



УДК 669.018.58

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-6-19>

Обзорная статья

Review article



Обзор 3D-печати изделий из магнитных материалов: виды, применение, достижения и проблемы

Г. А. Конов, А. К. Мазеева[✉], Д. В. Масайло,

Н. Г. Разумов, А. А. Попович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

mazeevaalina@gmail.com

Аннотация. 3D-печать, или аддитивное производство (АП), – это активно развивающаяся область техники, позволяющая изготавливать уникальные изделия практически любой сложной формы, которую зачастую невозможно получить традиционными технологиями. В настоящее время помимо работ с изделиями из полимерных и металлических конструкционных материалов востребованной также становится 3D-печать изделий из функциональных материалов. В данном обзоре представлен анализ литературных данных по 3D-печати изделий из магнитных материалов. Кратко рассмотрены основные технологии АП – фотополимеризация в ванне, селективное лазерное спекание, струйное нанесение связующего, моделирование методом наплавления, прямое написание чернилами, электронно-лучевая плавка, прямой подвод энергии и материала, синтез на подложке с помощью лазера, а также используемые в АП магнитные материалы – магнитотвердые сплавы Nd-Fe-B и Sm-Co, магнитотвердые и магнитомягкие ферриты, магнитомягкие сплавы типа пермаллоев и электротехнических сталей. Показано, что на данный момент материалы, изготовленные методами 3D-печати, пока уступают по своим свойствам аналогичным материалам, полученным более традиционными методами, однако основные преимущества 3D-печати – создание единичных изделий сложной формы и сокращение отходов материала, при этом ведутся работы по улучшению комплекса свойств. В некоторых случаях, например при использовании металл-полимерных композиций, магнитные характеристики 3D-изделий из них в целом уже сопоставимы с традиционными аналогами. В обзоре приведены основные направления применения 3D-печати магнитных изделий – в частности, показано, что весьма перспективно изготовление мягких роботов с быстрым откликом и высокой степенью свободы, а также магнитов с оптимизированной топологией, позволяющих генерировать магнитное поле с высокой степенью однородности. Также представлены основные проблемы 3D-печати магнитных изделий и возможные способы их решения.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивное производство, аддитивные технологии, магнитные материалы

Благодарности: Данная работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-13-00305).

Для цитирования: Конов Г.А., Мазеева А.К., Масайло Д.В., Разумов Н.Г., Попович А.А. Обзор 3D-печати изделий из магнитных материалов: виды, применение, достижения и проблемы. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2024;18(1):6–19. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-6-19>

Exploring 3D printing with magnetic materials: Types, applications, progress, and challenges

G. A. Konov, A. K. Mazeeva[✉], D. V. Masaylo,

N. G. Razumov, A. A. Popovich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Polytekhnicheskaya Str., St. Petersburg 195251, Russian Federation

mazeevaalina@gmail.com

Abstract. 3D printing, also known as additive manufacturing (AM), represents a rapidly evolving technological field capable of creating distinctive products with nearly any irregular shape, often unattainable using traditional techniques. Currently, the focus in 3D printing

extends beyond polymer and metal structural materials, garnering increased attention towards functional materials. This review conducts an analysis of published data concerning the 3D printing of magnetic materials. The paper provides a concise overview of key AM technologies, encompassing vat photopolymerization, selective laser sintering, binder jetting, fused deposition modeling, direct ink writing, electron beam melting, directed energy deposition and laser powder bed fusion. Additionally, it covers magnetic materials currently utilized in AM, including hard magnetic Nd–Fe–B and Sm–Co alloys, hard and soft magnetic ferrites, and soft magnetic alloys such as permalloys and electrical steels. Presently, materials produced through 3D printing exhibit properties that often fall short compared to their counterparts fabricated using conventional methods. However, the distinct advantages of 3D printing, such as the fabrication of intricately shaped individual parts and reduced material wastage, are noteworthy. Efforts are underway to enhance the material properties. In specific instances, such as the application of metal-polymer composites, the magnetic properties of 3D-printed products generally align with those of traditional analogs. The review further delves into the primary fields where 3D printing of magnetic products finds application. Notably, it highlights promising areas, including the production of responsive soft robots with increased freedom of movement and magnets featuring optimized topology for generating highly homogeneous magnetic fields. Furthermore, the paper addresses the key challenges associated with 3D printing of magnetic products, offering potential approaches to mitigate them.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, additive technologies, magnetic materials

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 23-13-00305).

For citation: Konov G.A., Mazeeva A.K., Masaylo D.V., Razumov N.G., Popovich A.A. Exploring 3D printing with magnetic materials: Types, applications, progress, and challenges. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(1):6–19. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-6-19>

Введение

Магнитные материалы имеют способность создавать собственное магнитное поле. Они широко применяются в электротехнических устройствах [1–3], таких как генераторы, трансформаторы, системы магнитной записи и др., поэтому возможность изготовления конструкций с заданными геометрией и архитектурой является очень важной. Традиционные методы получения изделий ограничены простыми формами, требуют дорогой оснастки и необходимости сложной постобработки, что приводит к удорожанию малотоннажного производства уникальных изделий и большому количеству отходов материалов. В связи с этим все больше исследований посвящено разработке новых технологий, в том числе трехмерной 3D-печати.

С помощью 3D-печати возможно создавать конструкции произвольной формы со сложной геометрией из разнообразных материалов, включая полимеры [4; 5], металлы [6–8], керамику [9–11], композиты [12–14] и др. Она позволяет сократить время и затраты на производство и контролировать форму, а также печатать из нескольких материалов и изготавливать конструкции, которые ранее зачастую невозможно было получить традиционными методами. Технология 3D-печати открывает огромные возможности для производства магнитных материалов сложной формы с одновременным сокращением отходов при создании уникальных изделий, неподвластных традиционным методам. Для раскрытия потенциала 3D-печати магнитных материалов требуется дальнейшее изучение материалов и процессов.

Целью данной работы являлся обзор опубликованных к настоящему времени работ по аддитивному производству магнитных материалов, применяющихся для этого конкретных технологий 3D-печати,

областей использования полученных таким способом материалов, возможностей и достижений аддитивных технологий в данном направлении, а также существующих на данный момент проблем и перспектив их решения.

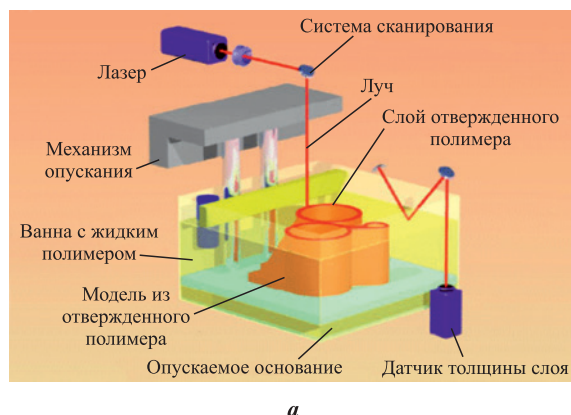
1. Технологии 3D-печати для изготовления магнитных материалов

Для создания магнитных материалов с помощью 3D-печати используются различные технологии и материалы. Рассмотрим некоторые из них.

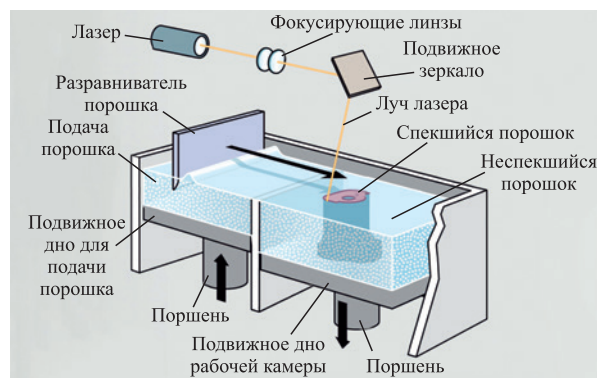
Фотополимеризация в ванне (*vat photopolymerization*) [15; 16] (рис. 1, а) – это технология 3D-печати, в которой используются жидкие полимеры в качестве исходных материалов и лазер, проектор или жидкокристаллический экран в качестве источника излучения.

В технологии SLA (*stereolithography apparatus*) применяется лазер, который методом сканирования по точкам освещает фотополимерную смолу, находящуюся в резервуаре принтера. Лазерный луч направляется на дно резервуара и с помощью зеркальных гальванометров поточно освещает область, которую необходимо отвердить в соответствии с разработанной компьютерной 3D-моделью изделия. Таким образом формируется затвердевший слой согласно заданному сечению модели, затем платформа поднимается на толщину одного слоя и процесс повторяется, пока изделие не будет полностью напечатано.

