

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ 3D-ПЕЧАТИ

Г.М. Наурызбаева^{1,2}, М. Нажипкызы^{1,2}, Н.К. Жылыбаева¹, З.А. Мансуров^{1,2}, Дж.Р. Митчелл^{3,4}

¹Институт проблем горения», ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

³Политехнический институт Лейрии, ул. Генерал Нортон де Матос, 2411-901, Лейрия, Португалия

⁴Центр быстрого и устойчивого развития изделия, ул. Руа де Португалия, 2430-028, Маринья Гранде, Португалия

Дата поступления:
5 Ноября 2019

Принято на печать:
10 декабря 2019

Доступно онлайн:
26 декабря 2019

УДК: 004.356.2, 662.1/4

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассмотрены основные процессы, материалы и их применения современной технологии аддитивного производства. Представлены основные виды материалов и их комбинации, используемые при 3D-печати. Показаны преимущества и недостатки разработанных технологии 3D-печати. Выявлены основные проблемы практического применения 3D-печати для энергетических материалов. Рассмотрены направления развития и совершенствования данной технологии.

Ключевые слова: аддитивное производство, энергетические материалы, 3D-печать, 3D-принтер, методы печати.

Введение

В последние годы аддитивное производство, в том числе технология 3D-печати развиваются достаточно быстро и охватывает весь широкий диапазон материалов. Аддитивное производство – это совокупность методов обработки материала, которые создают нужные формы путем непрерывного добавления материала для «построения» объекта.

На сегодняшний день в мировой практике наблюдается стремление к увеличению высокотехнологичных и наукоемких производств, что, безусловно, связано с научно-техническим прогрессом [1].

Технология аддитивного производства исследуется и разрабатывается более 30 лет. Процессы аддитивного производства создают трехмерные детали непосредственно из моделей системы автоматизированного проектирования, добавляя материалы слой за слоем, предлагая выгодную возможность создавать детали с геометрическими и материальными сложностями, которые не могут быть получены с помощью вычитающих производственных процессов. Как правило, материал добавляется к компоненту процессом многократного осаждения. В отличие от методов вычитания, таких как токарная обработка, фрезерование и числовое программное управление, аддитивное производство строит геометрию снизу вверх, что позволяет создавать сложные геометрические фигуры [1-3].

В работе [4] приведен обзор мирового прогресса в области аддитивного производства пластмассовых, металлических изделий и изделий на основе бетонной смесей. Также приведены примеры основных понятии четвертой промышленной революции в области создания новых материалов методом послойного «выращивания» – изделий на основе цифровой модели; приводится информация о достижениях 3D печати пластмассовых изделий, созданиях первого отечественного мультицветного 3D принтера и каркасов домов с помощью автоматизированной установки для послойного наращивания бетонной смеси.

В 2015 году в Институте проблем горения в рамках программы целевого финансирования был основан научный центр «3D принтер». Впервые в Казахстане исследователем Института собран отечественный 3D принтер, предназначенный для создания цветных пластмассовых изделий.

Благодаря интенсивным исследованиям за последние два десятилетия был достигнут значительный прогресс в разработке и коммерциализации новых и инновационных процессов аддитивного производства, а также в многочисленных практических применениях в аэрокосмической, автомобильной, биомедицинской, энергетической и других областях. Процесс позволяет использовать широкий спектр материалов, включая полимеры, металлы и керамика, продукты питания и даже ткани человека начинают печататься по аддитивной технологии [5-7].

Типы 3D-печати

В соответствии со стандартом F2792-12a Американское общество по испытаниям и материалам (ASTM) группировал технологии 3D-печати на семь групп: струйное нанесение связующего или струйную печать; прямой подвод энергии (материала) или направленное осаждение энергии; экструзия материала; струйное напыление материала; плавления порошкового слоя или слияние слоев порошка; листовое ламинирование или ламинирование листа; Vat фотополимеризация. В настоящее время технологии 3D-печати уже не ограничиваются использованием прототипов, а все больше и больше используется для изготовления разнообразных продуктов [8, 9].

