

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №2 (152). С.3-11.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №2 (152). P.3-11.

Научная статья
УДК 620.186
doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

Исследование влияния органических связующих на микроструктуру образцов лазерной порошковой наплавки порошков SmFe в магнитном поле

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. В работе представлено два основных направления повышения эффективности постоянных магнитов (ПМ), за счёт изменения химического состава будущего магнита и за счёт изменения формы магнитного поля. Повышение эффективности ПМ за счёт изменения химического состава на протяжении десятилетий позволяло многократно уменьшить размер конечного изделия. В свою очередь, повышение эффективности ПМ за счёт изменения формы магнитного поля является сравнительно новым направлением. На основании анализа представленных способов повышения эффективности ПМ предлагается использовать аддитивные технологии, а именно лазерную порошковую наплавку, для изготовления постоянных магнитов. Для проведения экспериментальных исследований использован роботизированный комплекс KUKA и постоянные магниты в качестве источника постоянного магнитного поля. В работе представлены режимы лазерной порошковой наплавки порошков Sm и Fe. Для поддержания постоянного магнитного поля использован комплекс из шести неодимовых магнитов. Описано распределение напряжённости магнитного поля между магнитами и в основной рабочей области. Представлен внешний вид и состояние порошков, используемых для изготовления экспериментальных образцов. Описаны экспериментальные образцы и принцип отбора проб для проведения анализа микроструктуры и спектров концентрации элементов. У полученных образцов исследована микроструктура и распределение элементов в зависимости от ориентации образцов относительно магнитного поля и направления лазерной наплавки. Установлено влияние применяемых органических связующих на микроструктуру и химический состав. Исследовано распределение элементов в образцах и переходном слое между подложкой и наплавленным металлом.

Ключевые слова: лазерная порошковая наплавка, сплав SmFe, волоконный лазер

Благодарности: автор работы выражает благодарность коллективу ЦЛТ ИАПУ ДВО РАН за помощь в редактировании материалов публикации.

Для цитирования: Яцко Д.С. Исследование влияния различных связующих на микроструктуру образцов лазерной порошковой наплавки порошков SmFe в магнитном поле // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 2 (152). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

Study of organic compounds effect on samples microstructure of laser powder surfacing for SmFe powders in a magnetic field

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. The paper presents two main directions for improving the efficiency of permanent magnets (PM), by changing chemical composition of the future magnet and through variations of magnetic field shape. Increasing the efficiency of PM by changing chemical composition over the decades has made it possible to reduce multiply the size of the final product. In turn, increasing the efficiency of PM by alternating the magnetic field shape is a relatively new direction. Based on the analysis of the presented methods for increasing the efficiency of PM, it is proposed to use additive technologies, namely laser powder surfacing for the manufacture of permanent magnets. To conduct experimental studies, the KUKA robotic complex and permanent magnets are used as a source of a permanent magnetic field. The paper presents some modes of laser powder surfacing of Sm and Fe powders. A complex of six neodymium magnets is used to maintain a magnetostatic field. Strength distribution of the magnetizing field between the magnets and in the main working area is described. The external view and condition of the powders used for the manufacture of experimental samples are presented. Experimental samples and selective approach for analyzing the microstructure and concentration spectra of elements are described. The microstructure and distribution of elements in the obtained samples were studied depending on the texture of the sample relative to the magnetic field and laser surfacing mode. The effect of the applied organic binders on the microstructure and chemical composition has been determined. The distribution of elements in the samples and the transition layer between the support plate and the deposited metal is studied.

Keywords: laser powder surfacing, SmFe alloy, fiber laser

Acknowledgements: the author of the work expresses gratitude to the staff of the CDT IAPA FEB RAS for their help in editing the materials of the publication

For citation: Yatsko D.S. Study of organic compounds effect on samples microstructure of laser powder surfacing for SmFe powders in a magnetic field / Science intensive technology in mechanical engineering. 2024. № 2 (152). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

Введение

Материалы, обладающие магнитными свойствами, являются одной из важнейших частей того мира, что построило человечество. Постоянные магниты (ПМ) используются в технике, электронике, промышленности и науке. Одними из важнейших способов применения постоянных магнитов стали электрогенераторы, благодаря которым происходит выработка электроэнергии.

На данный момент можно выделить два основных направления развития постоянных магнитов, а именно: изменение химического

состава магнита и изменение формы магнитного поля. Процесс развития состава постоянных магнитов и их «эффективность» относительно своей массы представлен на рис. 1, а, где W_{\max} – максимальное энергетическое произведение, определяющее, насколько сильным является магнит.