Проекторы используются в технологии цифровой обработки света (DLP – *digital light processing*) [17] для создания трехмерных объектов из фотополимерной смолы. Они работают путем одновременного освещения всего слоя смолы излучением оптического



а



б

Рис. 1. Метод фотополимеризации в ванне [21] (а) и метод СЛС [22] (б)

Fig. 1. Vat photopolymerization method [21] (a) and SLS method [22] (б)

диапазона, в результате чего весь слой затвердевает за одну операцию без применения сканирования. Для направления световой проекции используются тысячи микрозеркал, известных как цифровые микрозеркальные устройства (DMD – *digital micromirror devices*). Они контролируют отражение света на поверхности смолы, позволяя создавать изображения с помощью пикселей и вокселей, аналогично тому, как это реализовано в 2D- или 3D-камерах.

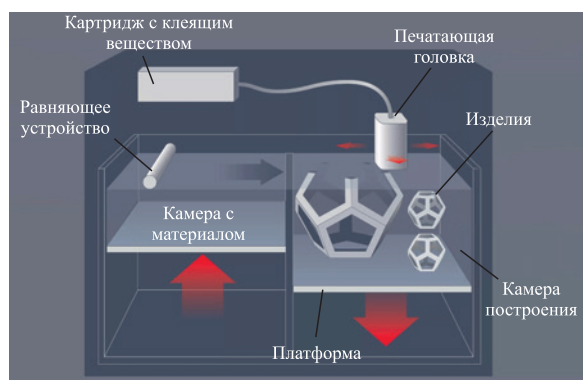
Фотополимеризация также может осуществляться с помощью жидкокристаллического экрана (LCD – *liquid crystal display*) [18–20]. LCD-печать отличается от проекторного метода отсутствием зеркал и применением мощных жидкокристаллических (ЖК) панелей. Вместо этого свет излучается на модель с помощью светодиодов. ЖК-панель блокирует свет в областях, которые не требуют отверждения фотополимера. Только участки, которые должны быть отверждены, позволяют проходить свету на готовую деталь. Этот метод упрощает процесс печати и не требует использования зеркал или гальванометров. Технологии DLP и LCD ускоряют процесс печати по

сравнению с технологией SLA, однако достигаемая степень детализации изделий у них несколько хуже.

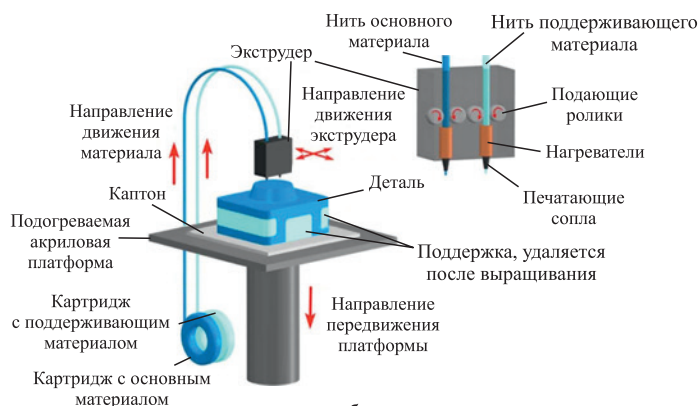
Метод фотополимеризации в ванне известен своей высокой точностью и детализацией, что делает его популярным выбором для изготовления небольших сложных деталей, прототипов и моделей. Магнитные материалы для данного метода создаются с использованием магнитной жидкости или пигмента.

Селективное лазерное спекание (СЛС) [15; 12–24] (рис. 1, б) – это метод, где лазер используется для спекания порошка. В отличие от метода фотополимеризации в ванне, в этом процессе применяются порошки, которые находятся в специальном контейнере вместо жидкого материала. Лазер спекает порошок, создавая твердую поверхность с заданным, согласно заранее подготовленной 3D-модели, сечением. Для получения магнитных изделий методом СЛС в качестве исходных материалов используются магнитные порошки.

Струйное нанесение связующего (BJ – *binder jetting*) [25–29] (рис. 2, а) – это процесс аддитивного производства, который включает нанесение жидкого



а



б

Рис. 2. Методы BJ [33] (а) и FDM [34] (б)

Fig. 2. BJ method [33] (a) and FDM method [34] (б)

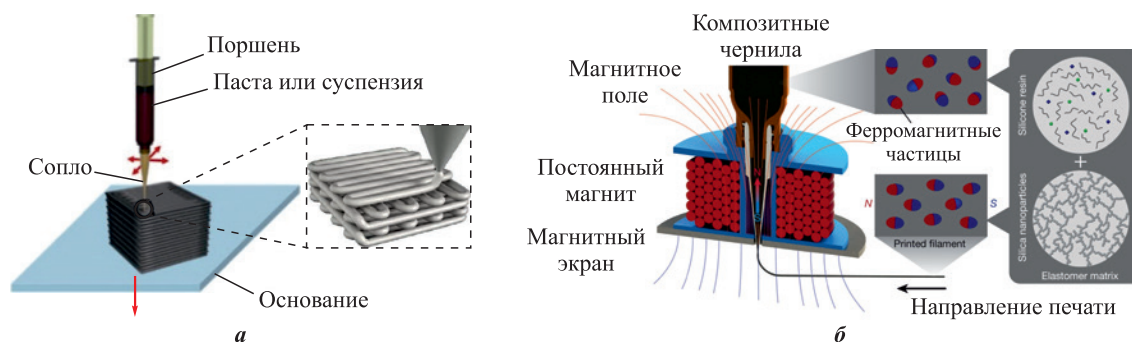


Рис. 3. Технология DIW [32] (а) и технология DIW с приложенным магнитным полем [32] (б)

Fig. 3. DIW technique [32] (a) and magnetic field-assisted DIW technique [32] (b)

связующего вещества на слой порошка для селективного связывания его частиц вместе. Затем слой порошка уплотняется, и процесс повторяется слой за слоем, пока объект не будет полностью сформирован. Несвязанный порошок удаляют, оставляя только затвердевший объект. Для печати магнитных материалов с помощью этого метода используются магнитные частицы, которые в процессе печати смешиваются со связующим веществом.

Моделирование методом наплавления (FDM – *fused deposition modeling*) [29; 30] (рис. 2, б) – этот тип 3D-печати основан на наложении пластичного материала, обычно термопластичных полимеров, на существующие слои. Нить подается в нагретое сопло, где она плавится и осаждается на платформу сборки в точном порядке, определяемом печатаемой 3D-моделью, и таким образом формируются слои материала, которые охлаждаются и затвердевают, образуя объект нужной формы. Для создания магнитных материалов используются специальные композиционные нити, содержащие магнитные частицы.

Прямое написание чернилами (DIW – *direct ink writing*) [31; 32] (рис. 3) – это один из методов

3D-печати, который позволяет создавать сложные структуры с высокой точностью и детализацией. Для DIW применяются материалы в виде жидкой пасты (рис. 3, а), которая после печати затвердевает – или за счет испарения воды в случае использования связующего на водной основе, или путем его полимеризации под воздействием высоких температур порядка 100 °С или источника УФ-излучения. Для управления формой и свойствами напечатанных материалов существует несколько подходов, включая применение магнитного поля (рис. 3, б). Магнитное поле может быть использовано для создания направленной ориентации частиц материала, что может улучшить магнитные свойства и способствовать управлению формой напечатанных объектов.