Струйное нанесение связующего – аддитивный производственный процесс, в котором жидкое связующее вещество селективно осаждается соединяя порошковых материалов. В технологии струйное нанесение связующего используется химическое связующее распыляемое на порошок для формирования слоя [8]. Применение струйное нанесение связующего заключается в изготовлении структур литья, необработанных спеченных продуктов или продуктов большого объема из песка. Струйное нанесение связующего может печатать различные материалы, включая металлы, песок, полимеры, гибриды и керамику. Некоторые материалы, как песок, не требуют дополнительной обработки. Кроме того, процесс струйной печати является простым, быстрым и дешевым, поскольку частицы порошка склеиваются друг с другом. Наконец, струйное нанесение связующего также позволяет печатать очень большие материалы [10, 11].

Прямой подвод энергии и материала или направленное осаждение энергии – процесс аддитивного производства, в котором сфокусированная тепловая энергия используется для плавления материалов путем плавления по мере их осаждения. Направленное осаждение энергии является более сложным процессом печати, обычно используемым для восстановления или добавления дополнительного материала к существующим компонентам [8, 11]. Направленное осаждение энергии обладает высокой степенью контроля структуры зерна и может обеспечить хорошее качество объекта [8, 12]. Процесс направленного осаждения энергии в принципе аналогичен экструзии материала, но сопло не прикреплено к определенной оси и может перемещаться в нескольких направлениях. Кроме того, способ может быть использован с керамикой, полимерами, но обычно используется с металлами и гибридами на основе металлов в форме проволоки или порошка. Примером этой технологии является лазерное осаждение и лазерное построение формы сети [12]. Лазерное осаждение является но-

вой технологией и может быть использовано для производства или ремонта деталей, измеренных в миллиметрах к метрам. Технология лазерного осаждения становится все более привлекательной в инструментальном, транспортном, аэрокосмическом и нефтегазовом секторах, поскольку она может обеспечить масштабируемость и разнообразие возможностей в единой системе [13]. Между тем лазерная линза может использовать тепловую энергию для плавления во время литья [11, 14].

Экструзия материала – процесс аддитивного производства, при котором материал избирательно распределяется через сопло или отверстие [8, 11]. Технология экструзионной 3D печати на основе материала может использоваться для печати многокомпонентный материал и многоцветной печати пластиков, пищевых или живых клеток [15]. Этот процесс широко используется и низкочастотный. Кроме того, этот процесс может создавать полностью функциональные части продукта [12]. Моделирование расплавленного осаждения (FDM) является первым примером системы экструзии материала. FDM был разработан в начале 1990 года и этот метод использует полимер в качестве основного материала [16]. FDM строит детали послойно снизу вверх нагреванием и экструдированием термопластичной нити. Печать FDM происходит следующим образом:

1. Термопластик нагревается до полужидкого состояния и осаждает его в ультратонких гранулах вдоль пути экструзии.

2. При необходимости поддержки или буферизации в 3D принтер помещает съемный материал, который действует как леса. Например, FDM использует твердый пластик в процессе получения 3D модели кости [11, 17].

Струйная обработка материала – процесс аддитивного производства, при котором капли строительного материала осаждаются [8]. При струйной обработке материала печатающая головка распределяет капли из светочувствительного материала, который затвердевает, создавая слой за слоем, в ультрафиолетовом (УФ) свете [18]. В то же время, струйная обработка материалов создает детали с очень гладкой поверхностью и высокой точностью размеров. Многократная печать и широкий спектр материалов, таких как полимеры, керамика, композиты, биологические и гибридные материалы, доступны в струйной обработке материалов [11, 12].

Плавления порошкового слоя или слияние слоев порошка – процесс аддитивного производства, при котором тепловая энергия сплавляет участки порошкового слоя [8]. Процесс плавления порошкового слоя включает в себя способ электронного плавления (EBM), селективного лазерного спекания (SLS) и селективного теплового спекания (SHS) печати. В данном способе применяется

либо электронный луч, либо лазер для плавления порошков материала. Примерами материалов, используемых в этом процессе, являются металлы, керамика, полимеры, композиты и гибриды. Селективное лазерное спекание (SLS) является основным примером технологии порошковой печати на основе 3D. Метод был создан в середине 1980-х в Техасском университете в Остине Карлом Декардом и Джо Биманом. SLS – это технология 3D печати, которая функционально работает с высокой скоростью, обладает высокой точностью и изменяет качество поверхности [19]. Селективное лазерное спекание может использоваться для создания металлических, пластиковых и керамических объектов. SLS использует лазер высокой мощности для спекания полимерных порошков для получения 3D продукта. В то же время технология SHS является еще одной частью технологии 3D печати использующей в процессе термопечати головку для плавления термопластичного порошка для создания 3D печатного объекта. Плавление электронного пучка усиливает источник энергии для нагрева материала [11, 20].

