения наночастиц: этиленгликоля, этанола и других органических растворителей. Таким образом, крайне важно внедрять и развивать относительно новые методы получения, которые могли бы элиминировать существующие проблемы.

В работе были получены высокочистые наночастицы металлического титана сферической формы с узким распределением частиц по размерам. Синтез проводился с использованием метода индукционной потоковой левитации, в качестве газа-носителя использовались аргон и гелий. Средний размер частиц полученных порошков находился в диапазоне ~ 20–50 нм. Использование гелия в качестве газа-носителя приводит к меньшим размерам частиц и более узкому распределению частиц по размерам по сравнению с аргоном при постоянной температуре и постоянному расходу газа. Увеличение скорости потока газа-носителя и температуры образца приводит к уменьшению размера частиц. Таким образом в работе показана потенциальная перспективность использования метода потоковой левитации для синтеза наночастиц.¹³

➤ **Экономичный способ производства металлических порошков для 3D-печати деталей самолетов**

Использование 3D-печати в аэрокосмической отрасли — уже сложившийся тренд. Мировые промышленные гиганты, такие как Airbus, Boeing, General Electric, перешли от печати единичных прототипов и изделий к полноценному серийному аддитивному производству. К примеру, новый самолет Airbus A350 XWB содержит более 1000 различных деталей, изготовленных методом 3D-печати.

Все чаще для изготовления узлов самолетов и космических аппаратов используют интерметаллиды (соединение двух металлов) «титан-алюминий» и «титан-никель». 3D- изделия из них обладают низкой плотностью, повышенными прочностными характеристиками, высокой жаростойкостью и могут иметь сложную геометрическую форму. Для серийного 3D-производства деталей ракет и самолётов необходимы качественные исходные порошки — прекурсоры. Полноценное внедрение металлических аддитивных установок в отечественную промышленность сдерживается главным образом высокой стоимостью сырья, из-за нее производство пока нерентабельно.

¹³ Проект курируется Заведующий лабораторией SMART полимерных материалов и технологий И.В. Воротынцевым

Группа учёных НИТУ «МИСиС» разработала высокоэффективный и экономичный способ получения сырья для аддитивной печати — композитных порошков титана/алюминия округлой формы. Новый метод позволит снизить себестоимость материала, что сделает его более доступным для производителя, и расширит возможности создания компактных изделий сложной формы для аэрокосмической промышленности.

Упростить производство порошков для 3D-печати получилось за счет использования уникального сочетания режимов планетарной мельницы, где в процессе интенсивной механической обработки получились композиционные порошки, состоящие из округлых частиц, включающих в себя и титан, и алюминий. Этот «полуфабрикат» можно напрямую загрузить в лазерный 3D-принтер, где прямо в процессе печати при температуре около 650 градусов металлы вступают в реакцию, образуя тугоплавкий интерметаллид.

В настоящее время научная группа завершила оптимизацию составов порошков-прекурсоров и приступила к созданию первых прототипов из полученных порошков¹⁴.

➤ **Метод повышения прочности 3D-изделий**

Несмотря на скромные габариты и низкую стоимость, средний настольный 3D-принтер имеет весьма приличный производственный потенциал. Годовая производительность аппарата превосходит 100 кг полимерных изделий. Это примерно в 2 раза больше количества производимых фабриками полимерных продуктов на одного жителя планеты ежегодно. Теоретически персональный 3D-принтер может полностью покрыть потребности своего владельца в пластмассовых продуктах

Лабораторией персонального цифрового производства Fab Lab НИТУ «МИСиС» была предложена методика повышения прочности 3D-изделий, основанная на изучении связи между температурными параметрами процесса 3D-печати, структурой и свойствами изделий. Метод открывает реальную перспективу создания «на дому» нужных бытовых предметов, по качеству сопоставимых с фабричными¹⁵.

Как показало исследование на конкретных кейсах, вне зависимости от геометрии изделия оптимизация температурных параметров процесса дает заметные результаты - прочность деталей по сравнению с обычными, напечатанными по стандартным параметрам возрастает до двух раз.

