

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №11 (149). С.17-23.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №11 (149). P. 17-23.

Научная статья  
УДК 620.16  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-17-23

### Аддитивные технологии для создания магнитных материалов

**Дмитрий Сергеевич Яцко**, мл. науч. сотр.  
Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения  
Российской академии наук, Владивосток, Россия  
d.s.yatsko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1761-2540>

**Аннотация.** *Материалы и материалы, обладающие магнитными свойствами, являются одной из фундаментальных основ того мира, что построило человечество. Магниты являются ключевыми элементами большинства устройств, применяемых в промышленности, науке и технике. Развитие технологии изготовления постоянных магнитов с целью достижения максимальной эффективности генерируемого магнитного поля при минимальном размере магнита можно разделить на два ключевых направления: изменение состава магнита и изменение формы магнитного поля. Исследование в данной работе направлено на разработку технологии изготовления магнитов сложной формы для контроля формы магнитного поля. Современные технологии производства активно используют различные программные продукты для моделирования внешнего вида, состава, физических и химических свойств конечного продукта. Для более точного изготовления и минимизации постобработки применяют автоматизированные комплексы, работающие по 3D модели, позволяющие изготавливать готовый продукт производства. Ручной труд постепенно заменяется машинным, а роль человека на производстве постепенно изменяется. Крупное производство начинает использовать роботизированные системы и конвейеры, позволяющие значительно увеличить производительность, снизить затраты и влияние человеческого фактора на качество готового продукта. Рынок аддитивных технологий за последние годы растёт с повышающимися темпами. В работе рассмотрено применение аддитивных технологий с целью получения материалов сложной формы, обладающих магнитными свойствами. Предложены обоснование и варианты решения основных препятствий на пути создания новой технологии изготовления магнитных материалов сложной формы. Предложены технологическое решения, и оборудование позволяющие получить магнитные материалы используя аддитивных технологий.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, сплавы SmCo, SmFe волоконный лазер, магниты, роботизированные комплексы

**Для цитирования:** Яцко Д.С. Аддитивные технологии для создания магнитных материалов // Научноёмкие технологии в машиностроении // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 11 (149). С. 17–23.  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-17-23

### Additive technologies for magnetic materials generation

**Dmitry S. Yatsko**, SRF  
Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Vladivostok, Russia  
d.s.yatsko@mail.ru

**Abstract.** Materials and materials with magnetic properties are one of the mainstays of the world of mankind. Magnets are the key elements of most devices used in industry, science and technology. The development of permanent magnet manufacturing technology taking into account the maximum efficiency of the generated magnetic field with a minimum size of the magnet can be divided into two key directions: changing the composition of the magnet and changing the shape of the magnetic field. The research in this paper is aimed at developing a technology for manufacturing shaped magnets for controlling the shape of the magnetic field. Modern production technologies actively use various software products to simulate the design, composition, physical and chemical properties of the final product. For more precise manufacturing and minimization of post-processing, 3-D automated complexes are used, that make it possible to produce a finished product. Manual labor is gradually being replaced by machine labor, and the role of man at the place of production is gradually changing. Large-scale production begins to use robotic systems and conveyors, which significantly increases productivity, reduces costs and the influence of the human factor on the quality of the finished product. The market of additive technologies has been growing at an increasing pace in recent years. The paper considers the application of additive technologies for obtaining materials of complex shape with magnetic properties. The substantiation and solutions of the main obstacles in the development of a new technology for the manufacture of shaped magnetic materials are proposed. Technological solutions and equipment giving the possibility to obtain magnetic materials through the use of additive technologies make a motion.