Электронно-лучевая плавка (EBM – *electron beam melting*) (рис. 4, а) [25; 32; 35; 36] – это метод печати, который использует электронный луч для сплавления металлических порошков в трехмерный объект. При EBM в вакуумной камере генерируется электронный луч, направляемый на порошковый слой, который начинает расплавляться. Таким образом создаются металлические объекты. Для изготов-

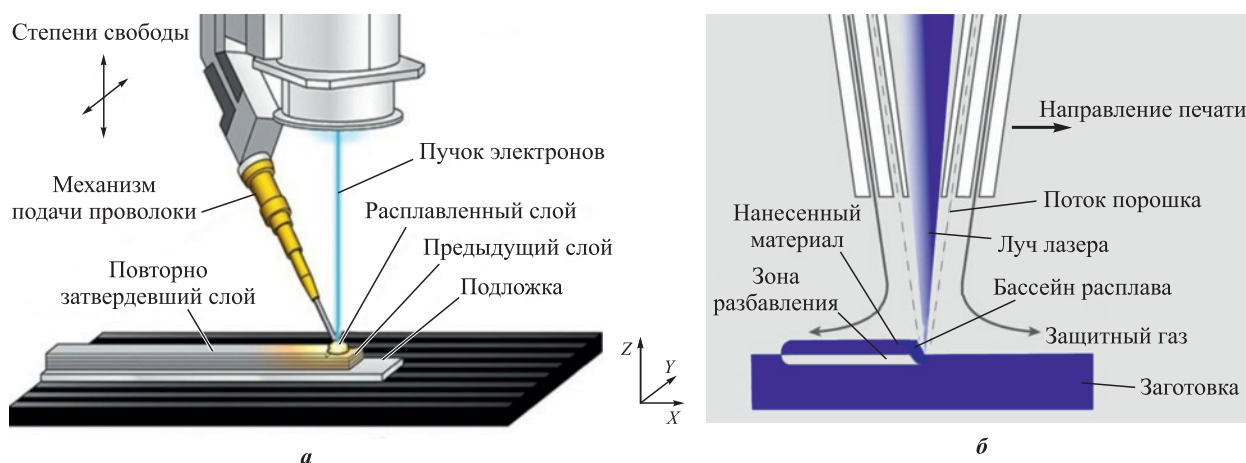


Рис. 4. Методы EBM [37] (а) и DED [38] (б)

Fig. 4. EBM method [37] (a) and DED method [38] (b)

ления магнитных материалов используются порошки с магнитными частицами.

Прямой подвод энергии и материала (DED – *directed energy deposition*) (рис. 4, б) [32; 39; 40] – это метод печати с применением лазера или плазмы для плавления металлических порошков и создания трехмерных объектов. При DED материал нагревается до тех пор, пока не начнет плавиться, а затем его направленный поток сваривается со слоем ниже. Этот метод печати хорошо подходит для создания объектов из металла и керамики. Для получения данным методом магнитных материалов в качестве исходных материалов используются порошки с магнитными частицами.

Синтез на подложке с помощью лазера (L-PBF – *laser powder bed fusion*) [15; 22; 32] (рис. 5) – это метод, аналогичный способу СЛС, однако в данном случае лазер применяется не для спекания, а для сплавления порошка.

2. Обзор магнитных материалов в аддитивном производстве

Магнитные материалы [42; 43] обычно разделяют на две группы: магнитомягкие и магнитотвердые материалы. Критерием отнесения материала к одной из групп является коэрцитивная сила (H_c), которая у магнитомягких материалов должна быть ниже 4 кА/м, а у магнитотвердых, соответственно, – выше 4 кА/м. Магнитомягкие материалы обычно используются для изготовления сердечников трансформаторов, магнитных и электромагнитных экранов, СВЧ-устройств и др., а магнитотвердые – для производства постоянных магнитов, различных датчиков и т.д.

2.1. Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы [42–44] – это материалы, которые легко намагничиваются и размаг-

ничиваются. Они характеризуются низкой коэрцитивной силой (H_c), что позволяет обеспечивать низкие потери на перемагничивание и делает их подходящими для применений, требующих быстрых изменений магнитных полей. Также к таким материалам часто предъявляются требования по высокой индукции насыщения (B_s) и высокой магнитной проницаемости, в том числе при высоких частотах. Магнитомягкие материалы используются в самых разных устройствах – таких, как электродвигатели [45; 46], трансформаторы [47; 48], магнитные датчики [49], магнитные и электромагнитные экраны [50; 51] и т.д.

Пермаллои [52; 53] – это группа сплавов на основе железа и никеля, обладающих высокой магнитной проницаемостью и служащих основой для многих деталей, применяемых в электротехнической аппаратуре. Такие материалы широко используются в промышленности, включая производство моторов, генераторов, индуктивностей, трансформаторов и других устройств. Благодаря своим магнитным свойствам пермаллои могут применяться в 3D-печати для создания сложных магнитных конструкций. Для производства пермалловых деталей с помощью 3D-печати можно использовать технологию L-PBF, обеспечивающую высокую точность и требуемое качество деталей. В частности, в работе [52] 3D-печать с помощью L-PBF применялась для непосредственного изготовления магнитных экранов пермаллоя на основе Ni-Fe волоконно-оптических гироскопов в космических аппаратах. Сравнительная оценка магнитно-мягких свойств напечатанного пермаллоя Ni-15Fe-5Mo с отжигом и без него показала, что они были сопоставимы с таковыми у традиционно обработанных деталей пермаллоя. Это говорит об осуществимости и применимости L-PBF.

Электротехнические стали Fe-Si (содержание железа и кремния может быть в различном соотноше-

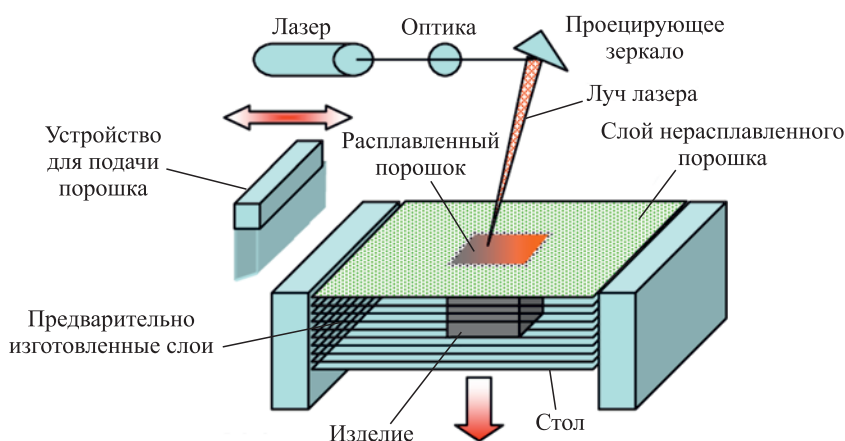


Рис. 5. Метод L-PBF [41]

Fig. 5. L-PBF technique [41]

нии, например 6,9 % Si) [54] – это магнитные материалы, которые обладают высокой магнитной проницаемостью, низкой коэрцитивной силой и высокой электропроводностью, что делает их применяемыми в таких различных областях, как электроника, автомобильная промышленность, микроэлектроника и др. В аддитивном производстве данные сплавы могут быть использованы для создания магнитных компонентов, таких как тороиды, сердечники трансформаторов, магнитопроводов, а также другие элементы с применением метода L-PBF [54].

Магнитомягкие ферриты (NiFe_2O_4 , Fe_3O_4 , ферриты Ni-Zn и Ni-Zn-Cu) используются для изготовления сердечников трансформаторов, элементов СВЧ-устройств, а также могут применяться в качестве магнитных наполнителей при создании мягких роботов и манипуляторов.

2.2. Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы [32; 55–59] способны удерживать сильное магнитное поле даже в отсутствие внешнего магнитного поля и часто используются для изготовления постоянных магнитов. Они трудно намагничиваются, но могут сохранять свою намагниченность после снятия внешнего магнитного поля. Такие материалы должны обладать высокими значениями H_c , B_r и максимального энергетического произведения $(BH)_{\text{max}}$. Они обычно применяются в областях, где требуется сильное и постоянное магнитное поле, например в двигателях, генераторах, магнитных запоминающих устройствах, а также в датчиках различных типов. Одними из самых распространенных материалов, используемых для изготовления постоянных магнитов, являются сплавы на основе систем Nd-Fe-B и Sm-Co , а также магнитотвердые ферриты.

Магниты Nd-Fe-B [60–62] относятся к самым высокоэнергетичным типам магнитов, которые существуют на данный момент. Они обладают высокой плотностью энергии и могут создавать сильные магнитные поля, что делает их очень востребованными в таких различных применениях, как электроника, электромеханика и медицинское оборудование. Как правило, магниты на основе системы Nd-Fe-B получают путем спекания заготовки, спрессованной из исходного порошка, и последующей инфильтрации легкоплавким сплавом на основе системы Pr-Cu для повышения коэрцитивных характеристик. В работе [63] был предложен подход по применению метода L-PBF к смеси порошка Nd-Fe-B и порошка эвтектического сплава $(\text{Pr}_{0,5}\text{Nd}_{0,5})_3(\text{Cu}_{0,25}\text{Co}_{0,75})$ для получения магнита с магнитными зернами $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и немагнитной межзеренной прослойкой за одну технологическую операцию.