Листовое ламинирование или ламинирование листа – процесс аддитивного производства, при котором листы материала склеиваются вместе, чтобы производить часть объекта [8, 18]. Примером технологии 3D-печати, использующий этот процесс, являются производство ламинированных объектов (LOM) и ультразвуковое аддитивное производство (UAM). Преимущества этого процесса заключается в том, что ламинирование листов позволяет делать полноцветные печати, является относительно недорогим, легкообрабатываемым продуктам. Многослойное производство объектов (LOM) способно изготавливать сложные геометрические детали с низкой стоимостью изготовления и меньшими затратами времени. Ультразвуковое аддитивное производство (UAM) представляет собой инновационную технологическую технологию, использующую звук для объединения слоев металла, полученных из совершенно ровной фольги [15].

Vat фотополимеризация – процесс аддитивного производства, который часто используется, это фотополимеризация, которая обычно относится к отверждению фотореактивных полимеров с использованием лазера, света или ультрафиолета (УФ) [8, 21]. Примером технологий 3D-печати с использованием фотополимеризации является стереолитография (SLA) и цифровая обработка света (DLP). В SLA на него влияли фотоинициатор и особые условия облучения, а также любые красители, пигменты или другие добавленные поглотители ультрафиолета [16]. Цифровая обработка света является способом аналогичным стереолитографии, которая работает с фотополимерами. Основным отличием является источник света. В цифровом

световом процессе используется более традиционный источник света, как дуговая лампа с жидкокристаллической панелью дисплея. Может наноситься на всю поверхность фотополимерной смолы за один проход, что обычно делает ее более быстрой отверждению, чем стереолитография [22]. Важными параметрами vat фотополимеризации являются время воздействия, длина волны и количество источника питания. Первоначально используемые материалы являются жидкими и они затвердевают, когда жидкость подвергается воздействию ультрафиолетового света. Фотополимеризация подходит для получения высококачественного продукта с хорошими деталями и высоким качеством поверхности [11, 15].

Материалы, используемые для технологии 3D печати

Как и в любом производственном процессе, для 3D-печати требуются высококачественные материалы для создания согласованных высококачественных устройств. Технология 3D-печати способна производить функциональные детали из широкого спектра материалов, включая керамику [23], металлы [24], полимеры [25] и композиты [26]. Ниже представлен краткий обзор наиболее популярных материалов для 3D печати.

Металлы. Технология 3D-печати на металле привлекает большое внимание в аэрокосмической, автомобильной, медицинской и обрабатывающей промышленности, поскольку существуют преимущества этого процесса [27]. Металлические материалы обладают превосходными физическими свойствами и материалы могут использоваться для изготовления сложных изделий от печати человеческих органов до аэрокосмических деталей. Примерами таких материалов являются алюминиевые сплавы [28], сплавы на основе титана [29], кобальта [30], никеля [31] и нержавеющей стали [32].

Полимеры. Технологии 3D печати широко используются для производства полимерных компонентов от прототипов до функциональных структур со сложной геометрией [33]. При использовании моделирования осаждения плавления может формировать 3D-печать посредством осаждения последовательных слоев экструдированной термопластичной нити, из полимолочной кислоты (PLA), акрилонитрил-бутадиен-стирола (АБС), полипропилена (ПП) или полиэтилена (ПЭ) [34]. В последнее время термопластичные нити с более высокой температурой плавления, такие как полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и органическое стекло или полиметилметакрилат (ПММА) уже широко используется для технологии 3D печати [35]. 3D-печать полимерных материалов в жидком состоянии или с низкой температурой плавления широко исполь-

зуются в технологии 3D-печати благодаря их низкой стоимости, малому весу и гибкости обработки [36].

Керамика. В настоящее время технология 3D-печати позволяет изготавливать 3D-печатные объекты с использованием керамики и бетона без больших пор или каких-либо трещин благодаря оптимизации параметров и хороших механических свойств. Керамика – прочная, долговечная и огнестойкая. Благодаря своему текущему состоянию перед схватыванием керамика может применяться практически любой геометрии и формы и очень подходит для создания будущих конструкций и сооружений. В работах [37-38] сказано, что керамические материалы полезны в стоматологии и аэрокосмической промышленности.