Размер магнита на основе редкоземельных металлов более чем в 60 раз меньше, чем магнит на основе алюминия, что видно из рис. 1, б. Несмотря на значительную разницу в размере магнитов напряжённость магнитного поля на расстоянии 5,0 мм от кромки у магнитов идентична.

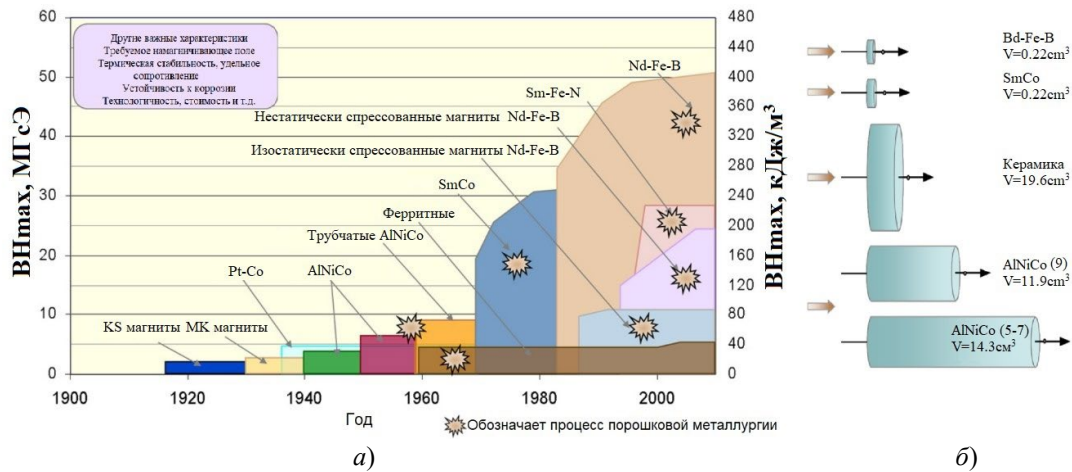


Рис. 1. Развитие постоянных магнитов [1]:
a – сравнение мощности; *б* – сравнение размеров магнитов

Fig. 1. Development of permanent magnets [1]:
a – contrast of power; *b* – comparison of magnet sizes

Однако помимо состава и характеристик постоянных магнитов значительный вклад в эффективность работы техники вносит форма магнитного поля. В работе [2] утверждается, что изменение формы магнитного поля за счёт изменения расположения магнитов (рис. 2, *a*) приводит к значительному приросту производительности и крутящего момента в двигателе (рис. 2, *б*). Также интерес

представляют и другие работы [3 – 6], направленные на изучение и разработку технологий увеличения эффективности оборудования, использующего постоянные магниты. Аналогичные исследования ведутся в области разработки новых способов применения постоянных магнитов [7], исследуются принципы формирования магнитных свойств [8], их структура [9] и свойства [10].