¹⁴ <https://misis.ru/university/news/misc/2019-12/6485/>

¹⁵ <https://misis.ru/science/achievements/2020-02/6539/>

В настоящее время коллектив продолжает экспериментальные исследования полимерной печати, изучают взаимосвязь геометрии компьютерной модели и прочности готового изделия¹⁶.

➤ **Метод обратимой 4D-печати**

Технология 4D-печати – это, по сути, та же трехмерная печать, при которой создаются материалы с памятью формы и возможностью контролируемого отклика на воздействие. Объекты из таких материалов могут, например, изменять свою форму при воздействии тепла, излучения определенного диапазона или даже прикосновения человеческой руки¹⁷.

Всем разработанным ранее материалам требовалось приложение механической силы извне, чтобы вернуть им первоначальную форму. Но теперь сингапурские исследователи разработали технологию обратимой 4D-печати, которая позволяет создавать объекты, изменяющие форму только под действием «нечеловеческих факторов», таких как облучение, изменение температуры или атмосферного давления. Вместо обычно используемого в экспериментах по 4D-печати гидрогеля, ученые применили два материала под названиями VeroWhitePlus и TangoBlackPlus. В отличие от гидрогеля, они более доступны, совместимы и имеют сравнительно высокую механическую прочность¹⁸.

➤ **Новая технология 3D-печать на основе керамики**

Ученые из Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого разработали новую технологию 3D-печати изделий на основе материалов из карбида кремния и исследовали свойства изготовленных деталей. Устойчивый к коррозии и высоким температурам карбид кремния – перспективный кандидат для замены более тяжелых металлических сплавов в ракетостроении, авиации и энергетической промышленности.

В начале 1980-х годов на смену механическим методам производства деталей (вырезание, обтачивание или другой способ придания формы) стали приходиться аддитивные технологии (АТ). Они предполагают создание объекта путем его послойного наращивания на основе компьютерной модели. К таким технологиям относится получившая известность 3D-печать, в ходе которой материал наносят на специальную платформу или заготовку. Металлические, пластиковые или керамические порошки пропитывают клеем, спекают, прессуют и

¹⁶ <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-01-2019-0017/full/html?fbclid=IwAR3Kdd2yw8450gmziaXwyMgFl5BdTeN6H9aFuqJC27GkyT-o1B1nNPwZCro>

¹⁷ <https://news.rambler.ru/scitech/43587258-issledovateli-razrabotali-metod-obratimoy-4d-pechati/>

¹⁸ https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809919308306?via%3Dihub&fbclid=IwAR20P4yMC1j-eCdWY95tROwpha_WuN5a-8VSNC5p048H1su1VTyDYK_hXdW

так далее, добиваясь необходимых свойств. С развитием техники и программирования стало возможным не только изготавливать бумажные и пластиковые прототипы, но и создавать готовые функциональные изделия. Аддитивные технологии позволяют реализовать любые конструкторские и инженерные идеи в наукоемких отраслях производства – авиастроении, двигателе- и моторостроении, ракетостроении и медицине (в том числе можно «печатать» имплантаты). Количество материалов, применяемых для аддитивных технологий, постоянно увеличивается, возможный спектр свойств изделий расширяется, а изготовление – удешевляется. Это способствует все более массовому использованию АТ: по данным опроса Sculpteo, в 2018 году 40% мировых промышленных компаний применяли в производстве 3D-печать.

Ученые из Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ) разработали технологию 3D-печати из новых керамических материалов и исследовали свойства полученных изделий. Они предложили создавать композиты на базе карбида кремния, упрочненного его же волокнами.