Композиты. Композитные материалы с универсальностью, малым весом и настраиваемыми свойствами произвели революцию в отраслях промышленности. Примерами композиционных материалов являются армированные углеродными волокнами полимерные композиты и армированные стекловолокном полимерные композиты. Композитные конструкции из армированных углеродных волокон полимеров широко используются в аэрокосмической промышленности из-за их высокой удельной жесткости, прочности, хорошей коррозионной стойкости. В то же время, полимерные композиты армированные стекловолокном широко используются для различных применений в 3D-печати и имеют большие потенциальные возможности применения из-за экономической эффективности и высокой производительности [39, 40]. Стеклопластик обладает высокой теплопроводностью и относительно низким коэффициентом теплового расширения. Кроме того, стекловолокно является негорючим и на него не влияет температура, используемая в производственных процессах, поэтому оно подходит для использования в 3D-печати [41].

На сегодняшний день технология 3D-печати может обрабатывать и производить желаемую форму с использованием пищевых материалов, как шоколад, мясо, конфеты, пицца, спагетти, соус и т.п.

Аддитивное производство энергетических материалов

В последние годы аддитивное производство вызвало большой интерес в оборонной промышленности. Однако, печать энергетических материалов, таких как взрывчатые вещества или твердое топливо до конца не изучены. В настоящее время проводятся исследовательские работы с целью предложить соответствующие материалы и методы 3D-печати для производства энергетических материалов.

В работе [42] использован метод струйной печати для подготовки образцов энергетических материалов с субмиллиметровыми размерами. Струйная печать широко применима к любому материалу, который можно диспергировать. Использование жидкости в качестве носителя обеспечивает неотъемлемые преимущества безопасности при обработке, приводит к гомогенному осаждению и может быть использовано для улучшения свойств материала за счет поверхностных взаимодействий, таких как смачивание и капиллярность. Для нанесения дисперсии частиц энергетического материала используется нестандартная система струйной печати. Струйная печать проведена с использованием модифицированной системы управления движением – Robocaster. Robocaster представляет собой модульную систему и может применены в режиме струйной печати, режиме Robocasting (экструзия суспензии через тонкий дозирующий наконечник) или других режимах с различными дозирующими устройствами. Пьезоэлектрический дозатор P9 PipeJet™ (BioFluidix GmbH, Фрайбург) использован для дозирования капель. В дозаторе PipeJet™ используется полимерный капилляр с внутренним диаметром 200 мкм, заполненный жидкостью, который жестко зажимается в приспособлении и удаляется поршнем с пьезоэлектрическим приводом. Энергетическая смесь была изготовлена из двух термитов с микронноразмерными частицами, состоящих из диспергаторов Al/MoO₃ и Al/Bi₂O₃. На образцах было видно шероховатость поверхности, но примерно после 40 проходов печати была установлена однородная морфология печатных линий. Шероховатость поверхности наблюдалась в линиях с несколькими проходами, но усреднялась с последующими проходами печати. Было видно, что оба состава термитов были относительно хорошо смешаны. Обнаружено, что горение в термитах распространяется как проводящими, так и конвективными режимами, часто переходя между ними. Полагается, что это происходит из-за пустот внутри термита или на границе термита/удержания. В этой серии экспериментов не наблюдалось влияния размера на скорость горения, но требуются дальнейшие эксперименты.

В работе [43] использован 3D-принтер, в виде настольного принтера на основе экструзии материалов (Printrobot Simple Metal). FDM™ принтер был усовершенствован путем замены исходного экструдера нитей системой Paste&FoodExtractor от компании Printrobot. Эта система позволяет использовать вязкие материалы, загруженные в шприцы, для 3D печатающих деталей. Первоначально был использован шприц HSW 50 мл, потом система была слегка модифицирована для использования шприцев 55 мл от NordsonEFD. Кроме того, по соображениям пиротехнической безопасности алюминиевые

части принтера в настоящее время заменены на пластиковые материалы. В случае нежелательной реакции энергетической нагрузки пластмассовые детали будут создавать менее опасные фрагменты и обеспечивать лучшее разложение соответствующей волны давления.