Особенностью применения 3D-печати к металлическим материалам, в частности магнитным сплавам Nd-Fe-B , является пористость, которая возникает как в результате низкого уровня введенной энергии излучения и появления зон несплавления, так и из-за слишком высокой дозы введенной энергии, приводящей к интенсивному испарению металла в зоне прохода лазерного луча. Авторы [64] путем варьирования мощности лазера и скорости сканирования в технологии L-PBF подобрали оптимальные режимы для обеспечения стабильности процесса плавления сплава на основе Nd-Fe-B и получения качественного сплавленного трека для последующего изготовления конкурентоспособных постоянных магнитов.

Магнитам на основе Nd-Fe-B при их получении методами металлической 3D-печати также присущи появление трещин и высокая хрупкость. В работе [65] был предложен метод двойного сканирования, когда каждый слой сканировался дважды: первый раз – с полной мощностью лазера, а второй раз – с мощностью вдвое меньшей. За счет частичного переплава уже нанесенного слоя такой подход позволял получать более плотные образцы с меньшим количеством дефектов в виде пор и трещин и избегать их разрушения при отделении от подложки.

Магниты со связующим [66; 67] изготавливаются из полимеров, в которые вводят магнитные частицы – в основном ферриты ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, CoFe_2O_4). Магниты со связующим обладают меньшей энергией, чем традиционные спеченные магниты на основе железа, никеля или кобальта, но могут быть полезны в некоторых случаях, когда необходим легкий и гибкий магнит. К тому же они относительно дешевы и просты в производстве. Изготовление магнитов на основе ферритов в 3D-печати имеет множество преимуществ: во-первых, возможно создание магнитов разных размеров и форм, а во-вторых, они могут быть произведены практически любой геометрии, что является недоступным для традиционных методов.

Одним из наиболее распространенных методов изготовления магнитов на основе ферритов в 3D-печати является метод экструзии материала с приложенным внешним магнитным полем. Он заключается в том, что через сопло подается расплавленный пластик на специальную платформу. После этого создается внешнее магнитное поле с помощью постоянного магнита либо катушки с током. Это поле направлено на композит, состоящий из полимера и магнитных частиц, и заставляет ориентироваться магнитные частицы в полимере в определенном направлении. Затем полимер остывает и затвердевает, и композит принимает окончательную форму анизотропного магнита.

Магниты на основе ферритов со связующим в 3D-печати имеют широкое применение. Они используются для создания рабочих поверхностей,

устройств для хранения данных, магнитных игрушек и многого другого. Кроме того, такие магниты могут быть изготовлены в форме логотипа или другой индивидуальной формы.

На сегодняшний день магниты с полимерным связующим [68–70] получили повышенное внимание в промышленности из-за таких их преимуществ, как сопоставимые магнитные свойства (по сравнению с традиционными методами прессования и литья под давлением), гибкость формы, низкая стоимость и приемлемые механические свойства [71; 72].

Вместо традиционных методов прессования и литья под давлением для изготовления магнитов широко применяются методы 3D-печати. Например, метод ВJ использовался для печати изотропных магнитов на основе Nd–Fe–B с полимерным связующим, с заданной формой, с использованием частиц размером ~70 мкм в качестве исходного материала [26]. По завершении печати полученная грин-модель была отверждена при температуре от 100 до 150 °C. Далее проводилась инфильтрация поверхности уретановой смолой, в результате чего плотность магнита достигла 3,47 г/см³ – это соответствует 46 об. % плотности Nd–Fe–B (7,6 г/см³), что указывает на то, что остаточная индукция образцов магнитов, изготовленных методом струйного нанесения связующего, составляющая порядка 0,3 Тл, сопоставима со значениями остаточной индукции 0,5 и 0,65 Тл, получаемыми у стандартных изотропных магнитов, производимых традиционными методами прессования и литья под давлением [26]. Кроме того, такой подход позволяет управлять магнитными характеристиками в процессе печати, что обеспечивает максимальную эффективность при их использовании.

Магниты Sm–Co [73] также обладают высококоэрцитивными свойствами (их уровень уступает только характеристикам магнитов на основе NdFeB) и могут применяться в 3D-печати, особенно когда требуется высокая температурная стойкость. Магниты на основе системы Sm–Co часто являются многокомпонентными с добавлением таких элементов, как Fe, Cu, Zr. Они обладают высокой энергетической плотностью и характеризуются высокой температурной стабильностью, а также устойчивостью к механическим воздействиям. Благодаря этим уникальным свойствам магниты Sm–Co используются во многих сферах человеческой деятельности, начиная от медицинских приборов и заканчивая электроникой и автомобильной промышленностью.

Однако производство Sm–Co-магнитов в традиционном виде достаточно затратно и трудоемко, что делает их доступность для небольших производителей ограниченной. С этой проблемой можно справиться с помощью 3D-печати. Основные преимущества 3D-печати Sm–Co-магнитов заключаются

в возможности снизить производственные затраты благодаря производству магнитов малыми партиями.

Несмотря на все преимущества, использование 3D-печати (например, L-PBF) для изготовления Sm–Co-магнитов имеет свои недостатки. Одним из них является относительно низкая механическая прочность магнитов, произведенных этим методом, что может ограничивать их применение в некоторых областях, особенно в авиации и на морском транспорте. Тем не менее 3D-печать сплавов Sm–Co представляет огромный потенциал и может стать перспективным направлением для развития производства магнитных материалов в будущем. Сокращение затрат на производство при сохранении качества и производительности, а также возможность производить более сложные изделия сделают 3D-печать Sm–Co-магнитов востребованным методом в промышленности [74].

Магнитотвердые ферриты [75; 76], также известные как керамические или ферритовые магниты, представляют собой тип постоянного магнита, изготовленного из оксида железа и керамики (BaFe₁₂O₁₉, SrFe₁₂O₁₉, MnZnFe₂O₄) [77].

Несмотря на то, что магнитотвердые ферритовые керамические материалы показывают относительно невысокие магнитные свойства, они обладают высокой устойчивостью к коррозии и механическим воздействиям и считаются наиболее дешевым типом магнитных материалов. Их широко применяют в производстве электронных устройств, магнитных систем, моторов, трансформаторов и другого оборудования.

Магнитотвердые ферритовые керамические материалы обычно производятся путем смешивания соответствующих порошков, прессования под давлением и последующего спекания при высокой температуре. Однако с развитием 3D-печати стало возможным изготавливать ферритные компоненты с использованием новых технологий (например, методом DIW [77]). Их магнитные свойства могут быть изменены путем варьирования доли магнитного оксида железа и добавлением других магнитных металлов.

Хотя магнитотвердые ферритовые керамические материалы обладают более низкими магнитными свойствами, чем другие типы магнитов (например, Nd–Fe–B и Sm–Co), они более стабильны и универсальны, что делает их подходящими для широкого спектра применений в различных областях.

3. Области применения 3D-печати изделий из магнитных материалов

3D-печать произвела революцию в обрабатывающей промышленности, позволив создавать сложные формы и конструкции, которые ранее были невозможны при использовании традиционных методов

производства. В сочетании с применением магнитных материалов технология 3D-печати предоставляет широкий спектр инновационных продуктов.

3.1. Магнитные датчики

Одним из наиболее распространенных применений магнитных материалов является производство датчиков. Магнитные датчики используются для определения положения движущегося объекта, измерения скорости вращающегося объекта и обнаружения наличия металлических объектов. Технология 3D-печати позволяет производить датчики сложной формы и требуемых размеров, которые можно настраивать в соответствии с конкретными требованиями. Датчики сложной формы могут быть необходимы для решения определенных задач в различных областях применения, например для медицинской диагностики. Они могут внедряться в организм для мониторинга определенных показателей – температуры, давления, уровня кислорода в крови и др. Магнитные датчики могут быть изготовлены с помощью технологии FDM [68; 78; 79].

3.2. Магнитные приводы

Магнитные приводы – это устройства, которые используют взаимодействие между магнитными полями и магнитными материалами для создания движения. Их широко применяют в различных областях – в частности, в робототехнике, автоматизации и автомобильной промышленности. Технологии 3D-печати (например, SLA и FDM [80; 81]) позволяют производить магнитные приводы [82] сложной геометрии, которые можно настраивать в соответствии с конкретными требованиями. Магнитные приводы, изготовленные с помощью 3D-печати, обладают улучшенными характеристиками [83] и эффективностью по сравнению с традиционными приво-

дами. К примеру, в работе [83] был напечатан магнит с оптимизированной топологией с помощью процесса FDM – под преимуществами в данном случае понимались быстрая и доступная технология производства, повышенный коэффициент мощности искажений и высокая выходная мощность. Оптимизация топологии магнита позволяет изготавливать магниты, формирующие однородное магнитное поле, необходимое в таких сферах, как ядерный магнитный резонанс, магнитометры, датчики, магнитные ловушки и т.д. Применение аддитивных технологий, в частности FDM, позволяет с достаточно высокой точностью воспроизводить заранее подготовленную компьютерную 3D-модель.