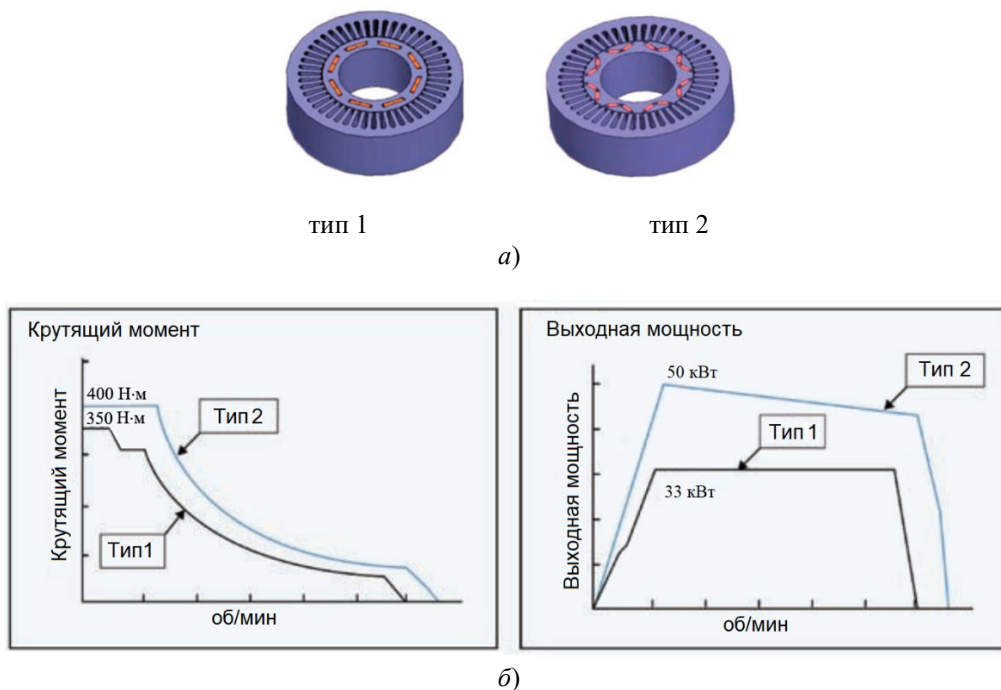


Рис. 2. Зависимость производительности двигателя от формы магнитного поля:
a – варианты расположения магнитов в устройстве; *б* – изменение производительности

Fig. 2. Dependence of motor performance on magnetic field shape:
a – options for the arrangement of magnets in the device; *b* – change in performance

Цель и задачи

Целью данной работы является изучение влияния органических связующих, применяемых для фиксации порошков в магнитном поле при лазерной порошковой наплавке.

Для получения более углублённого понимания происходящих процессов были поставлены следующие задачи:

- изучить влияние связующего на микроструктуру и состав получаемых образцов;
- определить влияние направления линий магнитной индукции на структуру получаемых образцов.

Материалы и методики

Для углублённого изучения процессов, происходящих при изготовлении ферромагнитных материалов, методом лазерной аддитивной технологии, были проведены исследование

структуры, состава и магнитных свойств получаемых образцов.

Для изготовления образцов использован технологический комплекс, ключевыми элементами которого являются волоконный лазер производства IPG марки ЛС-1-К и робот KUKA KR 30 HA. Волоконный лазер является источником лазерного излучения, которое используется для плавления порошков, находящихся в магнитном поле. Робот KUKA передвигает лазерное излучение по поверхности порошка, что позволяет получать магнитный материал в соответствии с 3D моделью.

Используемый лазер позволяет контролировать такие параметры лазерного излучения как:

- мощность лазерного излучения;
- диаметр пятна лазерного излучения;
- длительность импульса (при импульсной обработке).

Основные параметры лазера приведены в табл. 1.

1. Основные характеристики волоконного лазера

1. Main characteristics of fiber laser

Характеристика	Значение
Мощность лазерного излучения	100...1000 Вт
Длина волны	1070,07 нм
Расходимость	31,377 мрад
Диаметр пятна в фокусе	0,75 мм

Промышленный робот KUKA KR 30 в совокупности с позиционером ДКР-400 являются базой используемой установки. На последнем (шестом) фланце робота крепится оптическая головка, которая перемещается в пространстве, согласно заданным координатам.

В оптимальных рабочих условиях повторяемость робота составляет порядка 50 нм, а позиционера $0,009^\circ$ что позволяет выполнять запрограммированные операции с высокой точностью.

При работе со сложными геометрическими поверхностями образец крепится в позиционер, что позволяет поворачивать обрабатываемую деталь в процессе работы. А при работе с простыми поверхностями образец располагается на столе возле робота.

Для поддержания постоянного магнитного поля использован комплекс из шести ниодимовых магнитов размером $100 \times 100 \times 10$ мм³, собранных в два пакета по три штуки (рис. 3, а). Магнитная индукция между магнитами изменяется от 450 до 580 мТл в зависимости от места измерения (рис. 3, б). Пакеты разделены немагнитным материалом, на поверхности которого закреплена немагнитная подложка. Сплавление порошкового материала проводится лазерным излучением в присутствии магнитного поля на поверхности немагнитной подложки. Квадратом (см. рис. 3, б) выделена область наиболее стабильного магнитного поля (500...540 мТл).