**Keywords:** additive technologies, SmCo alloys, SmFe fiber laser, magnets, robotic complexes

**For citation:** Yatsko D.S. Additive technologies for magnetic materials generation / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 11 (149). P. 17–23. doi: 10.30987/2223-4608-2023-17-23

## Введение

Одним из перспективных направлений развития технологий являются лазерные аддитивные технологии (ЛАТ)[1]. В отличие от традиционных методов производства ЛАТ в большей степени ориентированы на универсальность и снижение затрат материала и времени при производстве. У аддитивного принципа изготовления деталей есть свои ограничения из-за малой исследованности, но, учитывая относительно небольшую историю развития [2] и постоянное увеличение скорости развития производственных технологий в целом, можно предположить, что за 10 лет аддитивные технологии «созреют», а ещё через 5,0...10 лет постепенно войдут в существующее производство или станут его аналогом.

В настоящее время сложно представить современное производство без предварительного компьютерного моделирования готовых изделий. Компьютерная моделирование позволяет оценить вид будущего изделия и устранить недочёты на этапе проектирования. В случае успешного моделирования, по электронной геометрической модели может быть изготовлен образец или макет для проверки его работоспособности и пригодности. То, что казалось фантастикой 30 лет назад, стало реальностью.

Значительное развитие получили технологии, использующие металлические порошки и энергию лазерного излучения для изготовления конечного продукта. На рис. 1 показано,

что основное развитие получили технологии 3D печати металлическими порошками в закрытой ёмкости [3].

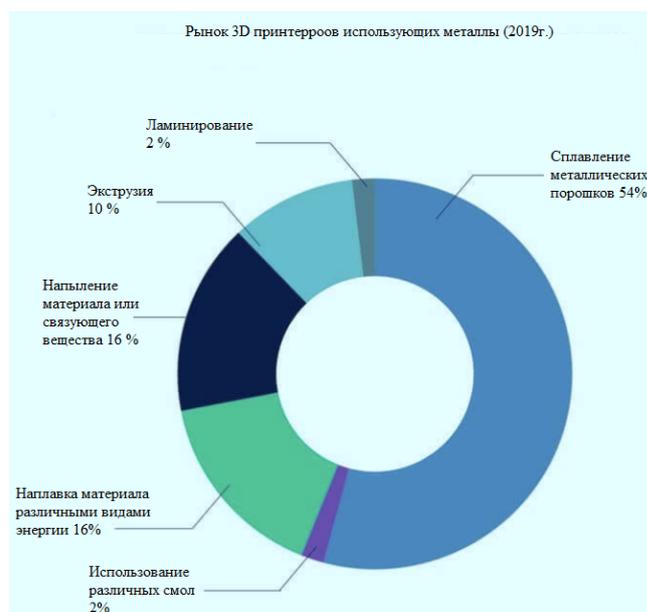


Рис. 1. Соотношение используемых технологий 3D печати [3]

Fig. 1. The ratio of 3D printing technologies [3]

По данным таких аналитических и консалтинговых компаний, как GlobalData [4], утверждается, что в 2020 г. объём рынка 3D печати достиг показателя в 13,9 млрд долл. Также прогнозируется постепенный рост рынка аддитивных технологий до 33 млрд долл. к 2025 г. и 60 млрд долл. к 2030 г. (рис.2).

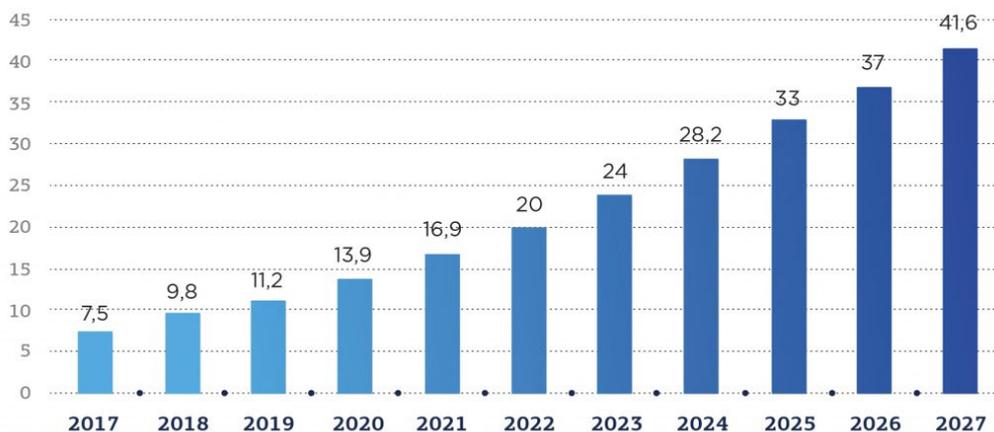


Рис. 2. Состояние и прогноз объема мирового рынка аддитивных технологий, млрд долл. [4]