3.3. Мягкие роботы

Мягкие приводы и роботы улучшают взаимодействие человека и машины – это происходит благодаря способности мягкого робота выполнять движения с высокой степенью свободы [84]. В отличие от традиционных роботов, состоящих из жестких материалов, мягкие роботы, как правило, основанные на гелях [85; 86], эластомерах [87] и других мягких материалах, обладают способностью адаптироваться к окружающей среде [88]. Более того, мягкие роботы могут работать в магнитном поле путем включения магнитных частиц в полимерную матрицу [89; 90] или покрытия магнитными материалами поверхности полимерных каркасов [91; 92]. Однако сложно реализовать несколько функций без сложной геометрии [93; 94]. 3D-печать позволяет производить сложные конструкции из нескольких материалов. Например, в работах [95; 96] показано, что на сегодняшний день уже напечатан мягкий робот, похожий на червя, с помощью технологии SLA. Этот мягкий робот был изготовлен из композитов на основе магнитных частиц и полимера и способен совершать линейные и вращательные движения, как показано на рис. 6 [95]. С различными режимами передвижения робот с магнитным приводом является многообещающим в приложении для контролируемой доставки лекарств [32].

Технологии 3D-печати открыли новые возможности в производстве магнитных материалов и изделий на их основе. Способность производить сложные формы и конструкции с высокой точностью позволила создавать изделия с улучшенными характеристиками и эффективностью. Использование магнитных материалов, напечатанных на 3D-принтере, широко и разнообразно: от датчиков и исполнительных механизмов до медицинских изделий и устройств хранения данных. Поскольку 3D-печать продолжает развиваться, ожидаются еще более инновационные применения магнитных материалов в будущем.

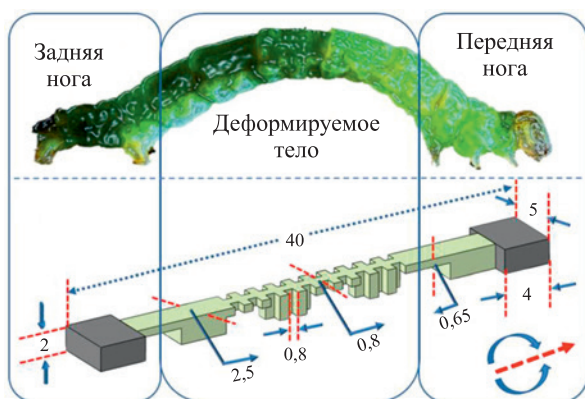


Рис. 6. Конструкция мягкого робота [95]

Fig. 6. Soft robot structure [95]

4. Перспективные направления развития 3D-печати магнитных материалов

Несмотря на то, что современная 3D-печать имеет много явных преимуществ, у нее есть некоторые особенности, когда речь идет о создании магнитных материалов. Ниже перечислены основные существующие на данный момент проблемы и перспективные направления их решения, связанные с 3D-печатью магнитных материалов [32].

4.1. Низкие магнитные свойства

Особенностью магнитных материалов, напечатанных на 3D-принтере, является то, что их магнитные свойства, как правило, ниже, чем у традиционных магнитных материалов. Это связано с тем, что в процессе 3D-печати обычно формируется материал с некоторой пористостью, что означает несколько более низкую плотность напечатанного материала по сравнению с аналогами, полученными традиционными методами, и, соответственно, более низкие магнитные характеристики.

Один из возможных способов решения этой проблемы – разработка исходных магнитных порошков с улучшенными свойствами и дальнейшая оптимизация технологических параметров 3D-печати.

4.2. Ограниченная точность

Еще одной особенностью, связанной с 3D-печатью магнитных материалов, является ограниченная точность процесса печати. Хотя 3D-печать прошла долгий путь с точки зрения точности изготовления изделий и качества их поверхности, она все еще не так точна, как традиционные методы производства, например обработка с ЧПУ. Это может быть проблемой при попытке создать сложные миниатюрные изделия из магнитных материалов. Даже небольшие изменения в геометрии печатной детали могут оказать существенное влияние на магнитные свойства материала, что может ограничить его полезность в определенных применениях.

Одним из возможных способов решения данной проблемы являются выбор метода 3D-печати в зависимости от требуемого уровня качества поверхности изделия и степени детализации, а также использование минимальной постобработки.

4.3. Требования к постобработке

Еще одна проблема 3D-печати магнитных материалов состоит в том, что они часто требуют последую-

щей обработки для достижения желаемых магнитных свойств. Это могут быть последующая термическая обработка, а также механическая обработка, в частности для улучшения качества поверхности. Однако и в традиционных методах получения иногда требуется постобработка, зачастую весьма значительная.

4.4. Ограниченная масштабируемость

Наконец, одна из самых больших нерешенных задач, связанных с 3D-печатью магнитных материалов, – это ограниченная масштабируемость процесса. Хотя 3D-печать является очень гибкой и настраиваемой технологией производства, она еще не способна производить детали в том же масштабе или с той же скоростью, что и традиционные технологии производства.

Это означает, что, хотя 3D-печать может подойти для мелкосерийного производства или прототипирования, она может оказаться непригодной для крупномасштабного производства. Кроме того, ограниченный выбор доступных материалов и необходимость постобработки могут еще больше ограничить масштабируемость 3D-печати магнитных материалов. Тем не менее уже на данном этапе появляются технологии, позволяющие печатать изделия практически неограниченных размеров, такие как крупномасштабное аддитивное производство (BAAM – *big area additive manufacturing*) и проволоочно-дуговое аддитивное производство (WAAM – *wire arc additive manufacturing*) [97].

Заключение

В заключение можно отметить, что 3D-печать магнитными материалами может произвести революцию во многих отраслях промышленности, позволяя создавать уникальные конструкции сложной геометрии, которые ранее невозможно было изготовить с помощью традиционных методов производства. В частности, сочетание 3D-печати с интеграцией магнетизма предоставляет огромные возможности для манипулирования и управления мягкими роботами и приводами, подходящими для чрезвычайно сложных сред, например при доставке лекарств в отдельные части организма. Однако на данный момент есть несколько проблем, связанных с 3D-печатными магнитными материалами, – более низкие магнитные свойства, ограниченная точность, требования к постобработке, ограниченная масштабируемость и др. Несмотря на это, разработка методов 3D-печати магнитных материалов является весьма перспективной областью исследований, которая в будущем может открыть еще большие возможности.

