

УДК 621.318.12

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-3-264-275>

EDN QSOBYJ



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Формирование структуры и свойств магнитов на основе гексаферрита стронция, полученных с помощью технологии Powder Injection Molding

Б.Д. Чернышев^{1,2,✉}, И.В. Щетинин²

¹ Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» имени Н.П. Сажина, Москва, 111524 Россия

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС), Москва, 119049 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: BDmChernyshev@rosatom.ru

Аннотация

Цели. Изучить возможность получения постоянных магнитов на основе гексаферрита стронция с помощью технологии Powder Injection Molding (PIM), заключающейся в литье гранулятов, высоконаполненных керамическим порошком. Данный процесс состоит из операций получения гранулята (исходного сырья на основе органического связующего и порошка гексаферрита стронция), литья гранулята в термопластавтомате для создания первых промежуточных («зеленых») деталей, последующего удаления связки из них, получения «коричневых» деталей и финального спекания.

Методы. Порошок гексаферрита стронция получен керамическим методом. Материал прошел стадию помола в планетарной шаровой мельнице до получения порошка со средним размером частиц 13.4 мкм, который считается оптимальным размером для PIM-технологии. На основе полученного порошка гексаферрита стронция, первичного связующего — парафина и вторичного — полиамида методом ручного смешивания компонентов подготовлен гранулят для создания «зеленых» деталей. Полученные детали подвергли операции удаления связующего — дебиндингу, в результате которого изготовили «коричневые» заготовки, отличающиеся более высокой хрупкостью и наличием структуры открытых пор. Постоянные магниты с размерами 10 × 10 × 5 мм получены методом спекания «коричневых» деталей в окислительной атмосфере.

Результаты. Уровень магнитных параметров образцов на основе гексаферрита стронция составил более 70% от значений, характерных для промышленных изотропных магнитов на основе гексаферрита бария в соответствии ГОСТ 24063-80, что обусловлено наличием пор в спеченных изделиях.

Выводы. Установлена возможность применения керамического метода для производства порошка гексаферрита стронция, который может быть использован при изготовлении гранулята. Использование данного сырья позволяет изготавливать магниты методом PIM-технологии с плотностью не менее 80%.

Ключевые слова

постоянный магнит, гексаферрит стронция, PIM-технология, гранулят, микроструктура, магнитные свойства

Поступила: 06.10.2024

Доработана: 17.01.2025

Принята в печать: 02.04.2025

Для цитирования

Чернышев Б.Д., Щетинин И.В. Формирование структуры и свойств магнитов на основе гексаферрита стронция, полученных с помощью технологии Powder Injection Molding. *Тонкие химические технологии*. 2025;20(3):264–275. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-3-264-275>

RESEARCH ARTICLE

Formation of the microstructure and properties of strontium hexaferrite magnets using powder injection molding

Bogdan D. Chernyshev^{1,2,✉}, Igor V. Schetinin²

¹ State Research and Design Institute of Rare Metal Industry “Giredmet,” Moscow, 111524 Russia

² National University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: BDmChernyshev@rosatom.ru

Abstract

Objectives. The study set out to investigate the possibility of production strontium hexaferrite permanent magnets using powder injection molding (PIM) technology, which involves casting granules highly filled with ceramic powder. After obtaining the initial granulate based on organic binders and strontium hexaferrite powder, the material was cast in an injection molding machine to create the first intermediate (*green*) parts, followed by removal of the primary binder to obtain *brown* parts and final sintering.

Methods. Strontium hexaferrite powder was obtained by the ceramic method. The material underwent grinding in a planetary ball mill to obtain a powder having an average particle size of 13.4 μm , which is considered optimal for the applied PIM technology. Granulate materials, consisting of the obtained strontium hexaferrite powder combined with primary paraffin and secondary polyamide binders, were prepared by manual mixing of the components and used for creation of green parts in injection molding machine. Brown parts obtained following removal of binder from the obtained green parts were characterized by their higher brittleness and open pore structure. Permanent magnets with dimensions of $10 \times 10 \times 5$ mm were obtained following sintering of brown parts in an oxidizing atmosphere.

Results. The more than 70% higher strength of the magnetic properties of the obtained strontium hexaferrite samples compared to isotropic barium hexaferrite-based magnets manufactured in accordance with GOST 24063-80 is due to the presence of pores after sintering.

Conclusions. The possibility of using the ceramic method for producing strontium hexaferrite powder for use in granulate manufacturing was demonstrated. This raw material can then be used to obtain strontium hexaferrite permanent magnets via PIM technology having 80% density.

Keywords

permanent magnet, strontium hexaferrite, PIM technology, granulate, microstructure, magnetic properties

Submitted: 06.10.2024

Revised: 17.01.2025

Accepted: 02.04.2025

For citation

Chernyshev B.D., Schetinin I.V. Formation of the microstructure and properties of strontium hexaferrite magnets using powder injection molding. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2025;20(3):264–275. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-3-264-275>

ВВЕДЕНИЕ

Техническое развитие во многих областях невозможно представить без использования магнитотвердых материалов. Данные материалы применяются для производства постоянных магнитов (ПМ), которые используются для создания продукции как специального, так и гражданского назначения: ПМ обеспечивают работу электродвигателей, генераторов, датчиков, акустических систем, медицинских устройств. В промышленности они широко используются в магнитных захватах, подъемных механизмах, миксерах и различных сенсорах.

Строгие требования и постоянное совершенствование продукции специального назначения

накладывает ряд ограничений на магнитотвердые материалы, которые могут быть использованы для создания ПМ. К ним относятся высокие значения рабочей температуры и, соответственно, точки Кюри, а также повышенные показатели предела прочности при растяжении σ_B , относительного удлинения δ и стойкости к коррозии. ПМ на основе редкоземельных материалов (РЗМ) системы Sm–Co работают при температурах порядка 350–550°C. Класс магнитотвердых материалов на основе сплавов систем Fe–Cr–Co отличается наличием эффективной комбинации магнитных параметров (остаточной индукции $B_r = 1.1$ Тл и коэрцитивной силы по индукции $H_C^B = 38$ кА/м) и механических свойств (предела прочности при растяжении $\sigma_B = 785$ МПа

и относительного удлинения $\delta = 3\%$) [1]. Достижению высокого уровня магнитных свойств данных видов ПМ предшествует этап длительной термо- и термо-магнитной обработки.