Fig. 2. The state and forecast of the volume of additive technologies world market, billion dollars [4]

Таким образом можно сказать, что проведение исследований в области аддитивных технологий является перспективным направлением развития науки на протяжении ближайших десяти лет.

Учитывая основные преимущества применения аддитивных технологий (экономия ресурсов) следует выбирать те направления исследований, в которых применяются дорогостоящие и дефицитные материалы. Наиболее подходящими под определение «дефицитные» подходят материалы из группы редкоземельных. При исследовании области применения редкоземельных металлов можно выделить производство магнитов и магнитных материалов.

### Материалы и методики

Исследование в области применения аддитивного производства с целью изготовления постоянных магнитов и магнитных материалов позволит повысить автоматизацию производства и расширить область применения аддитивных технологий (АТ). Применения магнитного поля для задания ориентации магнитных доменов в изготавливаемом магните накладывает ограничение на список технологи, пригодных к использованию. Если рассматривать аддитивные процессы, получившие широкое распространение [5, 6] и учитывать влияние магнитного поля, то количество пригодных к использованию АТ сокращается. По мнению автора работы, наиболее перспективной к применению является адаптированная технология

селективного сплавления порошка. Вопрос исследования магнитных свойств материалов [7, 8], полученных по технологии аддитивного производства в настоящий момент исследуется в различных коллективах [9, 10]. Однако исследование способов и свойств магнитов, созданных по аддитивной технологии, не является широко изученным.

Из-за влияния магнитного поля применение процесса аддитивного производства, при котором энергия от внешнего источника используется для соединения материалов путем их сплавления в процессе нанесения значительно усложняется, особенно при использовании смеси металлических порошков с разными магнитными свойствами.

Таким образом, для получения материала заданной формы, обладающего магнитными свойствами, необходимо решить две задачи:

- нанесение на поверхность равномерного слоя порошкового материала, способного удержаться на поверхности под воздействием магнитного поля;
- сплавление порошка в магнитном поле по заданной траектории.

Вопрос движения инструмента по сложной траектории давно представлял интерес для промышленности. На данный момент есть различные решения, представленные роботизированными системами и станками с ЧПУ, работающими с соответствующим программным обеспечением. Разработанная электронная геометрическая модель физического объекта должна иметь высокую точность (порядка

единиц микрометров), что сокращает дальнейшую механическую обработку.

В рамках проведённой работы использован роботизированный комплекс на базе робота KUKA KR-30HA и волоконного лазера производства компании IPG LC-1-K (рис. 3).



Рис. 3. Лазерный технологический комплекс

Fig. 3. Laser technology complex

Для создания постоянного магнитного поля использованы неодимовые магниты, в количестве шести штук, размером  $100 \times 100 \times 10$  мм. Постоянные магниты собраны в два «блока» по три штуки, разделённые параллелепипедом из немагнитного материала толщиной 80 мм. Данная конструкция позволяет поддерживать магнитное поле между магнитами напряжённостью  $520 \pm 20$  мТл. Сплавление металлических порошков выполнено между магнитами в магнитном поле на немагнитной подложке, как показано на рис. 4.

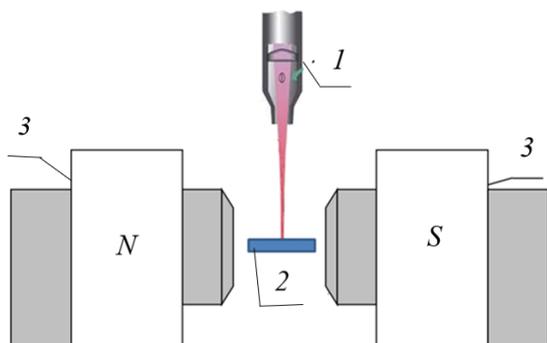


Рис. 4. Расположение сплавляемого металла между магнитами

Fig. 4. Location of the fused metal between magnets

Для фокусировки лазерного излучения на поверхности 2, находящейся в магнитном поле между магнитами 3 использована оптическая лазерная головка 1 с фокусирующей линзой.