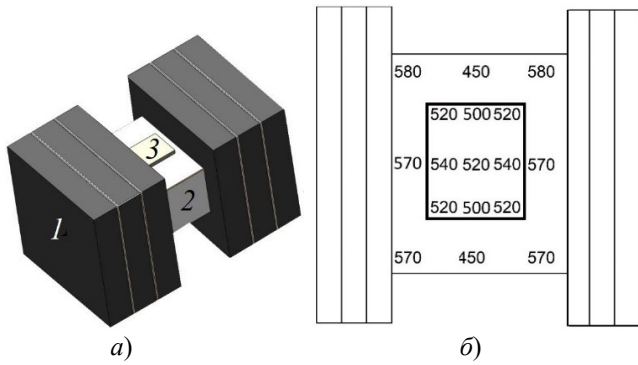


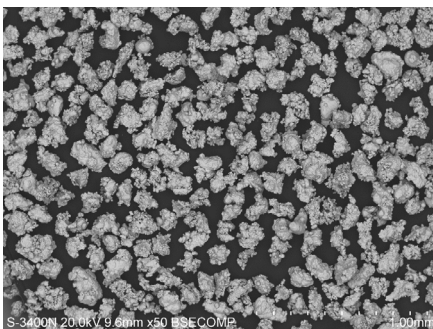
Рис. 3. Комплект магнитов, создающих магнитное поле:
а – общий вид: 1 – пакет магнитов; 2 – немагнитный блок, разделяющий пакеты магнитов; 3 – немагнитная подложка, на которой производится наплавка;
б – распределение напряжённости магнитного поля (мТл)

Fig. 3. A set of magnets creating a magnetic field:
а – general view: 1 – a package of magnets; 2 – a non-magnetic block separating packages of magnets; 3 – a non-magnetic support plate for making the surfacing;
б – strength distribution of the magnetic field (mTl)

Для получения образцов использованы порошки частых металлов, а именно самарий (рис. 4, а), кобальт, железо (рис. 4, б).



а)



б)

Рис. 4. Пример общего вида порошков, использованных в работе:
а – самарий $\times 50$; б – железо $\times 50$

Fig. 4. An example of powder general type used in the work:
а – samarium $\times 50$; б – iron $\times 50$

Так как порошки взаимодействуют с магнитным полем использовать стандартную технологию лазерной порошковой наплавки невозможно. Для фиксации порошка на поверхности образца использовалось два метода.

Первый метод заключался в фиксации порошка на поверхности спиртовым раствором канифоли (индекс «К»), состоящем из 10 г канифоли и 50 мл изопропилового спирта. Раствор канифоли смешивался со смесью порошков Sm-Fe (20/80) в соотношении 50 мл раствора на 50 г смеси порошков. Полученная масса наносилась на обезжиренную пластину из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т и высушивалась в сушильном шкафу в среде аргона при температуре 100 °С на протяжении 60 мин до полного высыхания. Полученную смесь сплавляли лазерным излучением в магнитном поле.

Второй способ фиксации порошка на поверхности образца заключался в нанесении на обезжиренную подложку полистирола (индекс «П»). На поверхность с полистиролом с помощью пневматического компрессора наносилась смесь порошков Sm-Fe.

Изготовление образцов проводилось в двух направлениях. Вдоль (от магнита к магниту) и поперёк направления линий магнитного поля (между магнитами), как показано на рис. 5.

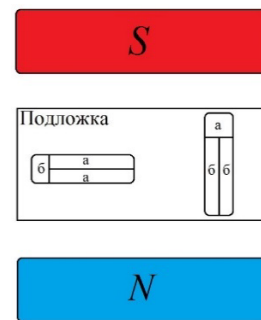


Рис. 5. Схематичное обозначение ориентации образцов

Fig. 5. Schematic design of samples texture

Режим лазерной порошковой наплавки были следующими: мощность лазерного излучения 600 Вт; диаметр пятна лазера на поверхности 1,0 мм; скорость движения луча по поверхности 0,02 м/с; толщина слоя порошка перед наплавкой 1,0 мм; защитная газовая среда – аргон.

Структура полученных образцов исследована на сканирующем электронном

микроскопе Hitachi S3400 type II после предварительного травления ионным лучом для выявления границ зерна и определения их элементного состава методом рентгеновской спектроскопии с энергетической дисперсией (РСЭД). Образцам, наплавленным вдоль магнитного поля, были присвоены номера 1а и 1б. Образцам, наплавленным поперёк магнитного поля, были присвоены номера 2а и 2б. Буквы «а» и «б» присваивались в соответствии с направлением линий магнитных индукции при наплавке образцов. У образцов с буквой «а» магнитное поле расположено перпендикулярно плоскости шлифа, у образцов с буквой «б» параллельно. Перед номером образца добавлялось буквенное обозначение фиксирующего состава, например, образец К1а – наплавлен вдоль магнитного поля с использованием раствора канифоли.

Результаты и обсуждение

Для определения влияния используемых фиксирующих составов на структуру и состав проведены исследования на электронном

микроскопе. На рис. 6 представлена микроструктура образцов наплавки порошков SmFe на подложке из нержавеющей стали.