Сначала были проведены испытания на экструзию с различными композициями: ацетат целлюлозы/ацетон (АЦ/А), энергетический материал/ацетон (ЭМ/А), этиленвинилацетат/ацетон (ЭВА/А). Было проведено исследование поведения материала во время экструзии. Во время выдавливания из шприца композиция ЭВА/А показала значительное набухание, тогда как в тех же условиях не наблюдалось набухания для смеси на основе АЦ/А. Кроме того, экструзия АЦ/А была очень похожа на ЭМ/А. Нити АЦ/А и ЭМ/А, были близки с точки зрения адгезионных свойств, в то время как нить ЭВА/А оказалась очень липкой. Следовательно, АЦ/А была оставлена для использования в качестве инертной композиции, так как не было разрешение на использование энергетических материалов. Они проводились при комнатной температуре и никакая часть не нагревалась на принтере. Для каждой инертной композиции было невозможно построить идеальный и надежный первый слой. Это должно быть решено путем оптимизации параметров печати. Более того, отверждение напыленной композиции оказалось в том же временном интервале по сравнению со стандартными материалами для 3D-печати. Были предприняты попытки построить последовательные слои. Чтобы получить другой слой, необходимо было один слой который должен быть полностью высушен и отвержден.

Исследователи из университета Пердью (США) [44] в качестве метода использовали метод струйной печати, а в качестве энергетических материалов нанотермита, приготовленной из двух компонентов, топливо и окислитель, и были испытаны на энергетические характеристики. Подготовленную массу загружали в пьезоэлектрические струйные сопла на 70 мкм (MicroDrop, MD-K-130-022) и закрепляли над двухосной линией линейного позиционирования (Aerotech Planar DL 200-XY, ход 200 мм, точность 0,5 мкм), которая контролируется собственной программой LabView. Две в значительной степени инертных коллоидных суспензии nanoалюминия и наноразмера оксида меди (II) в диметилформамиде с поливинилпирролидоном последовательно наносили на подложку с помощью пьезоэлектрической струйной печати. Материалы осаждали таким образом, чтобы капли оксида алюминия и меди (II) были смежными и перекрывались, чтобы обеспечить смешивание компонентов на месте. Чередуя осаждения повторяли для создания образца с несколькими слоями энергетических материалов. Результаты

исследования показало, что составляющие материала были сравнительно смешаны. Эта доказывает целесообразность струйной печати в качестве средства для нанесения энергетических материалов из двух в основном инертных суспензий. При этом это дает нам для более безопасной обработки материалов и разработки широкого спектра энергетических материалов, которые ранее считались несовместимыми со струйной печатью.

В работе исследователей из университета Пердью [45], успешно использован 3D принтер, сохраняя стабильные характеристики сгорания композиций. Одной из основных проблем, связанных с аддитивным производством энергетических материалов, это – несоответствие печати влияющие на эффективность сгорания.

Реактивная нить, содержащая поливинилиденфторид (ПВДФ) связующее с 20% массовой загрузкой алюминия (Al) была приготовлена с использованием промышленного экструдера для нити и напечатана с использованием MakerbotReplicator 2X. ПВДФ был выбран из-за его низкой температуры плавления (175 °C) и температуры начала разложения (375 °C). Частицы алюминия размером 3 микрон был выбран в качестве источника топлива над частицами nanoалюминия из-за проблем безопасности во время процесса экструзии волокна. Эффективность печати энергетических образцов сравнивалась со стандартными материалами для 3D-печати. Было установлено, что согласованные параметры печати позволяют успешно изготовить образцы со 100% заполнением с небольшим количеством дефектов. Оказалось крайне необходимым отрегулировать высоту слоя и использовать более медленную, чем по умолчанию, скорость печати из-за низкого индекса текучести расплава ПВДФ по сравнению со стандартными материалами. Нить Al/ПВДФ была напечатана для получения реактивных образцов, а параметры печати были оптимизированы для улучшения воспроизводимости характеристик сгорания напечатанных образцов. Было показано, что качество печати энергетического волокна сопоставимо со стандартными материалами, такими как ABS.

Заключение

Таким образом, можно предположить, что развитие 3D-печати для производства энергетических материалов будет усилено, в то же время появятся новые знания в этой области, которые будут способствовать ее последующему развитию. В ближайшие десятилетия 3D-печать энергетических материалов будет только прогрессировать.