Список литературы / References

1. Gutfleisch O., Willard M.A., Brück E., Chen C.H., Sankar S.G., P. Liu J. Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient. *Advanced Materials*. 2011;23(7):821–842. <https://doi.org/10.1002/adma.201002180>
2. Jang S.M., Seo H.J., Park Y.S., Park H.II, Choi J.Y. Design and electromagnetic field characteristic analysis of 1.5 kW small scale wind power generator for substitution of Nd–Fe–B to ferrite permanent magnet. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012;48(11):2933–2936. <http://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2203111>
3. Zhao W., Lipo T.A., Kwon B.II. Comparative study on novel dual stator radial flux and axial flux permanent magnet motors with ferrite magnets for traction application. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014;50(11):8104404. <http://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2329506>
4. Mao Y., Yu K., Isakov M.S., Wu J., Dunn M.L., Qi H.J. Sequential self-folding structures by 3D printed digital shape memory polymers. *Scientific Reports*. 2015;5:13616. <http://doi.org/10.1038/srep13616>
5. Yuk H., Lu B., Lin S., Qu K., Xu J., Luo J., Zhao X. 3D printing of conducting polymers. *Nature Communications*. 2020;11:1604. <http://doi.org/10.1038/s41467-020-15316-7>
6. Kanyilmaz A., Demir A.G., Chierici M., Berto F., Gardner L., Kandukuri S. Y., Kassabian P., Kinoshita T., Laurenti A., Paoletti L., Plessis A., Razavi N. Role of metal 3D printing to increase quality and resource-efficiency in the construction sector. *Additive Manufacturing*. 2022;50:102541. <http://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102541>
7. Velásquez-García L.F., Kornbluth Y. Biomedical applications of metal 3D printing. *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2021;23:307–338. <http://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-082020-032402>
8. Geng S., Luo Q., Liu K., Li Y., Hou Y., Long W. Research status and prospect of FDM metal 3D printing. Case studies in construction. *Materials*. 2023;18:e01952. <http://doi.org/10.15980/j.tzzz.2023.02.004>
9. Chen Zh., Li Z., Li J., Liu Ch., Lao Ch., Fu Y., Liu Ch., Li Y., Wang P., He Y. 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*. 2019;39(4):661–687. <http://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>
10. Du X., Fu S., Zhu Y. 3D printing of ceramic-based scaffolds for bone tissue engineering: An overview. *Journal of Materials Chemistry B*. 2018;6:4397–4412. <http://doi.org/10.1039/c8tb00677f>
11. Ly M., Spinelli S., Hays S., Zhu D. 3D printing of ceramic biomaterials. *Engineered Regeneration*. 2022;3(1):41–52. <http://doi.org/10.1016/j.engreg.2022.01.006>
12. Kokkinis D., Schaffner M., Studart A.R. Multimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials. *Nature Communication*. 2015;6:8643. <http://doi.org/10.1038/ncomms9643>
13. Saran O.S., Reddy A.P., Chaturya L., Kumar M.P. 3D printing of composite materials: A short review. *Materials Today Proceeding*. 2022;64(1):615–619. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.144>
14. Yuan C., Wang F., Qi B., Ding Z., Rosen D.W., Ge Q. 3D printing of multi-material composites with tunable shape memory behavior. *Materials and Design*. 2020;193:108785. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108785>
15. Kafle A., Luis E., Silwal R., Pan H.M., Shrestha P.L., Bas-tola A.K. 3D/4D printing of polymers: Fused deposition modelling (FDM), selective laser sintering (SLS), and stereolithography (SLA). *Polymers*. 2021; 13(18):3101. <http://doi.org/10.3390/polym13183101>
16. Peterson E. What is stereolithography? | 3D printing. URL: <https://www.livescience.com/38190-stereolithography.html> (accessed: 26.06.2023).
17. 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;8:331–351. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00336-0>
18. Quan H., Zhang T., Xu H., Luo S., Nie J., Zhu X. Photocuring 3D printing technique and its challenges. *Bioactive Materials*. 2020;5:110–115. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.003>
19. Saitta L., Tosto C., Pergolizzi E., Patti A., Cicala G. Liquid crystal display (LCD) printing: A novel system for polymer hybrids printing. *Macromolecular Symposia*. 2021;395:1–3. <https://doi.org/10.1002/masy.202000254>
20. 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. *Dentistry Journal*. 2022;10:181. <https://doi.org/10.3390/dj10100181>
21. Стереолитография (векторная печать). URL: <http://www.mcp.by/technology/?id=1> (дата обращения: 26.06.2023).
22. Ефремов Д.Б., Герасимова А.А. Получение магнитов из материала системы Fe–Cr–Co методами селективного лазерного спекания. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(10):721–727. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-721-727>
Efremov D.V., Gerasimova A.A. Production of Fe–Cr–Co-based magnets by selective laser sintering. *Steel in Translation*. 2021;51:688–692. <http://doi.org/10.3103/S0967091221100028>
23. Han W., Kong L., Xu M. Advances in selective laser sintering of polymers. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2022;4:042002. <http://doi.org/10.1088/2631-7990/ac9096>
24. Мальцева В.Е., Андреев С.В., Незнахин Д.С., Уржумцев А.Н., Селезнева Н.В., Волегов А.С. Магнитные свойства постоянных магнитов NdFeB, изготовленных методом селективного лазерного спекания. *Физика металлов и металловедение*. 2022;123(8):789–795. Maltseva V.E., Andreev S.V., Neznakhin D.S., Urzhumtsev A.N., Selezneva N.V., Volegov A.S. The magnetic properties of a NdFeB permanent magnets prepared by selective laser sintering. *Physics of Metals and Metallography*. 2022;123(8):740–745. <http://doi.org/10.1134/S0031918X2208004X>
25. Gokuldoss P.K., Kolla S., Eckert J. Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam

- melting and binder jetting-selection guidelines. *Materials*. 2017;10(6):672. <http://doi.org/10.3390/ma10060672>
26. Paranthaman M.P., Shafer C.S., Elliott A.M., Siddel D.H., McGuire M.A., Springfield R.M., Martin J., Fredette R., Ormerod J. Binder jetting: A novel NdFeB bonded magnet fabrication process. *JOM*. 2016;68(7):1978–1982. <http://doi.org/10.1007/s11837-016-1883-4>
27. Shakor P., Chu S.H., Puzatova A., Dini E. Review of binder jetting 3D printing in the construction industry. *Progress in Additive Manufacturing*. 2022;7:643–669. <http://doi.org/10.1007/s40964-021-00252-9>
28. Ziaee M., Crane N.B. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*. 2019;28:781–801. <http://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>
29. Chatzipirpiridis G., Gervasoni S., Fischer C., Ergeneman O., Pellicer E., Nelson B.J., Pané S. 3D printing of thermoplastic-bonded soft- and hard-magnetic composites: Magnetically tuneable architectures and functional devices. *Advanced Intelligent Systems*. 2019;1(6):1900069. <http://doi.org/10.1002/aisy.201900069>
30. Ziemann S.J., Fischer N.A., Lu J., Lee T.J., Ennis M., Höft T.A., Nelson-Cheeseman B. Hard magnetic elastomers incorporating magnetic annealing and soft magnetic particulate for fused deposition modeling. *AIP Advances*. 2022;12:115305. <http://doi.org/10.1063/5.0119669>
31. Wan X., Luo L., Liu Y., Leng J. Direct ink writing based 4D printing of materials and their applications. *Advanced Science*. 2020;7(16):2001000. <http://doi.org/10.1002/advs.202001000>
32. Wei X., Jin M.L., Yang H., Wang X.X., Long Y.Z., Chen Z. Advances in 3D printing of magnetic materials: Fabrication, properties, and their applications. *Journal of Advanced Ceramics*. 2022;11(5):665–701. <http://doi.org/10.1007/s40145-022-0567-5>
33. Озеров А. Что такое Binder Jetting и как изготовить литейную форму за сутки. URL: <https://blog.iqb.ru/binder-jetting/> (дата обращения: 26.06.2023).
34. Технологии. Цифровая лаборатория FABLAB. URL: <https://fablab.vvsu.ru/about/technologies/> (дата обращения: 26.06.2023).
35. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – A review. *International Materials Reviews*. 2016;61:361–377. <http://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>
36. Radulov I.A., Popov V.V.Jr., Koptuyug A., Maccari F., Kovalevsky A., Essel S., Gassmann J., Skokov K.P., Bamberger M. Production of net-shape Mn–Al permanent magnets by electron beam melting. *Additive Manufacturing*. 2019;30:100787. <http://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100787>
37. Аддитивное формообразование изделий из металлов и сплавов пучком электронов: Прямая подача энергии и материала в зону плавления (часть 2). URL: <https://additiv-tech.ru/publications/additivnoe-formoobrazovanie-izdeliy-iz-metallov-i-splavov-puchkom-elektronov-pryamaya> (дата обращения: 26.06.2023).
38. What is 3D printing – 3D Printer for sale. URL: <http://d3dprinter.com/docs/3d-printing-document/what-is-3d-printing/> (accessed: 26.06.2023).
39. Jinoop A.N., Paul C.P., Bindra K.S. Laser assisted direct energy deposition of Hastelloy-X. *Optics and Laser Technology*. 2019;109:14–19. <http://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.07.037>
40. Sun K., Li F., Rong C., Zuo L. Direct energy deposition applied to soft magnetic material additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;84:162–173. <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.004>
41. Mumtaz K.A., Erasenthiran P., Hopkinson N. High density selective laser melting of Waspaloy®. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;195(1–3):77–87. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.117>
42. Chaudhary V., Mantri S.A., Ramanujan R.V., Banerjee R. Additive manufacturing of magnetic materials. *Progress in Materials Science*. 2020;114:100688. <http://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100688>
43. Périgo E.A., Jacimovic J., Ferré F.G., Scherf L.M. Additive manufacturing of magnetic materials. *Additive Manufacturing*. 2019;30:100870. <http://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100870>
44. Goll D., Schuller D., Martinek G., Kunert T., Schurr J., Sinz C., Schubert T., Bernthaler T., Riegel H., Schneider G. Additive manufacturing of soft magnetic materials and components. *Additive Manufacturing*. 2019;27:428–439. <http://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.021>
45. Lin D., Yang F., Gong D., Li R. Bio-inspired magnetic-driven folded diaphragm for biomimetic robot. *Nature Communications*. 2023;14:163. <http://doi.org/10.1038/s41467-023-35905-6>
46. Wang D., Wang J., Shen Z., Jiang Ch., Zou J., Dong L., Fang N.X., Gu G. Soft actuators and robots enabled by additive manufacturing. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2023;6:31–63. <http://doi.org/10.1146/annurev-control-061022-012035>
47. Hu X., Liang Z., Li Q., Hu S., Qu S. Experimental study on the magnetic permeability of inclusion filled soft polymeric composite for soft-core transformer applications. *Polymer Testing*. 2022;106:107430. <http://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107430>
48. Ram B.S., Paul A.K., Kulkarni S.V. Soft magnetic materials and their applications in transformers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021;537:168210. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168210>
49. Tan E.L., Pereles B.D., Shao R., Ong J., Ong K.G. A wireless, passive strain sensor based on the harmonic response of magnetically soft materials. *Smart Materials and Structures*. 2008;17:025015. <http://doi.org/10.1088/0964-1726/17/2/025015>
50. Ahmad H.S., Hussain T., Nawab Y., Salamat S. Effect of dielectric and magnetic nanofillers on electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon/epoxy composites. *Journal of Composite Materials*. 2022;56(1):69–82. <http://doi.org/10.1177/00219983211052615>
51. Gurusiddesh M., Madhu B.J., Shankaramurthy G.J. Structural, dielectric, magnetic and electromagnetic interference shielding investigations of polyaniline decorated Co_{0.5}Ni_{0.5}Fe₂O₄ nanoferrites. *Journal of Material Science: Materials in Electronics*. 2018;29(4):3502–3509. <http://doi.org/10.1007/s10854-017-8285-4>