Учитывая техническое разнообразие доступных методов, выбор производился из следующего списка:

- использование лент или пластин из материала, который будет наплавляться на поверхность в магнитном поле;
- осаждение материала на поверхность с последующим сплавлением в магнитном поле;
- напыление разогретого порошка на сверхзвуковой скорости (аналог системы «ООО Димет») с последующим сплавлением в магнитном поле;
- нанесение порошков со связующим, которое будет удерживать порошок на поверхности с последующим сплавлением в магнитном поле.

У вышеописанных способов есть свои преимущества и недостатки. При использовании лент или пластин сильно ограничивается применимость на поверхностях сложной формы. Данный вариант можно использовать для относительно плоских, крупногабаритных деталей.

Осаждение магнитного материала на поверхности позволит получить равномерный слой, однако получаемые слои будут тонкими. Данный вариант хорошо подойдёт для получения тонких магнитных плёнок или чувствительных слоёв.

Применение системы холодного газодинамического напыления позволит получать равномерные слои материала, однако необходимо использовать большой объём защитного газа, что значительно увеличит стоимость процесса.

Применение порошкового материала и фиксирующего состава сопряжено со сложностью получения равномерных слоёв, но требует минимального количества дополнительного оборудования. Применение порошков и фиксирующего состава позволяет использовать различные комбинации на основе используемых металлов, что значительно ускорит определение свойств новых наиболее эффективных сплавов.

Исследование проведено на примере порошков Sm, Co, Fe и их смесей, наносимых на немагнитную подложку из стали нержавеющей аустенитного класса 12X18H10T.

Для фиксации порошков в магнитном поле использован раствор канифоли в растворителе, который, при высыхании, фиксировал порошки на поверхности пластины. Сплавление порошков лазерным излучением производилось в двух направлениях, вдоль и поперёк линий магнитной индукции, как показано на рис. 5, остатки порошка счищались металлической щёткой.

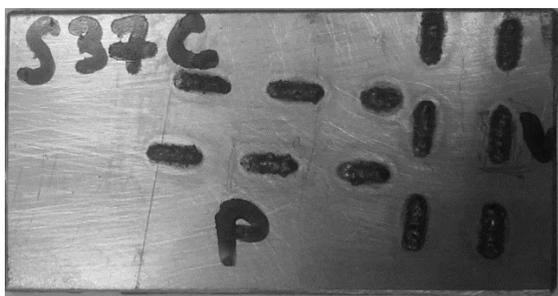


Рис. 5. Образец сплавления порошков в магнитном поле

Fig. 5. Sample of powder fusion in a magnetic field

### Результаты исследований

В результате проведённой работы были получены образцы наплавки порошков Sm, Co, Fe в магнитном поле в различных комбинациях. Для исследования свойств магнитных структур, получаемых при сплавлении порошков в магнитном поле, было подготовлено три образца из порошков SmCo (в соотношении: 37 Sm, 63 Co). Спрессованный порошок в форме цилиндра диаметром 8,0 мм и толщиной 2,0 мм сплавлялся лазерным излучением с плотностью мощности  $393 \text{ Вт/мм}^2$  на немагнитной подложке в магнитном поле.

Первый образец получен из порошка SmCo в соотношении 37 % масс. Sm к 63 % масс. Co сплавленного в магнитном поле лазерным излучением мощностью  $393 \text{ Вт/мм}^2$ . Второй образец получен посредством сплавления двух слоёв при мощности  $393 \text{ Вт/мм}^2$ , для получения образца большей толщины. Третий образец получен посредством сплавления двух слоёв на мощность  $393 \text{ Вт/мм}^2$  на первом цилиндре и  $314 \text{ Вт/мм}^2$  на втором (рис. 6).