В 2015 году в РГП на ПХВ «Институт проблем горения» был основан научный центр «3D-принтинг

и IT технологии», где ведутся поисковые работы по использованию данной технологии, в котором развиваются такие направления, как: разработка и создание первого отечественного цветного 3D-принтера; разработка и сборка отечественного 3D-принтера для постройки домов; создание биокаркаса на установке «3D-принтер + электроспиннинг»; послойный синтез металлов и сплавов с плазменным источником энергии.

Литература

- [1]. Колмыкова О.Н., Кудрявцева Т.В. Научно-технический прогресс как фактор повышения уровня жизни населения // Социально-экономические явления и процессы, 2011. № 5-6 (027-028), – С.127-129.
- [2]. Кокцинская Е.М. Технология 3D-печати: обзор последних новостей // Научный журнал «Видеонаука», 2016. – № 2 (2) – С.18-20.
- [3]. Gunduz I. E., McClain M. S., Cattani P., Chiu G. T. C., Rhoads, J. F., Son S. F., 3D printing of extremely viscous materials using ultrasonic vibrations // Additive manufacturing, 2018. – Vol. 22, – P. 98-103. <https://doi.org/16/j.addma.2018.04.029>.
- [4]. З.А. Мансуров, Е.Т. Алиев, Т.П. Дмитриев, Ч.Б. Даулбаев. Аддитивные технологии (3D Printing): монография. Алматы, Қазақ университеті, 2017, 191 с.
- [5]. Lori J. Groven and Mark J. Mezger. Energetic materials. Advanced processing technologies for next-generation materials. Printed energetics. The path toward additive manufacturing of munitions. Chapter 7. 14 Pages.
- [6]. Nannan Guo, Ming C. Leu Additive manufacturing: technology, applications and research needs. Front. Mech. Eng. 2013, 8(3): 215-243
- [7]. Гришин А.С., Бредихина О.В., Помоз А.С., Пономарев В.Г., Красуля О.Н. Новые технологии в индустрии питания – 3Dпечать // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». – 2016. – Т. 4, № 2. – С. 36-44.
- [8]. ASTM. ASTM F2792 – 12a standard terminology for additive manufacturing technologies.
- [9]. Yuanbin W., Blache R., Xun X. Selection of additive manufacturing processes // Rapid prototyping journal, 2017. – Vol. 23, № 2, – P. 434-447.
- [10]. Ze-Xian L., Yen T.C., Ray M. R., Mattia D., Metcalfe I.S., Patterson D. A. Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques // Journal of membrane science, 2016. – Vol 523, № 1, – P. 596-613.
- [11]. Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. An overview on 3D printing technological, materials, printing technology // Procedia manufacturing, 2019. – Vol. 35 – P. 1286-1296.
- [12]. Syed A. M. T., Elias P. K., Amit B., Susmita B., Lisa O., Charitidis C. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities // Materials today, 2017. – Vol. 1, – P. 1-16.
- [13]. Pinkerton A. J. Laser direct metal deposition: theory and applications in manufacturing and maintenance // Advances in laser materials processing technology, research and application. Woodhead publishing series in welding and other joining technologies, 20, – P. 461-491.
- [14]. Ugur M.D., Gharehpapagh B., Yaman U., Dolen M. The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0 // Procedia manufacturing, 2017. – Vol. 11, – P. 545-554.
- [15]. Michael Molitch-Hou. Overview of additive manufacturing process // Additive manufacturing materials, processes, quantifications and applications, 2018, – P. 1-38.
- [16]. Denisse Ortiz-Acosta, Tanya Moore. Functional 3D printed polymeric materials // Functional materials. Edited by Dipti Sahu.
- [17]. Yee L. Y., Yong S.E.T., Heang K.J.T., Zheng K. P., Xue Y. L., Wai Y. Y., Siang C. H. T., Augustinus L. 3D printed bio-models for medical applications // Rapid prototyping journal, 2017. – Vol. 23, № 2, – P. 227-235.
- [18]. Yee Ling Yapa, Chengcheng Wanga, Swee Leong Singa, Vishwesh Dikshita, Wai Yee Yeonga, JunWeib. Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks // Precision Engineering, – Vol. 50, October 2017, – P. 275-285.
- [19]. Tiwari S.K., Pande S., Agrawal S., M. Bobade S. Selection of selective laser sintering materials for different applications // Rapid prototyping journal, 2015.– Vol. 21, № 6, – P. 630-648.
- [20]. Anna Aimar, Augusto Palermo, Bernardo Innocenti. The role of 3D printing in medical applications: a state of the art // Journal of healthcare engineering, Volume 2019, Article ID 5340616, 10 pages.
- [21]. Low Z., Chua Y.T., Ray B.M., Mattia D., Metcalfe I.S., Patterson D.A. Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques // Journal of membrane science, 2017.– Vol. 523, № .1, – P. 596-613.
- [22]. Goldy Kata, Nelofar Tyag, Ashish Joshi. Digital light processing and its future applications // International journal of scientific and research publications, Volume 3, Issue 4, 2013, ISSN 2250-3153.
- [23]. Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B, 2018. – Vol. 143, – P. 172-196.
- [24]. Kaufui V. Wong, Aldo Hernandez. A review of additive manufacturing. Review article // International scholarly research network ISRN