52. Li B., Zhang L., Fu W., Xu H. General investigations on manufacturing quality of permalloy via selective laser melting for 3D printing of customized magnetic shields. *JOM*. 2020;72(8):2834–2844.
<http://doi.org/10.1007/s11837-019-03979-7>
53. Yang J., Zhu Q., Wang Z., Xiong F., Li Q., Yang F., Li R., Ge X., Wang M. Effects of metallurgical defects on magnetic properties of SLM NiFeMo permalloy. *Materials Characterization*. 2023;197:112672.
<http://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112672>
54. Garibaldi M., Ashcroft I., Simonelli M., Hague R. Metallurgy of high-silicon steel parts produced using Selective Laser Melting. *Acta Materialia*. 2016;110:207–216.
<http://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.03.037>
55. Coey J.M.D. Hard magnetic materials: A perspective. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011;47(12):4671–4681.
<http://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2166975>
56. Гореликов Е.С., Тарасов В.П., Кутепов А.В., Осипенкова А.А. Влияние галлия и меди на коррозионные свойства магнитотвердых материалов системы Nd–Fe–B. *Цветные металлы*. 2018;7:12–16.
Gorelikov E.S., Tarasov V.P., Kutepov A.V., Osipenkova A.A. The influence of gallium and copper on the corrosion properties of magnetically hard materials of the Nd–Fe–B system. *Tsvetnye Metally*. 2018;7:12–16. (In Russ.).
<http://doi.org/10.17580/tsm.2018.07.02>
57. Manaf A., Buckley R.A., Davies H.A. New nanocrystalline high-remanence Nd–Fe–B alloys by rapid solidification. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1993;128(3):302–306.
[http://doi.org/10.1016/0304-8853\(93\)90475-H](http://doi.org/10.1016/0304-8853(93)90475-H)
58. Li D., Pan D., Li Sh., Zhang Zh. Recent developments of rare-earth-free hard-magnetic materials. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*. 2016;59(1):617501.
<http://doi.org/10.1007/s11433-015-5760-x>
59. Coey J.M.D. Perspective and prospects for rare earth permanent magnets. *Engineering*. 2020;6:119–131.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.034>
60. Huber C., Mitteramskogler G., Goertler M., Teliban V., Groenefeld M., Suess D. Additive manufactured isotropic NdFeB magnets by stereolithography, fused filament fabrication, and selective laser sintering. *Materials*. 2020;13:1916. <http://doi.org/10.3390/ma13081916>
61. Jacimovic J., Christen T., Dénervaud E. Self-organized giant magnetic structures via additive manufacturing in NdFeB permanent magnets. *Additive Manufacturing*. 2020;34:101288.
<http://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101288>
62. Pigliaru L., Paleari L., Bragaglia M., Nanni F., Ghidini T., Rinaldi M. Poly-ether-ether-ketone – Neodymium-iron-boron bonded permanent magnets via fused filament fabrication. *Synthetic Metals*. 2021;279:116857.
<http://doi.org/10.1016/j.synthmet.2021.116857>
63. Volegov A.S., Andreev S.V., Selezneva N.V., Ryzhikhin I.A., Kudrevatykh N. V., Mädler L., Okulov I.V. Additive manufacturing of heavy rare earth free high-coercivity permanent magnets. *Acta Materialia*. 2020;188:733–739.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.02.058>
64. Pelevin I.A., Ozherelkov D.Y., Chernyshikhin S.V., Nalivaiko A.Y., Gromov A.A., Chzhan V.B., Terekhin E.A., Tereshina I.S. Selective laser melting of Nd–Fe–B: Single track study. *Materials Letters*. 2022;315:131947.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131947>
65. Pelevin I.A., Terekhin E.A., Ozherelkov D.Y., Tereshina I.S., Karpenkov D.Y., Bochkhanov F.Y., Chernyshikhin S.V., Nalivaiko A.Y., Gromov A.A. New scanning strategy approach for laser powder bed fusion of Nd–Fe–B hard magnetic material. *Metals*. 2023;13:1084.
<https://doi.org/10.3390/met13061084>
66. Kume M., Hayashi M., Yamamoto M., Kawamura K., Ihara K. Heat resistant plastic magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2005;41(10):3895–3897.
67. Osawa Z., Kawauchi K. Effect of polymer matrices on magnetic properties of plastic magnets. *Journal of Materials Science*. 1988;23:2637–2644.
<http://doi.org/10.1007/BF01111926>
68. Huber C., Abert C., Bruckner F., Groenefeld M., Schuschnigg S., Teliban I., Vogler C., Wautischer G., Windl R., Suess D. 3D printing of polymer-bonded rare-earth magnets with a variable magnetic compound fraction for a pre-defined stray field. *Scientific Reports*. 2017;7(1):9419.
<http://doi.org/10.1038/s41598-017-09864-0>
69. Rösel U., Drummer D. Possibilities in recycling magnetic materials in applications of polymer-bonded magnets. *Magnetism*. 2022;2(3):251–270.
<http://doi.org/10.3390/magnetism2030019>
70. Shen A., Peng X., Bailey C.P., Dardona S., Ma A.W.K. 3D printing of polymer-bonded magnets from highly concentrated, plate-like particle suspensions. *Materials and Design*. 2019;183:108133.
<http://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108133>
71. Ormerod J., Constantinides S. Bonded permanent magnets: Current status and future opportunities (invited). *Journal of Applied Physics*. 1997;81(8):4818–4820.
<http://doi.org/10.1063/1.365471>
72. Zhai F., Sun A., Yuan D., Wang J., Wu S., Volinsky A., Wang Z. Epoxy resin effect on anisotropic Nd–Fe–B rubber-bonded magnets performance. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011;509(3):687–690.
<http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.210>
73. Kirchmayr H.R. Permanent magnets and hard magnetic materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1996;29(11):2763–2778. <http://doi.org/10.1088/0022-3727/29/11/007>
74. Olano A., Ren J., Zhang G., Tang H., Zhang T., Li J. Improvements in miniaturized Hall Thrusters by use of high-temperature SmCo magnets and additive manufacturing techniques. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;576(1):012002.
<http://doi.org/10.1088/1757-899X/576/1/012002>
75. Amirov A., Omelyanchik A., Murzin D., Kolesnikova V., Vorontsov S., Musov I., Musov Kh., Khashirova S., Rodionova V. 3D printing of PLA/magnetic ferrite composites: Effect of filler particles on magnetic properties of filament. *Processes*. 2022;10(11):2412.
<http://doi.org/10.3390/pr10112412>
76. Hu Y., Zou B., Xing H., Liu J., Chen Q., Wang X., Li L. Preparation of Mn–Zn ferrite ceramic using stereolithog-