Основной процент потребления на мировом рынке занимают ПМ на основе сплавов Nd–Fe–B, которые обладают наибольшей магнитной энергией (произведением индукции B и коэрцитивной силы $H(BH)_{\max}$), что позволяет максимально снизить габариты техники, особенно при производстве продукции гражданского сектора. Однако существенными недостатками материалов данной системы являются низкие температуры эксплуатации, которые в зависимости от марки ограничены значениями 200–300°C, а также высокая сложность производственного процесса, которая связана с высокой активностью РЗМ [2, 3]. Ввиду указанных фактов значительный сегмент рынка ПМ (более 25%) занимают изделия на основе гексаферритов бария и стронция, которые обладают по сравнению с системой Nd–Fe–B относительно низким значением магнитной энергии, но отличаются повышенной коррозионной и химической стойкостью. При этом стоимость сырья для производства ферритовых ПМ значительна ниже по сравнению с материалами, которые имеют в своем составе РЗМ и такие материалы, как Co [4].

Гексаферрит стронция является перспективным материалом для гипертермии, использование которого возможно только в виде наноразмерных частиц [5]. В работе [6] частицы с размерами зерна порядка 30–40 нм были получены в результате использования золь-гель метода. Наноразмерные композиции также возможно получать методом растворного горения нитрат-органических прекурсоров [7], синтезом из оксидных стекол [8], самораспространяющимся высокотемпературным синтезом [9] и гидротермальным методом [10]. Однако классической технологией получения порошков гексаферрита стронция, которые являются пригодными для создания ПМ, является керамический метод, который состоит из операций ферритизации и измельчения материала до частиц с требуемой фракцией на уровне 1–10 мкм [11].

ПМ на основе основных магнитотвердых материалов, среди которых выделяют системы Nd–Fe–B, Sm–Co, Sr–Fe–O, получают с использованием методов порошковой металлургии [12, 13]. Ряд материалов на основе сплавов Fe–Cr–Co и Al–Ni–Co получают методом литья по выплавляемым моделям [14]. Формирование высококоэрцитивного состояния этих сплавов достигается в процессе спинодального распада основной фазы на сильно- и слабомагнитные фазы благодаря использованию технологии термо-магнитной обработки. Использование данных подходов характерно для организации крупносерийного

производства магнитов преимущественно простой формы (кольцо, сектор и др.). Однако миниатюризация и усложнение конструкций существующих приборов и магнитных систем ведут к усложнению геометрии используемого изделия [15]. Изменение конфигурации при использовании традиционных технологических подходов ведет к необходимости применения методов механической обработки. Их использование не только требует наличия мощностей и достаточно большого парка оборудования, но и ведет к резкому снижению коэффициента использования материала (КИМ) до уровня порядка 40%. При этом возникает большое количество шлифотходов, содержащих дорогостоящие редкоземельные металлы, которые необходимо повторно извлекать и вводить в производственный цикл для уменьшения затрат при производстве магнитов [16].

Для увеличения КИМ посредством снижения необходимости применения механической обработки внедряются и широко применяются технологии инжекционного формования порошковых композиций (powder injection molding, PIM). Метод PIM основан на прессовании изделий из гранулята, состоящего из органического связующего, высоконаполненного металлическим или керамическим порошком. Далее спрессованные промежуточные детали проходят этапы удаления связки (дебиндинга) и спекания [17]. При использовании данного подхода обеспечивается производство изделий сложной конфигурации массой до 1 кг «сразу в размер», что позволяет повысить КИМ до величин порядка 97–99% [18]. В связи с этим, целесообразно производить постоянные магниты на основе редкоземельных металлов с использованием PIM-технологии.

Данный метод целесообразно применять при изготовлении крупных партий изделий, поэтому для отработки процессов и получения уникальных магнитов в лабораторных масштабах возможно применять технологии аддитивного производства. Уже получены результаты использования метода селективного лазерного плавления для создания магнитных систем на основе нескольких материалов [15]. Основным недостатком селективного лазерного плавления является стоимость оборудования для печати ПМ, а также высокие требования к чистоте и размерному распределению исходных порошков. Основным конкурентом данной технологии является стереолитография, которая успешно применяется для создания керамики методом печати фотополимеров, высоконаполненных керамическими порошками [19]. Процесс введения порошковой композиции в фотополимер аналогичен процессам, происходящим при подготовке гранулятов для PIM-технологии, и может быть выполнен

с использованием различных методов смешивания исходных материалов. При этом он не требует нагрева, т.к. фотополимеры обладают высокой текучестью [20].

Целью данной работы является исследование микроструктуры и магнитных свойств порошков на основе гексаферрита стронция и постоянных магнитов, полученных с использованием ПИМ-технологии.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Порошок гексаферрита стронция был изготовлен методом твердофазного синтеза. На первом этапе исходные компоненты — гематит и карбонат стронция чистотой не менее 99.5 мас. % — смешивали в смесителе типа «Турбула» компании «Техно-центр» (Россия), после чего при 1200°C в течение 5 ч проводили синтез требуемой фазы гексаферрита стронция. Полученный порошок измельчали в планетарной шаровой мельнице (Техно-центр, Россия) в течение не менее 5 ч. Контроль среднего размера порошковых композиций был проведен с использованием лазерного анализатора размера частиц Analysette 22 MicroTec plus (Fritsch, Германия). Анализ магнитных свойств порошковых композиций проводили с использованием вибромагнетометра VSM-250 (Changchun, Китай), позволяющего анализировать материалы в полях до 2 Тл.