- Mechanical engineering, Volume 2012, Article ID 208760, 10 pages.
- [25]. Ligon S. C., Liska R., Stampfl J., Gurr M. Mülhaupt R. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing // *Chemical reviews*, 2017. – Vol. 117, № 15, – P. 212-290.
- [26]. Yap Y. L., Dikshit V., Lionar S. P., Yang H., Lim J. C., Qi X., Yeong W. Y., Wei J. Investigation of fiber reinforced composite using multi-material 3D printing // in 27th solid freeform fabrication symposium, Austin, 2016.
- [27]. Horst D.J., Duvoisin C.A., Viera R.A. Additive manufacturing at industry 4.0: a review // *International journal of engineering and technical research*, 2018. – Vol. 8, № 8, – P. 1-8.
- [28]. Nesma T. Aboulkhair, Marco Simonelli, Luke Parry, Ian Ashcroft, Christopher Tuck, Richard Hague. 3D printing of aluminium alloys: additive manufacturing of aluminium alloys using selective laser melting // *Progress in materials science*, Volume 106, December 2019, 100578
- [29]. Trevisan F., Calignano F., Aversa A., Marchese G., Lombardi M., Biamino S., Ugues D., Manfredi D. Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications // *Journals indexing & metrics*, 2018. – Vol. 16, № 2.
- [30]. Hitzler L., Alifui-Segbaya F., William P., Heine B., Heitzmann M., Hall W., Merkel M., Ochner A. Additive manufacturing of cobalt based dental alloys: analysis of microstructure and physicomechanical properties // *Advances in materials science and engineering*, 2018. – Vol. 8, – P. 1-12.
- [31]. Murr L. E. Frontiers of 3D Printing. Additive manufacturing: from human organs to aircraft fabrication // *Journal of materials sciences and technology*, 2016. – Vol. 3, № 10, – P. 987-995.
- [32]. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms // *International materials reviews*, 2012, – Vol. 57, № 3, – P. 133-164.
- [33]. Chacon J.M., Caminero M.A., Nunez P.J., Garcia-Plaza E., Garcia-Moreno I., Reverte J.M. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties // *Composites science and technology*, – Vol. 181, September 2019, 107688
- [34]. Dizon J.R.C., Jr A.H.E., Chen Q., Advincola R.C. Mechanical characterization of 3d-printed polymers // *Additive manufacturing*, 2018. – Vol. 20, – P. 44-67.
- [35]. Sunpreet Singh, Seeram Ramakrishna, Filippo Berto. 3D Printing of polymer composites: A short review // *Mat Design Process Comm.* 2019. <https://doi.org/10.1002/mdp2.97>
- [36]. Shaukat Ali, Karl Kolter, Matthias Karl. Evaluation of different polymers in 3D printing technologies // *American pharmaceutical review*, October 18, 2019.
- [37]. Zhangwei Chen, Ziyong Li, Junjie Li, Chengbo Liu, Changshi Lao, Yuelong Fu, Changyong Liu, Yang Li, Pei Wang, Yi He. 3D printing of ceramics: A review // *Journal of the european ceramic society*, 39 (2019). – P. 661-687.
- [38]. Owen D., Hickey J., Cusson A., Ayeni O. I., Rhoades J., Yifan D., Limmin W., Hye-Yeong P., Nishant H., Raikar P.P., Yeon-Gil, Jing Z. 3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer // *Progress in additive manufacturing*, 2018. Vol 1, – P. 1-7.
- [39]. Hao W., Liu Y., Zhou H., Chen H., Fang D. Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composite // *Polymer Testing*, 2018.– Vol. 65, – P. 29-34.
- [40]. Sathishkumar T.P., Satheeshkumar S., Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites – a review // *Journal of reinforced plastics and composites*, 2014. – Vol. 33, № 13, – P. 1-14.
- [41]. Liu Z., Zhang L., Yu E., Ying Z., Zhang Y., Liu X., Eli W. Modification of glass fiber surface and glass fiber reinforced polymer composites challenges and opportunities: from organic chemistry perspective // *Current organic chemistry*, 2015.– Vol. 19. № 11, – P. 991-1010.
- [42]. Alexander S. Tappan, J. Patrick Ball, James W. Colovos. Inkjet printing of energetic materials: Al/MoO₃ and Al/Bi₂O₃ thermite // *The 38th International pyrotechnics seminar*, Denver, CO, June 10-15, 2012.
- [43]. Chirolì M., Ciszek F., Baschung B. Additive manufacturing of energetic materials // *Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An additive manufacturing conference*. Reviewed paper. – P. 1003-1011.
- [44]. Allison K. Murray, Tugba Isik, Volkan Ortalan, I. Emre Gunduz, Steven F. Son, George T.-C. Chiu, Jeffrey F. Rhoads. Two-component additive manufacturing of nanothermite structures via reactive inkjet printing // *Journal of applied physics*, 2017, 122, – P. 184901-1-184901-5.
- [45]. Trevor J. Fleck, Allison K. Murray, I. Emre Gunduz, Steven F. Son, George T.-C. Chiu, Jeffrey F. Rhoads. Additive manufacturing of multifunctional reactive materials // *Additive manufacturing* 17 (2017) – P.176-182.