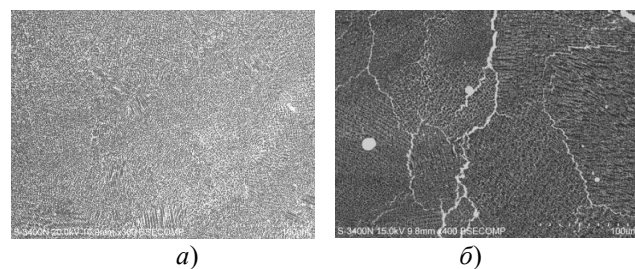


Рис. 6. Микроструктура образцов П1а (а) и К1а (б)

Fig. 6. Microstructure of samples P1a (a) and K1a (b)

Известно, что работа выхода электронов из редкоземельных металлов (Sm, например) значительно меньше, чем переходных металлов. Регистрация спектра РСЭД в точке 1 (рис. 7, а) показала, что основной вклад дает Fe – 71 % весовой и 70,1 % атомный, а вклад Sm – 6,4 % весовой и 2,3 % атомный меньше, чем вклад атомов Cr – 19,1 % весовой и 20,3 % атомный.

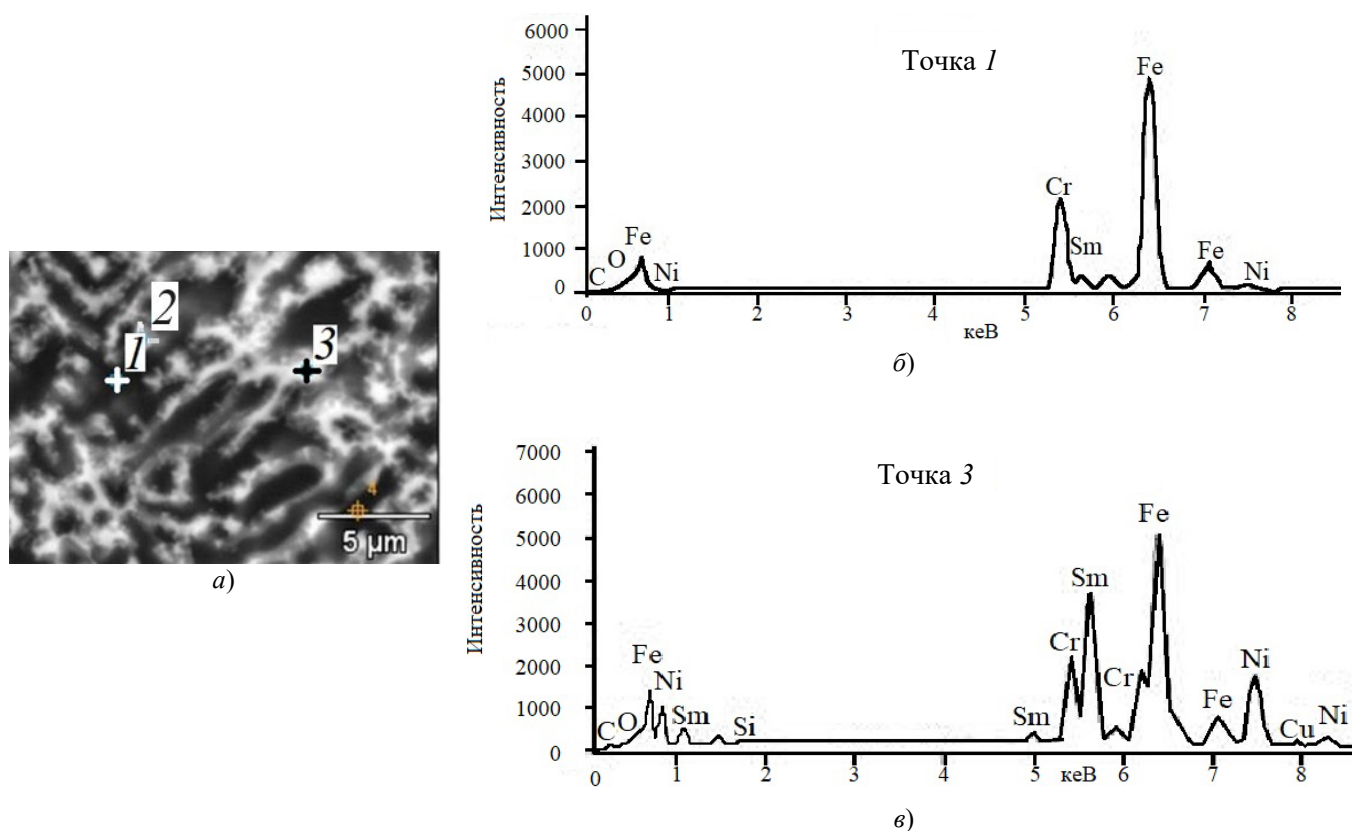


Рис. 7. Спектры концентрации элементов (а) в точках 1 (б) и 3 (в) образца К1а

Fig. 7. Spectra of the concentration of elements (a) at points 1 (b) and 3 (c) of the sample K1a

Исследования состава в точке 3 (рис. 7, а) показали, что области с белым цветом содержат 43,6 % весовых и 20 % атомных Sm, а также 29,4 % весовых и 36,3 % атомных Fe. В состав участка также входят небольшие количества атомов Ni – 15,1 %, Cr – 8,3 % и до 1,5 % атомов C, Si и Cu.