Полученные порошковые композиции перерабатывали в гранулят, для чего в них добавляли связку на основе парафина, полиамида и дополнительных технологических добавок. Связку в порошок на основе гексаферрита стронция вводили вручную и с использованием промышленного гранулятора.

Компактирование гранулятов осуществляли на термопластавтомате при температуре размягчения связующего вещества. Исследование наличия внутренних дефектов «зеленых» деталей проводили с использованием томографии¹.

Удаление первичного связующего на основе парафина из промежуточных деталей проводили методами растворного дебиндинга. В качестве основных растворителей применяли ацетон, гексан и перхлорэтилен (Экос-1, Россия). Изменение массы деталей и количество удаленного связующего в процессе

дебиндинга определяли с использованием весов M-ER 123 ACFJR-600.01 Sensomatic TFT (Mertech Equipment, Южная Корея).

Спекание следующих промежуточных деталей, которые носят название «коричневых» заготовок, проводили в окислительной среде в муфельной печи ПМВ-1600п (Bossert, Россия) при температуре не менее 1210°C в течение 2 ч. После удаления связки и спекания заготовки имели форму параллелепипеда с размерами 10 × 10 × 5 мм. Плотность магнитов после спекания определяли с использованием гелиевого пикнометра (Micromeritics, США).

Анализ микроструктуры порошков гексаферрита стронция, гранулята, промежуточных деталей и спеченных магнитов проводили с использованием сканирующих электронных микроскопов (СЭМ) TM-3000 фирмы Hitachi (Япония) и FEI quanta 200 F Feg 250 (FEI, США) с энергодисперсионным анализатором EDAX (Octane Elect, США). Фазовый анализ выполнен с использованием рентгеновского дифрактометра «ДРОН-4» (АО ИЦ «Буревестник», Россия). Обработка и анализ полученных данных проведены с использованием специализированного пакета программ PDXL (Rigaku²) и базы данных PDF-2³. Количественный фазовый анализ выполнен с использованием метода Ритвельда. Измерения петель магнитного гистерезиса образцов постоянных магнитов были проведены на гистерезисграфе МН-50 (Walker Scientific Inc., США). Химический анализ образцов выполнен с использованием атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6300 (Thermo Fisher Scientific, США). Анализатор углерода и серы SC844 фирмы LECO (США) применялся для исследования загрязнения постоянных магнитов органическим связующим.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом СЭМ установлено, что размеры частиц порошка, прошедшего стадию синтеза при температуре 1200°C в течение 5 ч, не превышают 3–4 мкм, а сами частицы зачастую имеют форму гексагональных призм (рис. 1). Однако в процессе высокотемпературного синтеза произошло спекание порошка с образованием крупных агломератов.

¹ Наименования и производители промышленного гранулятора, термопластавтомата, томографа, а также наименование и свойства связующего вещества являются коммерческой тайной и не могут быть опубликованы в статье. [The names and manufacturers of the industrial pelletizer, thermoplastic automatic machine, tomograph, as well as the name and properties of the binder are trade secrets and cannot be published in the article.]

² <https://rigaku.com/>. Дата обращения 11.03.2025 г. / Accessed March 11, 2025.

³ <https://www.icdd.com/pdf-2/>. Дата обращения 11.03.2025 г. / Accessed March 11, 2025.

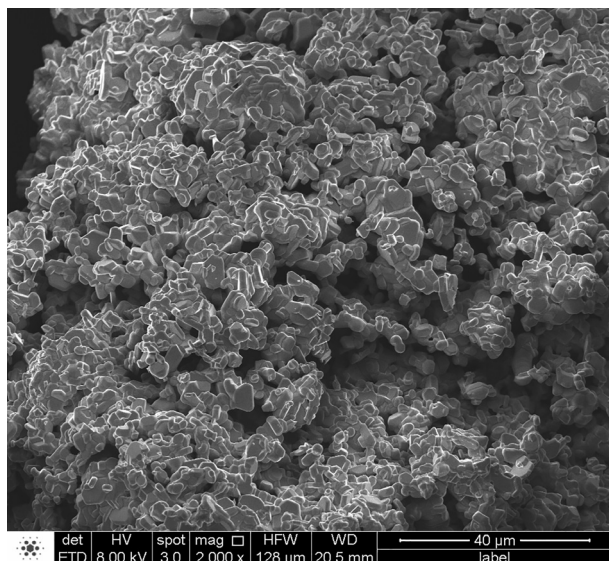


Рис. 1. Микроструктура гексаферрита стронция после спекания в течение 5 ч при температуре 1200°C

Fig. 1. Strontium hexaferrite microstructure after sintering during 5 h at temperature of 1200°C

Использование полученного материала для получения изделий методами РИМ и стереолитографии недопустимо ввиду очевидной крупности частиц, размеры которых необходимо уменьшить. В связи с этим, на следующем этапе проводилось тонкое измельчение полученных материалов. Снимок микроструктуры порошка гексаферрита стронция после тонкого помола представлен на рис. 2.

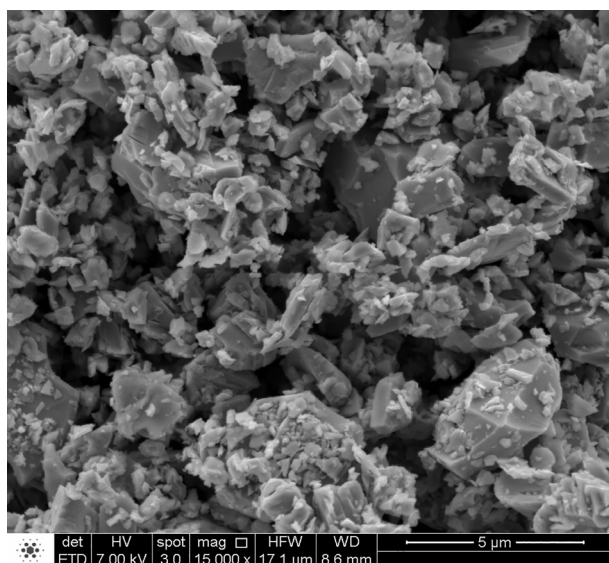


Рис. 2. Микроструктура гексаферрита стронция после измельчения в планетарной шаровой мельнице

Fig. 2. Microstructure of strontium hexaferrite after grinding in a planetary ball mill

Форма порошка на основе гексаферрита стронция преимущественно осколочная, что является следствием процесса измельчения материала. Установлено, что в ходе измельчения были образованы кристаллиты с размерами менее 1 мкм, наличие которых в структуре порошка способствует достижению высоких магнитных свойств [21]. Данный факт обусловлен размерами однодоменности частиц гексаферрита, которые находятся в интервале 300–600 нм.