Development prospects of 3D printing

G.M. Naurzbayeva^{1,2}, M. Nazhipkyzy^{1,2}, N.K. Zhylybayeva¹, Z.A. Mansurov^{1,2}, G.R. Mitchell^{3,4}

¹Institute of Combustion Problems, Bogenbai batyr str., 172, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, ave. Al-Farabi 71, Almaty, Kazakhstan

³Polytechnic Institute of Leiria, General Norton de Matos str., 2411-901, Leiria, Portugal

⁴Centre for rapid and sustainable product development, Rua de Portugal str., 2430-028, Marinha Grande, Portugal

ABSTRACT

This article discusses the main processes, materials and applications of modern additive manufacturing technology and presents future research needs for this technology. A brief description of the types of 3D printing is provided. The main types of materials and their combinations used in 3D printing are considered. The advantages and disadvantages of the developed 3D printing technology are shown. The main problems of the practical application of 3D printing for energetic materials are identified. The directions of development and improvement of this technology are considered.

Keywords: additive manufacturing, energetic materials, 3D printing, 3D printer, printing methods.

3D басып шығару дамуының болашағы

Г.М. Наурызбаева^{1,2}, М. Назипқызы^{1,2}, Н.К. Жылыбаева¹, З.А. Мансуров^{1,2}, Дж.Р. Митчелл^{3,4}

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көшесі 172, Алматы, Қазақстан

²эл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, эл-Фараби даңғ. 71, Алматы, Қазақстан

³Лейрия политехникалық институты, Генерал Нортон де Матос көшесі, 2411-901, Лейрия, Португалия

⁴Өнімнің тез және тұрақты дамуы орталығы, Руа де Португалия көшесі, 2430-028, Марина Гранде, Португалия

АҢДАТПА

Бұл мақалада заманауи қоспа жасау технологиясының негізгі үрдістері, материалдары және аддитивті өндірістің заманауи технологиясын қолданылу, болашақ қажеттіліктерге осы технологияны зерттеулерде қолданылу қарастырылған. 3D басып шығарудың түрлеріне қысқаша сипаттама берілген. 3D басып шығаруда қолданылатын материалдардың негізгі түрлері және олардың комбинациясы қарастырылған. 3D басып шығару технологиясының артықшылықтары мен кемшіліктері көрсетілген. Энергетикалық материалдар үшін 3D басып шығаруды практикалық қолданудың негізгі проблемалары анықталды. Осы технологияны дамыту және жетілдіру бағыттары қарастырылған.

Түйінді сөздер: аддитивті өндіріс, энергетикалық материалдар, 3D басып шығару, 3D принтер, басып шығару әдістері.