Магнитные свойства полученного материала (отдельно от подложки) исследованы на СКВИД магнитометре MPMSXL (Quantum Design) путём измерения петель магнитного гистерезиса при температуре 300 К в магнитном поле от  $-20000 \text{ Э}$  до  $+20000 \text{ Э}$ . Исследуемые образцы получены сплавлением порошков SmCo в соотношении 37 Sm к 63 Co (по массе).

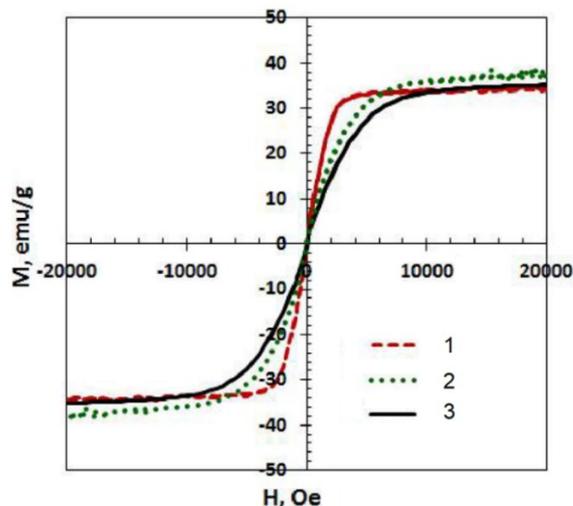


Рис. 6. Кривые намагничивания образцов при комнатной температуре в магнитных полях от  $-20000 \text{ Э}$  до  $+20000 \text{ Э}$

Fig. 6. Magnetization curves of samples at room temperature in magnetic fields from  $-20000 \text{ E}$  to  $+20000 \text{ E}$

Видно, что все три кривые имеют близкий характер намагничивания с близкими значениями намагниченности насыщения ( $32 \dots 34 \text{ emu/g}$ ), малой остаточной намагниченностью и малой коэрцитивной силой. Образцы различаются значениями напряжённости магнитного поля, при котором наступает насыщение намагниченности. Насыщение намагниченности наблюдается при следующих напряжённости магнитных полей:  $\pm 4000 \text{ Э}$  для первого образца, при  $\pm 8000 \text{ Э}$  для второго образца и при  $\pm 12000 \text{ Э}$  для третьего образца. В состав всех образцов входят два оксида  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\text{FeSmO}_3$ , которые обладают ферромагнитными свойствами. Увеличение насыщения намагниченности образцов также совпадает с увеличением концентрации  $\text{SmCo}_{0.5}$  ( $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ) в наплавленном материале, что подтверждается исследованиями спектров дифракции образцов (рис. 7) на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE ( $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ).