Магнитные свойства порошковой композиции на основе гексаферрита стронция после тонкого помола были следующими: удельная намагниченность насыщения $\sigma_s = 70.3 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$, удельная остаточная намагниченность насыщения $\sigma_r = 37.2 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$, коэрцитивная сила по намагниченности $H_C^M = 303.9 \text{ kA/m}$ (рис. 3).

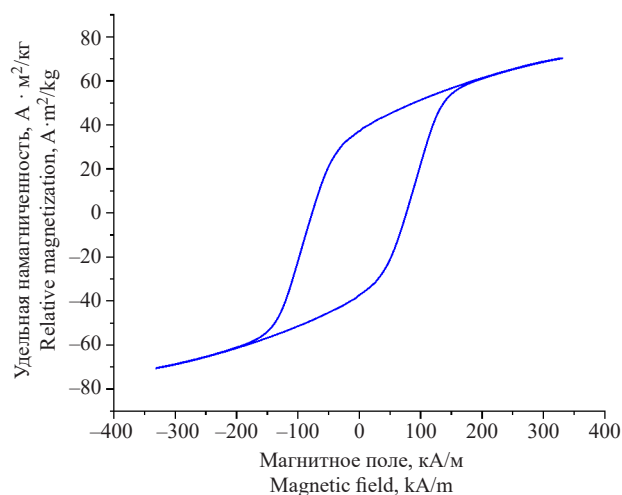


Рис. 3. Петля гистерезиса порошковой композиции на основе гексаферрита стронция после тонкого помола в течение 10 ч

Fig. 3. Hysteresis loop of a strontium hexaferrite powder after fine grinding for 10 h

С использованием лазерного анализатора частиц установлено, что средний размер частиц порошковой композиции на основе материала системы Sr–Fe–O составил 13.4 мкм. Размеры частиц данной порошковой композиции находятся в интервале от 500 нм до 25 мкм. Порошок с данным гранулометрическим составом считается оптимальным сырьем, которое применяется для формирования фидстоков для метода РИМ. Это обусловлено тем фактом, что порошки с размерами до 20–25 мкм позволяют изготовить на их основе грануляты с требуемыми параметрами текучести [20]. При этом наноразмерные частицы будут заполнять поры между крупными частицами. Порошки полученного гранулометрического состава также могут быть использованы в качестве исходного сырья для создания фотополимеров,

применяющихся при 3D-печати изделий методом стереолитографии. Размеры частиц данной порошковой композиции не превышают толщину слоя печати, который преимущественно находится в интервале от 20 до 50 мкм [22, 23].

На рис. 4 приведено СЭМ-изображение гранулята, на котором видны частицы порошка гексаферрита стронция, расположенные в полимерной матрице на основе парафина и полиамида. Контраст светлых частиц керамики на темном фоне связующего вещества показывает сильное различие в атомных номерах химических элементов веществ, что позволяет сделать вывод о наличии в структуре фидстока достаточно крупных областей, в которые был затруднен доступ порошка в процессе смешивания. Это связано с особенностями подготовки гранулята, который был получен методом ручного смешивания исходных компонентов.

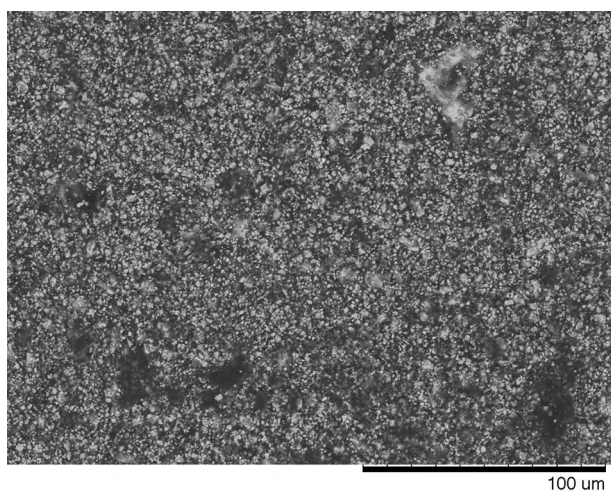


Рис. 4. Микроструктура гранулята на основе порошка гексаферрита стронция

Fig. 4. Microstructure of granulate consist of strontium hexaferrite powder

Результаты томографии «зеленых» заготовок, полученных на основе гексаферрита стронция, представлены на рис. 5.