Можно сказать, что при кристаллизации в магнитном поле большая часть атомов самария располагаются в областях белого цвета, а в серые области Sm входит в незначительном количестве (единицы атомных процентов) самария. В образцах П1а и К1а также были обнаружены микротрещины, однако количество микротрещин в образце П1а ниже. Анализ микроstructures образцов П1а, П1б (рис. 8), К1а и К1б не выявил кардинальных отличий, указывающих на влияние направления линий магнитной индукции на микроstructure.

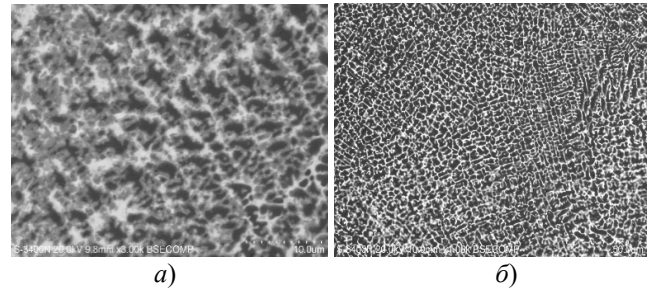


Рис. 8. Микроstructure образцов П1а (а) и П1б (б)

Fig. 8. Microstructure of samples P1a (a) and P1b (b)

При анализе переходной области между подложкой и наплавленным металлом была обнаружена взаимная диффузия элементов подложки и наплавленного металла (рис. 9).

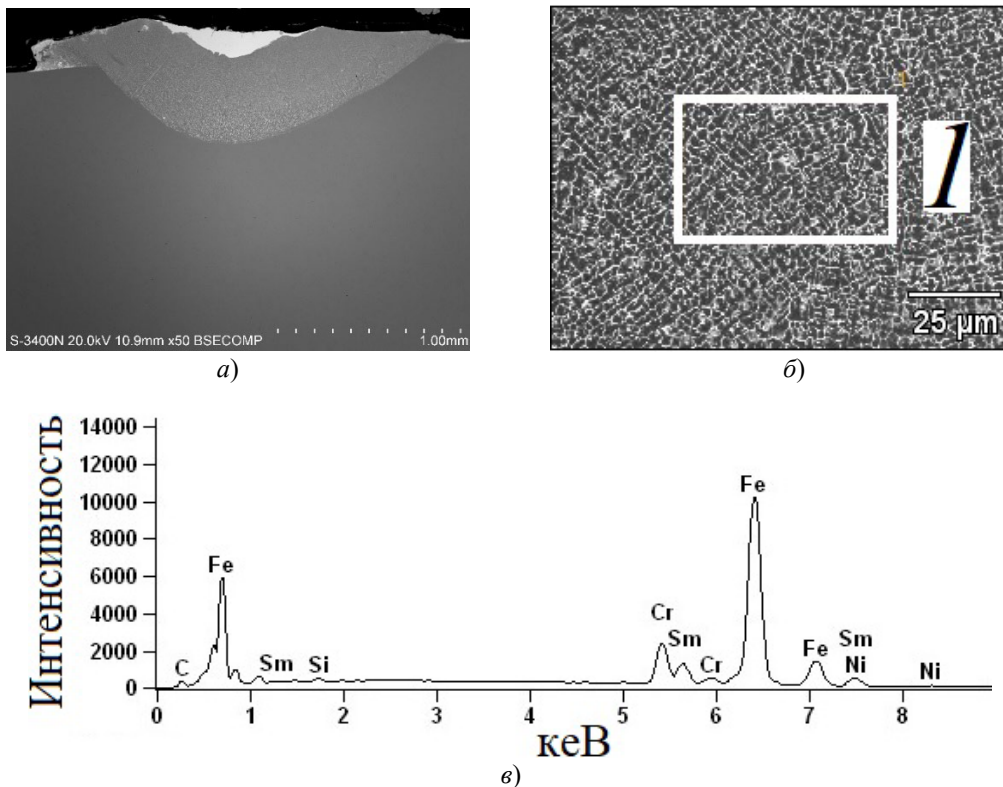


Рис. 9. Распределение элементов в поверхностном слое наплавленного металла образца П2а: а – поперечный срез образца; б – участок анализа РСЭД спектров; в – соотношение элементов на участке 1