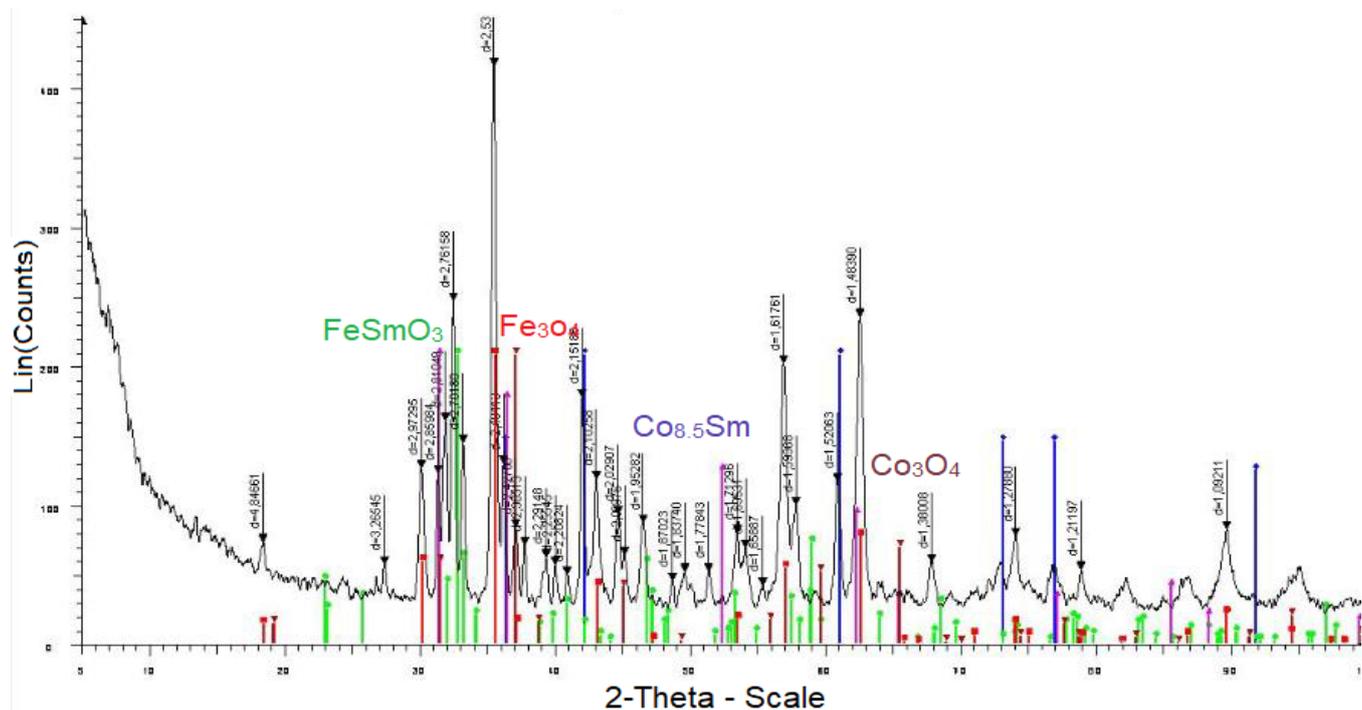


Рис. 7. Спектр дифракции третьего образца

Fig. 7. Diffraction spectrum of the third sample

### Обсуждение результатов

В результате проведённых исследований были получены образцы, подтверждающие возможность применения аддитивных технологий для получения магнитных материалов. Экспериментально доказано, что при сплавлении порошков и их смеси в магнитном поле образуются ферромагнитные соединения ( $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ).  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  – высококоэрцитивный материал с высокой намагниченностью насыщения, высокой точкой Кюри и коэрцитивной силой. Это один из наиболее перспективных магнитных материалов, используемых на данный момент. Возможность получения данного соединения методами аддитивных технологий однозначно указывает на перспективность дальнейших исследований.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Армашова-Тельник Г.С., Соколова П.Н., Дегтерев Д.В. Аддитивные технологии: новационный эффект в промышленности // Вестник ВГУИТ. 2020. №4 (86). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnyye-tehnologii-novatsionnyy-effekt-v-promyshlennosti> (Дата последнего обращения: 11.05.2023).

2. Смуров И.Ю., Конов С.Г., Котобан Д.В. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 2 (14). С. 11–22. EDN TONSTV .

3. **Metal 3D printers in 2022: a comprehensive guide** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ani-waa.com/buyers-guide/3d-printers/best-metal-3d-printer/> (Дата последнего обращения 11.05.2023)

4. **Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство** [Электронный ресурс] URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tehnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tehnologiy-v-proizv/> (дата обращения 11.05.2023 г.).

5. Колесников Л.А., Манжула Г.П., Шелег В.К., Якимович А.М. Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности (часть первая) // Наука и техника. 2013. № 5. С. 3–9. EDN TGGWON.

6. Журнал «Аддитивные технологии». № 2. 2021 г. // ООО «ПРОМЕДИА» URL: <https://additiv-tech.ru/archive/2021> (дата обращения 11.05.2023 г.)