В ходе отработки процесса получения «зеленых» деталей были изменены режимы заливки гранулята в пресс-форму термопластавтомата. Повышение давления⁴ прессования позволило удалить из промежуточных деталей дефекты в виде неслитин, которые образовались в результате неслияния потоков расплавленного связующего пониженной жидкотекучести и отчетливо видны на рис. 5a и 5b. «Зеленые»

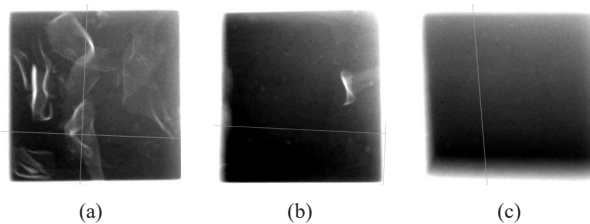


Рис. 5. Результаты томографии «зеленых» заготовок образцов постоянных магнитов на основе гексаферрита стронция с дефектами в виде неслитин (a, b) и без дефектов (c)

Fig. 5. Tomography of strontium hexaferrite permanent magnet green body samples with lack of fusion (a, b) and without defects (c)

детали, полученные по измененному режиму, характеризовались минимальной пористостью, что свидетельствует о возможности их дальнейшего использования с целью получения на финальной стадии процесса ПИМ качественного магнита, магнитные (произведение индукции B и коэрцитивной силы H (BH)_{max}, коэрцитивная сила по индукции H_C^B и намагниченности H_C^M , остаточная индукция B_r) и механические свойства (предел прочности при растяжении σ_B , относительное удлинение δ) которого будут зависеть исключительно от качества получения исходного сырья. СЭМ-изображения микроструктуры «зеленых» деталей, которые были классифицированы по результатам томографии как не имеющие внутренних дефектов, представлены на рис. 6.

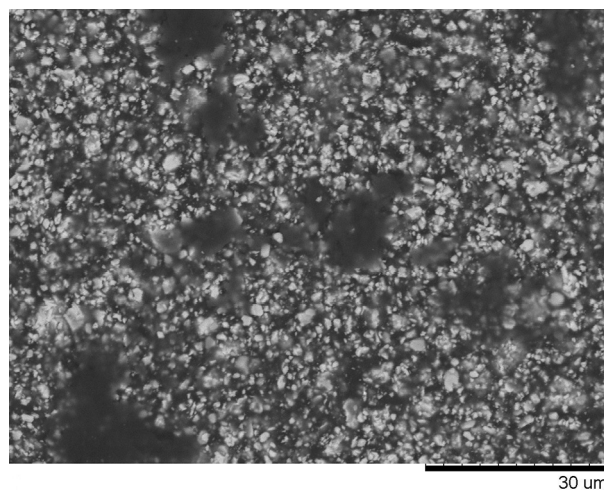


Рис. 6. Микроструктура «зеленой» заготовки образца постоянного магнита на основе гексаферрита стронция

Fig. 6. Microstructure of strontium hexaferrite permanent magnet green body sample

⁴ Характер изменения режимов заливки гранулята и значение повышения давления прессования являются коммерческой тайной и не могут быть опубликованы в статье. [The nature of the change of granulate pouring modes and the value of increasing pressing pressure are commercial secrets and cannot be published in the article.]

На данных изображениях видно, что микроструктура «зеленой» детали наследует структуру гранулята: частицы порошка гексаферрита стронция распределены в теле промежуточной детали равномерно, но при этом возникают крупные области с недошедшим в них порошком. Размеры подобных областей достигают 30–40 мкм в диаметре. Наличие данного дефекта является нежелательным, т.к. на следующем этапе дебиндинга удаление первичного связующего может привести к образованию крупных пор, которые могут не только остаться в конечном изделии, но и способствовать короблению и растрескиванию деталей при усадке ввиду ослабления каркаса на основе вторичного связующего, преимущественно состоящего из полиамида.

В процессе подбора наиболее эффективной среды и параметров удаления полиамида из промежуточных заготовок был получен график изменения массы «зеленой» детали от времени, представленный на рис. 7.

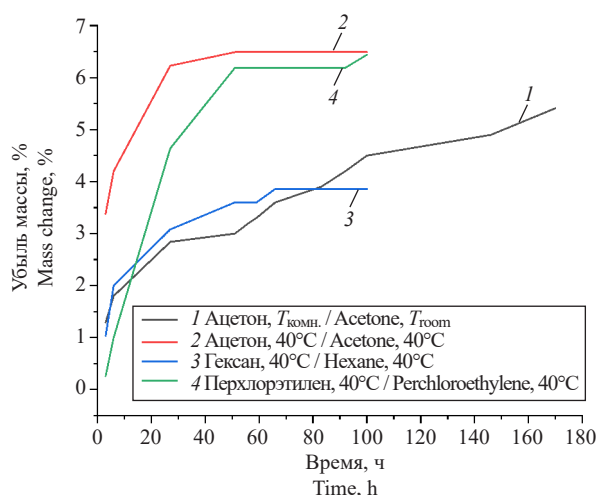


Рис. 7. Изменение массы «зеленых» деталей на основе гексаферрита стронция в процессе дебиндинга в зависимости от времени выдержки

Fig. 7. Mass change of strontium hexaferrite permanent magnet green bodies samples during the debinding process depending on duration of debinding stage

На основе полученной зависимости можно сделать вывод о том, что оптимальными средами удаления первичного связующего являются перхлорэтилен и ацетон. При этом желательно ускорять процесс взаимодействия «зеленой» детали и растворителя путем повышения температуры окружающей среды до 40°C. Образцы, прошедшие стадию дебиндинга в ацетоне при комнатной температуре (20°C), содержали первичное связующее на уровне 1–2 мас. % даже после 170 ч выдержки. В сравнении с результатами работ, посвященных

исследованию эффективных режимов дебиндинга, использование гексана не привело к положительному результату: выдержка в течение 100 ч позволила удалить только 4 мас. % связки [24, 25]. Кроме того, растворитель вступал в активное взаимодействие с деталью, что привело к формированию белого налета на ее поверхности. Это обусловлено тем, что растворение парафина в гексане представляет из себя гетерогенную процедуру, которая наблюдается на границе фазового раздела между жидкой и твердой субстанциями с возможным выпадением осадка [26].

Снимок микроструктуры «коричневой» заготовки, которая были получена из «зеленой» детали в процессе дебиндинга, показан на рис. 8.