Fig. 9. Distribution of elements in the surface layer of the deposited metal of the sample P 2a: а – cross section of the sample; б – section of the analysis of the EDRS spectra; в – the ratio of elements in section 1

В поверхностной области наплавленного металла (см. рис. 9, а) были обнаружены элементы подложки и скопление Sm, который

всплыл на поверхность. Регистрация РСЭД спектров выделенной области (см. рис. 9, б) показала (см. рис. 9, в) содержание 1,47 % весовых

и 6,96 % атомных атомов С, 0,34 % весовых и 0,68 % атомных атомов Si, 9,33 % весовых и 10,23 % атомных атомов Cr, 71,93 % весовых и 73,38 % атомных атомов Fe, 3,94 % весовых и 3,82 % атомных атомов Ni и 13,00 % весовых и 4,93 % атомных атомов Sm.

Выводы

1. Для получения магнитных материалов методом лазерной порошковой наплавки в магнитном поле можно использовать оба изучаемых состава.

2. При использовании полистирола в качестве фиксирующего материала в исследуемой микроструктуре наблюдается меньшее количество трещин, чем при применении раствора каустика.

3. Направление линий магнитной индукции не оказывает видимого эффекта на изменение микроструктуры полученных образцов.

4. Из-за сильного смешивания наплавляемого металла и подложки происходит взаимная диффузия металлов. Для уменьшения данного эффекта необходимо пересмотреть режим лазерной обработки в сторону уменьшения количества используемой энергии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Laura H. Lewis and Fe'Lix Jime'Nez-Villacorta.** Perspectives on Permanent Magnetic Materials for Energy Conversion and Power Generation // Metallurgical and Materials Transactions A 44-Suppl, January 2013. DOI: 10.1007/s11661-012-1278-2

2. **Oliver Gutfleisch, Matthew A. Willard, Ekkes Brück, Christina H. Chen, S. G. Sankar, and J. Ping Liu.** Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient // Advanced Materials 20:1-22 August 2011

3. **Практ В.А., Дмитриевский В.А., Казакбаев В.М.** Оптимальное проектирование безредукторной машины с переключением потока для ветрогенератора // Известия ТПУ. 2020. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-proektirovanie-bezreduktornoy-mashiny-s-pereklyucheniem-potoka-dlya-vetrogeneratora> (дата обращения: 16.11.2023).

4. **Шаповало А.А.** Комплекс организационно-технических решений по совершенствованию работы энергохозяйств дочерних обществ ПАО «Газпром» в современных условиях // Газовая промышленность. 2017. №11 (760). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleks-organizatsionno-tehnicheskikh-resheniy-po-sovershenstvovaniyu-raboty-energohozyaystv-dochernih-obschestv-pao-gazprom-v> (дата обращения: 14.11.2023).

5. **Нагайцев В.И., Сергеев С.В., Сизякин А.В.** Эволюция требований к свойствам материалов постоянных магнитов для электрических машин // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2021. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-trebovaniy-k-svoystvam-materialov-postoyannyh-magnitov-dlya-elektri-cheskih-mashin> (дата обращения: 14.11.2023).

6. **Валеев Р.А., Пискорский В.П., Королев Д.В., Моргунов Р.Б.** Оптимизация содержания кобальта как способ температурной стабилизации редкоземельных магнитов // Труды ВИАМ. 2023. №3 (121). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-soderzhaniya-kobalta-kak-sposob-temperaturnoy-stabilizatsii-redkozem-elnyh-magnitov> (дата обращения: 16.11.2023).

7. **Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н., Ратцев Я.А., Полянский Е.А.** Комбинированный магнитный подвес // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. № 4 (68). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kombinirovannyy-magnitnyy-podves> (дата обращения: 16.11.2023).

8. **Лукин А.А.** Особенности формирования высокоэрритивного состояния в ПМ типа рзм-м // ГИАБ. 2007. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-vysokokoertsitivnogo-sostoyaniya-v-pm-tipa-rzm-m> (дата обращения: 16.11.2023).