- raphy 3D printing technology. *Ceramics International*. 2022;48(5):6923–6932.
<http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.248>
77. Peng E., Wei X., Herng T.S., Garbe U., Yu D., Ding J. Fer-rite-based soft and hard magnetic structures by extrusion free-forming. *RSC Advances*. 2017;7(43):27128–27138.
<http://doi.org/10.1039/c7ra03251j>
 78. Khatri B., Lappe K., Noetzel D., Pursche K., Hanemann T. A 3D-printable polymer-metal soft-magnetic functional composite-development and characterization. *Materials*. 2018;11(2):189. <http://doi.org/10.3390/ma11020189>
 79. Zhang C., Li X., Jiang L., Tang D., Xu H., Zhao P., Fu J., Zhou Q., Chen Y. 3D printing of functional magnetic materials: From design to applications. *Advanced Functional Materials*. 2021;31(34):2102777.
<http://doi.org/10.1002/adfm.202102777>
 80. Lazarus N., Bedair S.S., Smith G.L. Creating 3D printed magnetic devices with ferrofluids and liquid metals. *Additive Manufacturing*. 2019;26:15–21.
<http://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.012>
 81. Sochol R.D., Sweet E., Glick C.C., Wu S.-Y., Yang Ch., Restaino M., Lin L. 3D printed microfluidics and microelectronics. *Microelectronic Engineering*. 2018;189: 52–68. <http://doi.org/10.1016/j.mee.2017.12.010>
 82. Kang Y.G., Lee K.M., Choi G. Rapid prototyping of three-phase AC machine drive system with subtractive and additive manufacturing. *Energies*. 2023;16(5):2266.
<http://doi.org/10.3390/en16052266>
 83. Wang Z., Huber C., Hu J., He J., Suess D., Wang S.X. An electrodynamic energy harvester with a 3D printed magnet and optimized topology. *Applied Physics Letters*. 2019;114:013902. <http://doi.org/10.1063/1.5074123>
 84. Truby R.L., Lewis J.A. Printing soft matter in three dimensions. *Nature*. 2016;540:371–378.
<http://doi.org/10.1038/nature21003>
 85. Ionov L. Biomimetic hydrogel-based actuating systems. *Advanced Functional Materials*. 2013;23(36):4555–4570.
<http://doi.org/10.1002/adfm.201203692>
 86. Tabatabaei S.N., Lapointe J., Martel S. Shrinkable hydrogel-based magnetic microrobots for interventions in the vascular network. *Advanced Robotics*. 2011;25(8): 1049–1067. <https://doi.org/10.1163/016918611X568648>
 87. Suzumori K. Elastic materials producing compliant robots. *Robotics and Autonomous Systems*. 1996;18(1-2):135–140.
[http://doi.org/10.1016/0921-8890\(95\)00078-X](http://doi.org/10.1016/0921-8890(95)00078-X)
 88. Rus D., Tolley M.T. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*. 2015;521(7553):467–475.
<http://doi.org/10.1038/nature14543>
 89. Kim J., Chung S.E., Choi S.E., Lee H., Kim J., Kwon S. Programming magnetic anisotropy in polymeric microactuators. *Nature Materials*. 2011;10(10):747–752.
<http://doi.org/10.1038/nmat3090>
 90. Kim J., Lee H., Kim J., Kim H., Kwon S. Programming structural color and magnetic anisotropy in polymer composite microstructure for novel biosystems. In: *2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International conference on solid-state sensors, actuators microsystems (TRANSDUCERS & EUROSensors XXVII)* (16–20 June 2013). Barcelona: IEEE, 2013. Vol. 1. P. 1543–1548.
<http://doi.org/10.1109/Transducers.2013.6627076>
 91. Jiang D., Liu S., Tang W. Fabrication and manipulation of non-spherical particles in microfluidic channels: A review. *Micromachines*. 2022;13(10):1659.
<http://doi.org/10.3390/mi13101659>
 92. Zhu T., Cheng R., Sheppard G. R., Locklin J., Mao L. Magnetic-field-assisted fabrication and manipulation of nonspherical polymer particles in ferrofluid-based droplet microfluidics. *Langmuir*. 2015;31(31):8531–8534.
<http://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b02097>
 93. Diller E., Sitti M. Three-dimensional programmable assembly by untethered magnetic robotic micro-grippers. *Advanced Functional Materials*. 2014;24(28):4397–4404.
<http://doi.org/10.1002/adfm.201400275>
 94. Hu W., Lum G.Z., Mastrangeli M., Sitti M. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion. *Nature*. 2018;554(7690):81–85.
<http://doi.org/10.1038/nature25443>
 95. Joyee E.B., Pan Y. Multi-material additive manufacturing of functional soft robot. *Procedia Manufacturing*. 2019;34:566–573.
<http://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.221>
 96. Joyee E.B., Pan Y. A fully three-dimensional printed inchworm-inspired soft robot with magnetic actuation. *Soft Robotics*. 2019;6(3):333–345.
<http://doi.org/10.1089/soro.2018.0082>
 97. Hasanov S., Alkunte S., Rajeshirke M., Gupta A., Huseynov O., Fidan I., Alifui-Segbaya F., Rennie A. Review on additive manufacturing of multi-material parts: Progress and challenges. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2022;6(1):4.
<http://doi.org/10.3390/jmmp6010004>

Сведения об авторах



Information about the Authors

Глеб Александрович Конов – лаборант российско-китайской научно-исследовательской лаборатории «Функциональные материалы» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ)

 **ORCID:** 0009-0009-3782-3901

 **E-mail:** 071133gleb@mail.ru

Алина Константиновна Мазеева – к.т.н., доцент научно-образовательного центра «Конструкционные и функциональные материалы» СПбПУ

 **ORCID:** 0000-0002-8980-0869

 **E-mail:** mazeevaalina@gmail.com

Gleb A. Konov – Laboratory Assistant of the Russian-Chinese Research Laboratory for functional materials at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)

 **ORCID:** 0009-0009-3782-3901

 **E-mail:** 071133gleb@mail.ru

Alina K. Mazeeva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at Research and Educational Center “Structural and functional materials”, SPbPU

 **ORCID:** 0000-0002-8980-0869

 **E-mail:** mazeevaalina@gmail.com

Дмитрий Валерьевич Масайло – к.т.н., доцент научно-образовательного центра «Конструкционные и функциональные материалы» СПбПУ

 **ORCID:** 0000-0001-5516-9848

 **E-mail:** dmasaylo@gmail.com

Николай Геннадьевич Разумов – к.т.н., доцент научно-образовательного центра «Конструкционные и функциональные материалы» СПбПУ

 **ORCID:** 0000-0002-7147-6239

 **E-mail:** n.razumov@inbox.ru

Анатолий Анатольевич Попович – д.т.н., проф., директор Института машиностроения, материалов и транспорта СПбПУ

 **ORCID:** 0000-0002-5974-6654

 **E-mail:** popovicha@mail.ru

Dmitry V. Masaylo – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at Research and Educational Center “Structural and functional materials”, SPbPU

 **ORCID:** 0000-0001-5516-9848

 **E-mail:** dmasaylo@gmail.com

Nikolay G. Razumov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at Research and Educational Center “Structural and functional materials”, SPbPU

 **ORCID:** 0000-0002-7147-6239

 **E-mail:** n.razumov@inbox.ru

Anatoly A. Popovich – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Machinery, Materials and Transport, SPbPU

 **ORCID:** 0000-0002-5974-6654

 **E-mail:** popovicha@mail.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

Г. А. Конов – обработка данных, подготовка текста статьи.

А. К. Мазеева – концептуализация идеи, определение цели работы и ее задач, участие в обсуждении результатов.

Д. В. Масайло – поиск опубликованных данных и их обобщение.

Н. Г. Разумов – критический анализ литературы, участие в обсуждении результатов, формулировка выводов исследования.

А. А. Попович – критический анализ текста статьи с внесением технических правок, участие в обсуждении результатов, формулировка выводов исследования.

G. A. Konov – contributed to data processing and manuscript writing.

A. K. Mazeeva – conceptualized the idea, determined the purpose and objectives of the work, and participated in the discussion of the results.

D. V. Masaylo – conducted searches for published data and summarized them.

N. G. Razumov – conducted critical literature analysis, participated in the discussion of the results, and drew conclusions from the study.

A. A. Popovich – conducted critical analysis of the manuscript, added technical corrections, participated in the discussion of the results, and drew conclusions from the study.

Статья поступила 28.06.2023 г.
Доработана 31.10.2023 г.
Принята к публикации 03.11.2023 г.

Received 28.06.2023
Revised 31.10.2023
Accepted 03.11.2023