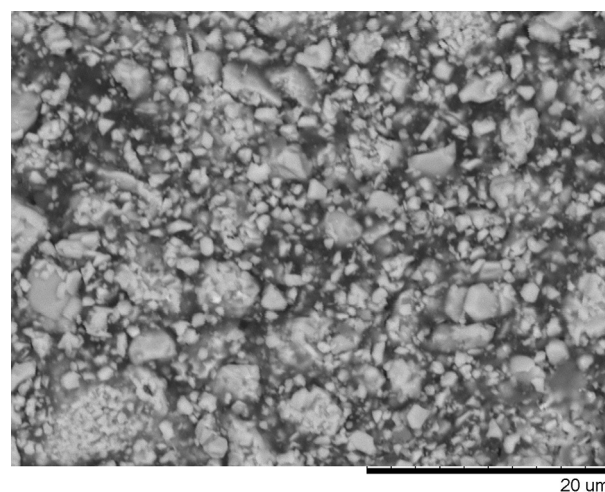


Рис. 8. Микроструктура «коричневой» заготовки образца постоянного магнита на основе гексаферрита стронция

Fig. 8. Microstructure of strontium hexaferrite permanent magnet brown body sample

На полученном изображении видно, что вторая промежуточная заготовка также состоит из порошка гексаферрита стронция и органического связующего. В отличие от структуры гранулятов и «зеленых» деталей «коричневые» заготовки не содержат первичное связующее. На данном этапе вторичное связующее выступает в роли каркаса, что делает промежуточные детали более хрупкими. Структура «коричневой» детали характеризуется наличием связанных открытых пор, которая необходима для обеспечения равномерной усадки на этапе спекания.

Спекание «коричневых» деталей на основе гексаферрита стронция позволило получить магниты с требуемой геометрией 10 × 10 × 5 мм. Анализ содержания примесей в образцах после спекания показал, что материал не подвергся загрязнению

углеродом, который часто входит в состав деталей из различных материалов из связующего вещества: процентное содержание углерода составило 0.014 мас. %. Данный факт свидетельствует о том, что связующее на основе парафина и полиамида может быть использовано для создания чистых материалов методом PIM-технологии.

Плотность магнитов на основе гексаферрита стронция после спекания составила 4.2 г/см^3 . Данное значение составляет 80% от теоретического значения [27]. Вероятно, плотность, близкую к теоретической, возможно будет достичь путем применения промышленного оборудования для смешивания порошков и органического связующего, которое позволит равномерно распределять частицы внутри гранулята и «зеленых» деталей.

Магнитные свойства объемных образцов на основе порошка гексаферрита стронция для сплава, полученного методом PIM-технологии, составили по остаточной индукции $B_r = 0.12 \text{ Тл}$, коэрцитивной силе по индукции $H_C^B = 85.7 \text{ кА/м}$, коэрцитивной силе по намагниченности $H_C^M = 298.4 \text{ кА/м}$. Величина коэрцитивной силы по намагниченности превысила значение, устанавливаемое требованиями нормативно-технической документации на данную величину для изотропных постоянных магнитов на основе гексаферрита бария⁵. Однако значения остаточной индукции и коэрцитивной силы по индукции остались на уровне 70% от значений, указанных в нормативно-технической литературе. Повышение уровня коэрцитивной силы может быть достигнуто в первую очередь с помощью уменьшения времени спекания магнитов: будет предотвращен рост отдельных кристаллитов, которые в данном случае выступают в роли однодоменных частиц.

Несмотря на отсутствие крупных дефектов в виде изменения геометрии или появления трещин в деталях на основе гексаферрита стронция, деградация магнитных свойств по сравнению с исходным порошком обусловлена дефектами микроструктуры деталей, прошедших этап спекания (рис. 9).

На снимках СЭМ видно, что конечное изделие представлено в виде большого количества крупных агломератов, которые образованы в процессе спекания мелкозернистого однодоменного порошка. Между агломератами заметны поры с размерами порядка 2–4 мкм, которые не удалось

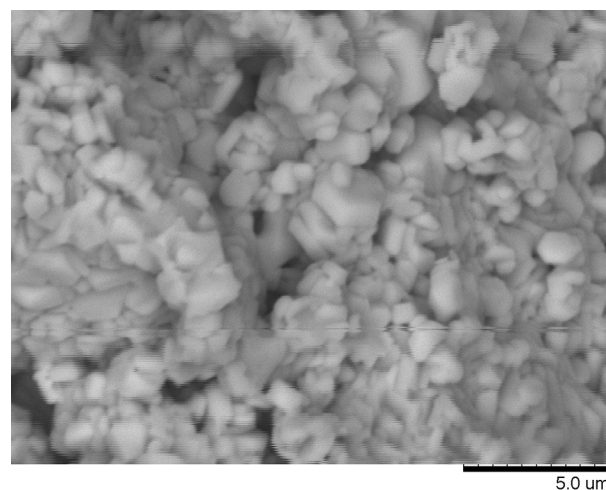


Рис. 9. Микроструктура спекленного постоянного магнита на основе гексаферрита стронция, полученного методом PIM-технологии

Fig. 9. Microstructure of sintered strontium hexaferrite permanent magnet obtained by PIM technology

удалить в процессе высокотемпературной обработки. Наличие пор, негативно влияющих не только на механические и функциональные, но и на магнитные свойства, возможно предотвратить путем подготовки сырья с использованием достаточного количества порошка (от 4 кг) и промышленных грануляторов. Данная задача также может быть решена методом горячего изостатического прессования, который позволяет «залечивать» микротрещины и поры для увеличения плотности и механических характеристик деталей [28].

Вероятно, уровень магнитных параметров спекленного изделия можно увеличить путем уменьшения времени выдержки материала в процессе спекания. Это позволит предотвратить рост однодоменных кристаллитов и оставить структуру финальной детали схожей со структурой исходного сырья.

В процессе исследования фазового состава магнитов после спекания был выявлен дополнительный фактор снижения магнитных свойств. На рентгеновской дифрактограмме образца постоянного магнита на основе гексаферрита стронция, представленной на рис. 10, присутствуют дополнительные линии гематита Fe_2O_3 , содержание которого в образце оказалось равным 2 мас. %. Количество основной ферромагнитной фазы $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ составило 98 мас. %.