9. **Чередниченко И.В., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Кузьмина Н.А., Шубаков В.С., Жуков Д.Г.** Структура и свойства сплавов для постоянных магнитов юндк25ба, полученных методом направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем // Труды ВИАМ. 2017. №11 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/struktura-i-svoystva-splavov-dlya-postoyannyh-magnitov-yundk25ba-poluchennyh-metodom-napravlennoy-kristallizatsii-s> (дата обращения: 16.11.2023).

10. **Чередниченко И.В., Бавина М.А., Бондаренко Ю.А., Шурыгин В.Д., Овчинников А.Д., Галимуллин С.А.** Влияние параметров направленной кристаллизации на структуру и свойства постоянных магнитов из сплава юндкба // Труды ВИАМ. 2023. №11 (129). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-parametrov-napravlennoy-kristallizatsii-na-strukturu-i-svoystva-postoyannyh-magnitov-iz-splava-yundkba> (дата обращения: 07.02.2024).

REFERENCES

1. **Laura H. Lewis and Fe'Lix Jime'Nez-Villacorta.** Perspectives on Permanent Magnetic Materials for Energy Conversion and Power Generation // Metallurgical and Materials Transactions A 44-Suppl, January 2013. DOI: 10.1007/s11661-012-1278-2

2. **Oliver Gutfleisch, Matthew A. Willard, Ekkes Brück, Christina H. Chen, S. G. Sankar, and J. Ping Liu.** Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient // Advanced Materials 20:1-22 August 2011

3. Prakht V.A., Dmitrievsky V.A., Kazakbaev V.M. Optimal design of gearless flux-switching Generator with Ferrite Permanent Magnets // *Izvestia TPU*, 2020, No.5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-proektirovanie-bezreduktornoy-mashiny-s-pereklyucheniem-potoka-dlya-vetrogeneratora> (date of access: 16.11.2023).

4. Shapoval A.A. Complex of technical-organizational decisions on improving the work of energy departments of the subsidiaries of Gazprom PJSC in current conditions // *Gas Industry*, 2017, no.11 (760). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleks-organizatsionno-tehnicheskikh-resheniy-po-sovshenstvovaniyu-raboty-energohozyaystv-dochernih-obschestv-pao-gazprom-v> (date of access: 14.11.2023).

5. Nagaitsev V.I., Sergeev S.V., Sizyakin A.V. Evolution of requirements to the material properties of permanent magnets for electrical machines. *Bulletin of the South Ural State University, Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 99–108. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-trebovaniy-k-svoystvam-materialov-postoyannyh-magnitov-dlya-elektricheskikh-mashin> (date of access: 14.11.2023).

6. Valeev R.A., Piskorskiy V.P., Korolev D.V., Morgunov R.B. Optimization of the cobalt content as a way of temperature stabilization of rare earth magnets. // *Proceedings of VIAM*, 2023, No.3 (121). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-soderzhaniya-kobaltakak-sposob-temperaturnoy-stabilizatsii-redkozemelnyh-magnitov> (date of access: 16.11.2023).

7. Makarychev Yu.A., Ivannikov Yu.N., Brattsev Ya.A., Polyansky E.A. Combined magnetic bearing // *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences*, 2020, no. 4 (68). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kombinirovannyi-magnitnyy-podves> (date of access: 16.11.2023).

8. Lukin A.A. Features of the formation of a highly coercive state in PM of the rem-m type // *GIAB*, 2007, no.12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-vysokokoertsitivnogo-sostoyaniya-v-pm-tipa-rzm-m> (date of access: 16.11.2023).

9. Cherednichenko I.V., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhny M.Yu., Kuzmina N.A., Shubakov V.S., Zhukov D.G. The structure and properties of permanent magnetic alloys UNDK25BA, manufacturing by directional solidification methods with liquid metal cooler // *Proceedings of VIAM*, 2017, no. 11 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/struktura-i-svoystva-splavov-dlya-postoyannyh-magnitov-yundk25ba-poluchennyh-metodom-napravlennoy-kristallizatsii-s> (date of access: 16.11.2023).

10. Cherednichenko I.V., Bavina M.A., Bondarenko Yu.A., Shurygin V.D., Ovchinnikov A.D., Galimullin S.A. Influence of directional crystallization parameters on the structure and properties of permanent magnets made of Yundkba alloy // *Proceedings of VIAM*. 2023. No. 11 (129). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-parametrov-napravlennoy-kristallizatsii-na-strukturu-i-svoystva-postoyannyh-magnitov>

Статья поступила в редакцию 28.12.2023; одобрена после рецензирования 09.01.2024; принята к публикации 12.01.2024.

The article was submitted 28.12.2023; approved after reviewing 09.01.2024; asseped for publication 12.01.2024.