Для разработки технологии потребовалось комплексное исследование: на первом этапе необходимо было получить сферический порошок карбида кремния. Для этого ученые применили методы спрейной сушки (распыление водного раствора на вращающийся диск) и плазменной сфероидизации (обработка в плазменных потоках). Затем исследователи отработали режимы 3D-печати по технологии струйного нанесения связующего. В результате были изготовлены пористые заготовки изделия с требуемой геометрией из композиционного материала. Далее ученые провели несколько циклов обработки, состоящих из пропитки заготовок керамообразующим полимером с последующим пиролизом (термическим разложением) для придания заготовкам необходимой прочности и улучшения их свойств. В результате пропитки и пиролиза остаточные поры в изделии были заполнены карбидом кремния. На основе проведенных исследований ученые изготовили прототип сопловой лопатки – детали, используемой в турбинах, например, ракет, самолетов или автомобилей¹⁹.

➤ Усовершенствованная технология 3D-печати для деталей самолетов и ракет

Исследователи из России и Болгарии разработали датчик, который способен улучшить технологию 3D-печати металлических деталей. С помощью него можно более точно и быстро создавать промышленно значимые изделия, учитывая все технологические параметры. Разработка может найти применение в авиа- и ракетостроительной отраслях.

¹⁹ <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/7/1766>

Чтобы создать датчик, исследователи сначала нашли физическую величину, которая позволяет получать точную информацию о процессе наплавки. Затем авторы создали специальную математическую модель, которая позволила установить «связь» между сигналом на выходе с датчика и положением проволоки относительно электронного луча. После этого ученые придумали схему его регистрации и методику обработки. В конечном итоге исследователи изготовили и собрали все части устройства и провели ряд экспериментов для подтверждения результатов проведенного ранее компьютерного моделирования.

На данный момент ученые представили лабораторный образец своего устройства и теперь работают над созданием взаимодействующей с ним системы. С помощью нее можно будет в автоматическом режиме совмещать электронный луч с проволокой. Изобретение будет потенциально интересно тем предприятиям, которые используют электронно-лучевые аддитивные технологии. В отличие от зарубежных аналогов, технология российских исследователей позволяет совмещать электронный луч с проволокой более точно и быстро. Новая разработка также не требует сложного оборудования и может работать в широком интервале режимов процесса. Созданный учеными датчик, по расчетам, позволит сэкономить 5-10% металла²⁰.

➤ **3D-принтер, печатающий изделия из титана**

Специалисты из Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого создали 3D-принтер, печатающий изделия из титана.

По словам руководителя Лаборатории легких материалов и конструкций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ) Олега Панченко, одно из преимуществ устройства - повышенная производительность. Она в четыре раза выше, чем у аналогов.

«Благодаря камере с инертной атмосферой мы можем печатать любые материалы. Причем, есть возможность использовать два разных материала во время 3D-печати. Возможность использовать сразу две разные проволоки приводит нас к печати изделий из инновационных материалов с градиентными переходами в структуре», – говорит Панченко.

Принтер будет применяться для печати изделий из титана. Его часто используют из-за высокой прочности и небольшой, по сравнению с размерами, массы. Устройство может печатать из прочных материалов. Например, из стали и сплавов из алюминия, магния и никеля.

По словам Панченко, 3D-принтер создан с использованием уникальных технических решений - в нем производится послойная наплавка, когда за счёт

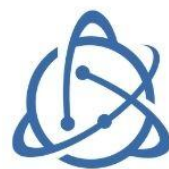
²⁰ <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/905078>

горения электрической дуги плавится проволока. Такая особенность и отличает принтер от аналогов, способных печатать из титана.

А с использованием одновременной подачи двух видов проволоки удалось увеличить производительность установки и обеспечить возможность создания композитов.

«Таким образом, мы можем изготавливать четырехкилограммовое изделие из титана за один час. Нашу установку возможно адаптировать под конкретное предприятие, в частности, увеличить или наоборот уменьшить ее рабочее поле печати», – добавил Олег Панченко.²¹

²¹ <https://scientificrussia.ru/news/titan-vmesto-bumagi>



АКСЕЛЕРАТОР
МЕНДЕЛЕЕВ

<https://mendeleev.vc>

info@mendeleev.vc