⁵ ГОСТ 24063-80. Государственный стандарт Союза ССР. Ферриты магнитотвердые. Марки и основные параметры. М.: Государственный комитет СССР по стандартам; 1986. 14 с. [GOST 24063-80. State Standard of the USSR. Magnetically hard ferrites. Brands and main parameters. Moscow: USSR State Committee for Standards; 1986. 14 p.]

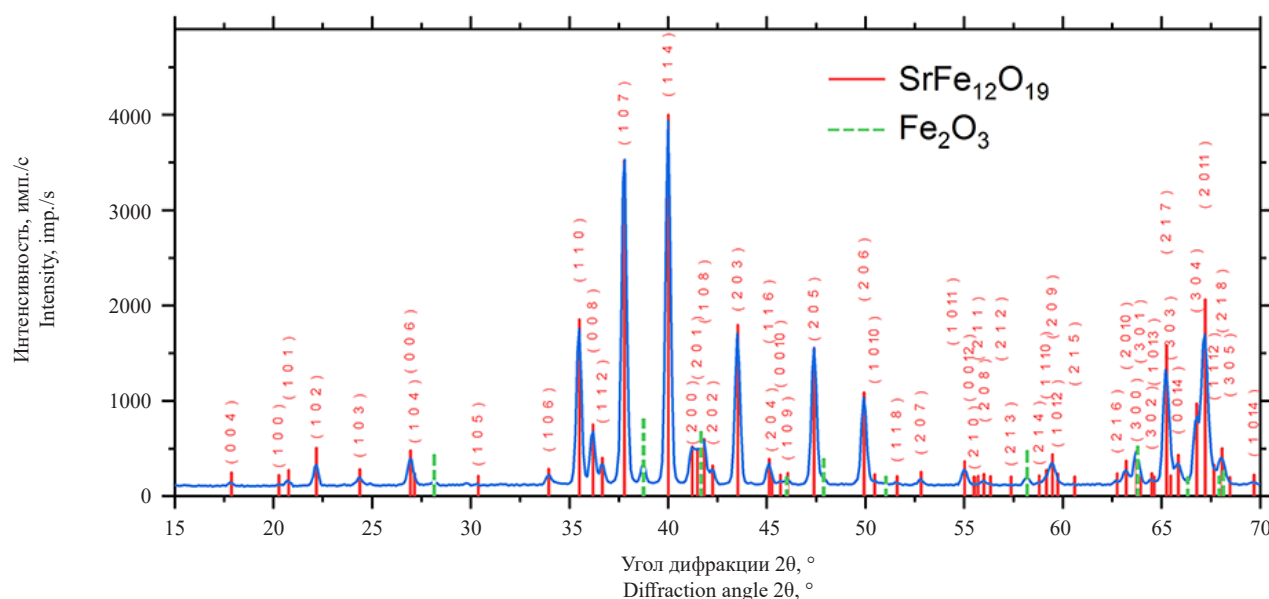


Рис. 10. Рентгенограмма образца постоянных магнитов на основе гексаферрита стронция, полученного методом ПИМ-технологии

Fig. 10. X-ray diffraction of strontium hexaferrite permanent magnet obtained by PIM technology

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования микроструктуры и магнитных свойств порошка гексаферрита стронция установлено, что предложенная технология получения данного материала может быть использована для изготовления сырья для ПИМ-технологии и стереолитографии.

В ходе проведения контроля промежуточных и финальных деталей, полученных методом инъекционного формования гранулятов, высоконаполненных керамическим порошком, сделан вывод, что метод ПИМ является перспективной технологией для производства постоянных магнитов на основе гексаферрита стронция. Для промышленного внедрения данного метода требуется оптимизировать процессы получения гранулята. Это будет реализовано в дальнейшем исследовании за счет применения специализированного оборудования для получения гранулята. Промышленное оборудование для производства сырья должно работать в непрерывном режиме и требует загрузки порошка в количестве 2–3 кг, что позволит обеспечить более равномерное распределение частиц гексаферрита стронция в связке на основе полиамида и парафина. Кроме того, по сравнению с методом ручного смешивания применение гранулятора позволит исключить влияние человеческого фактора на однородность распределения частиц порошка и получить гранулят высокого качества. Также возможно оптимизировать

режим спекания «коричневых» деталей с целью предотвращения образования пор и роста однодоменных частиц гексаферрита стронция. Это может быть достигнуто за счет снижения температуры спекания и снижения скорости нагрева на участке до 500°C, в ходе которого происходит удаление вторичного связующего и технологических добавок.

Отработка данного процесса с использованием гранулята, наполненного порошками гексаферрита стронция, и решение обозначенных проблем, возможно, позволит перейти к использованию указанного материала в качестве связующего для разработки фидстока на основе порошков сплава системы Sm–Co и производства редкоземельных постоянных магнитов марки KC25.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-73-00114.

Acknowledgments

The work was financially supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-73-00114.

Вклад авторов

Б.Д. Чернышев — синтез порошка гексаферрита стронция, получение постоянных магнитов методом ПИМ, обработка результатов, подготовка статьи.

И.В. Щетинин — анализ микроструктуры, фазового состава и магнитных свойств образцов.

Authors' contributions

B.D. Chernyshev — synthesis of strontium hexaferrite powder, production of permanent magnets by PIM technology, processing the results, and writing the text of the article.