7. J. Coey. Permanent magnets: Plugging the gap // Scripta Materialia, vol. 67, pp. 524–529, 2012.

8. **Magnetic properties of  $\text{Sm}_2(\text{Fe}, \text{Ti})_{17}$  compounds and their nitrides with  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  and  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$  structures** / Ye. V. Shcherbakova<sup>1</sup>, G. V. Ivanova<sup>1</sup>, N. V. Mushnikov<sup>1</sup>, I. V. Gerasieva<sup>1</sup> // Journal of Alloys and Compounds. 2000. V. 308. P. 15–20.

9. Kazantseva I.N.V., Koemets Yu.N, Shishkin D.A., Ezhov I.V., Davydov D.I., Rigmant M.B., Kochnev A.V. A magnetic study of deformed medical austenitic steel manufactured by 3d laser printing // Physics of Metals and Metallography. 2022. V. 123. P. 1139–1146.

10. Сафин А.Р., Behera Ranjan Kumar. Аддитивное производство и оптимизация топологии магнитных материалов для электрических машин // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2021. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnoe-proizvodstvo-i-optimizatsiya-topologii-magnitnyh-materialov-dlya-elektricheskikh-mashin> (дата обращения: 02.06.2023).

## REFERENCES

1. Armashova-Telnik G.S., Sokolova P.N., Degtyarev D.V. Additive technologies: an innovative effect digitalization in industry. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020, No. 4 (86). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnye-tehnologii-no-vatsionny-effekt-v-promyshlennosti> (the date of access 11.05.2023)

2. Smurov I.Yu., Konov S.G., Korban D.V. On the introduction of additive technologies and production in the domestic industry // News of material Science. Science and technology, 2015, No. 2, pp. 11–22. EDN TONSTV .

3. Metal 3D printers in 2022: a comprehensive guide // [Electronic resource]. URL: <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/best-metal-3d-printer/> (date of access 11.05.2023)

4. 3D printing technology market in Russia and the world: prospects for the introduction of additive technologies

in production // [Electronic resource] URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tehnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tehnologiy-v-proizv/> (date of access 11.05.2023).

5. Kolesnikov L.A., Manzhuha G.P., Sheleg V.K., Yakimovich A.M. The state and prospects of development of rapid prototyping technologies in industry (part one) // Science and Technology, 2013, No. 5, pp. 3–9. EDN TGGWOH.

6. Additive Technologies (journal) No. 2. 2021 // PRO-MEDIA LLC URL: <https://additiv-tech.ru/archive/2021> (date of access 11.05.2023).

7. J. Coey. Permanent magnets: Plugging the gap // Scripta Materialia, vol. 67, pp. 524–529, 2012.

8. Magnetic properties of Sm<sub>2</sub>(Fe, Ti)<sub>17</sub> compounds and their nitrides with Th<sub>2</sub>Zn<sub>17</sub> and Th<sub>2</sub>Ni<sub>17</sub> structures / Ye. V. Shcherbakova I., G. V. Ivanova I., N. V. Mushnikov I., I. V. Gervasiaeva I. // Journal of Alloys and Compounds. 2000. V. 308. P. 15–20.

9. Kazantseva I.N.V., Koemets Yu.N, Shishkin D.A., Ezhov I.V., Davydov D.I., Rigmant M.B., Kochnev A.V. A magnetic study of deformed medical austenitic steel manufactured by 3d laser printing // Physics of Metals and Metallography. 2022. V. 123. P. 1139–1146.

10. Safin A.R., Behera Ranjan Kumar. Additive manufacturing and optimization of the topology of magnetic materials for electric machines // Izvestiya vuzov. Energy problems. 2021, No. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnoe-proizvodstvo-i-optimizatsiya-topologii-magnitnyh-materialov-dlya-elektricheskikh-mashin/> (date of access: 02.06.2023).

Статья поступила в редакцию 03.06.2023; одобрена после рецензирования 09.06.2023; принята к публикации 26.09.2023.

The article was submitted 03.06.2023; approved after reviewing 09.06.2023; assepted for publication 26.09.2023.