I.V. Schetinin — analysis of the microstructure, phase composition, and magnetic properties of samples.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Altafia M., Sharifia E.M., Ghasemi A. The effect of various heat treatments on the magnetic behavior of the Fe-Cr-Co magnetically hard alloy. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;507:166837. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166837>
2. Takagi K., Soda R., Jinno M., Yamaguchi W. Possibility of high-performance $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ sintered magnets by low-oxygen powder metallurgy process. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;506:166811. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166811>
3. Pandian S., Chandrasekaran V., Markandeyulu G., Iyer K.J.L., Rama Rao K.V.S. Effect of Co, Dy and Ga on the magnetic properties and the microstructure of powder metallurgically processed Nd-Fe-B magnets. *J. Magn. Magn. Mater.* 2004;364(1–2):295–303. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00541-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00541-3)
4. Luk P.C.-K., Abdulrahman H.A., Xia B. Low-cost high-performance ferrite permanent magnet machines in EV applications: A comprehensive review. *eTransportation*. 2020;6:100080–100093. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100080>
5. Najafinezhad A., Abdellahi M., Samandari S.S., Ghayour H., Khandan A. Hydroxyapatite- M-type strontium hexaferrite: A new composite for hyperthermia applications. *J. Alloys Compound*. 2018;734:290–300. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.138>
6. Kumar S.S., Kumar R.S., Kumari P., Ranga N., Manash A., Kumari R. Structural, ferromagnetic, ferroelectric, and biomedical behaviour of yttrium doped strontium hexaferrite ($\text{SrFe}_{12-x}\text{Y}_x\text{O}_{19}$) nano materials, assisted with sol-gel cost effective technique. *Physica Scripta*. 2023;98(11):115015. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acfce7>
7. Остроушко А.А., Гагарин И.Д., Кудюков Е.В., Жуланова Т.Ю., Пермякова А.Е., Русских О.В. Получение материалов на основе гексаферрита стронция методом растворного горения: воздействие возникающих в прекурсорах зарядов и внешнего магнитного поля. *Журн. неорган. химии*. 2024;69(2):143–154. <https://doi.org/10.31857/S0044457X24020013>
8. Zaitsev D.D., Kazin P.E., Gravchikova E.A., Trusov L.A., Kushnir S.E., Tretyakova Y.D., Jansen M. Synthesis of magnetic glass ceramics containing fine $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ particles. *Mendeleev Communications*. 2004;14(4):171–173. <https://doi.org/10.1070/MC2004v014n04ABEH001971>
9. Jing Y., Jia L., Zhenga Y., Zhanga H. Hydrothermal synthesis and competitive growth of flake-like M-type strontium hexaferrite. *RSC Adv*. 2019;57(9):33388–33394. <https://doi.org/10.1039/C9RA06246G>
10. Shirmahd H., Aboutalebi M., Seyedein S.H., Adeli M. Synthesis of strontium hexaferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) method and investigation of the effect of milling on morphology and magnetic properties. *Ceram. Int*. 2024;50(20):38542–38549. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.222>
11. Yu Z., Zhou N., Sun Y., Chen Z., Gong H., Shen B. Preparation of high-performance M-type strontium hexaferrites by ceramic method by optimizing the particle size of raw materials. *Solid State Sci*. 2023;144:107309. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2023.107309>

REFERENCES

1. Altafia M., Sharifia E.M., Ghasemi A. The effect of various heat treatments on the magnetic behavior of the Fe-Cr-Co magnetically hard alloy. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;507:166837. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166837>
2. Takagi K., Soda R., Jinno M., Yamaguchi W. Possibility of high-performance $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ sintered magnets by low-oxygen powder metallurgy process. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;506:166811. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166811>
3. Pandian S., Chandrasekaran V., Markandeyulu G., Iyer K.J.L., Rama Rao K.V.S. Effect of Co, Dy and Ga on the magnetic properties and the microstructure of powder metallurgically processed Nd-Fe-B magnets. *J. Magn. Magn. Mater.* 2004;364(1–2):295–303. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00541-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00541-3)
4. Luk P.C.-K., Abdulrahman H.A., Xia B. Low-cost high-performance ferrite permanent magnet machines in EV applications: A comprehensive review. *eTransportation*. 2020;6:100080–100093. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100080>
5. Najafinezhad A., Abdellahi M., Samandari S.S., Ghayour H., Khandan A. Hydroxyapatite- M-type strontium hexaferrite: A new composite for hyperthermia applications. *J. Alloys Compound*. 2018;734:290–300. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.138>
6. Kumar S.S., Kumar R.S., Kumari P., Ranga N., Manash A., Kumari R. Structural, ferromagnetic, ferroelectric, and biomedical behaviour of yttrium doped strontium hexaferrite ($\text{SrFe}_{12-x}\text{Y}_x\text{O}_{19}$) nano materials, assisted with sol-gel cost effective technique. *Physica Scripta*. 2023;98(11):115015. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acfce7>
7. Ostroushko A.A., Gagarin I.D., Kudryukov E.V., et al. Preparation of strontium hexaferrite based materials by solution combustion: the effect of charges arising in precursors and an external magnetic field. *Russ. J. Inorg. Chem.* 2024;69(2):141–150. <https://doi.org/10.1134/s003602362360301x> [Original Russian Text: Ostroushko A.A., Gagarin I.D., Kudryukov E.V., Zhulanova T.Y., Permyakova A.E., Russkikh O.V. Preparation of strontium hexaferrite based materials by solution combustion: the effect of charges arising in precursors and an external magnetic field. *Journal of Inorganic Chemistry = Zhurnal neorganicheskoi khimii*. 2024;69(2):143–154 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044457X24020013>]
8. Zaitsev D.D., Kazin P.E., Gravchikova E.A., Trusov L.A., Kushnir S.E., Tretyakova Y.D., Jansen M. Synthesis of magnetic glass ceramics containing fine $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ particles. *Mendelev Communications*. 2004;14(4):171–173. <https://doi.org/10.1070/MC2004v014n04ABEH001971>
9. Jing Y., Jia L., Zhenga Y., Zhanga H. Hydrothermal synthesis and competitive growth of flake-like M-type strontium hexaferrite. *RSC Adv*. 2019;57(9):33388–33394. <https://doi.org/10.1039/C9RA06246G>
10. Shirmahd H., Aboutalebi M., Seyedein S.H., Adeli M. Synthesis of strontium hexaferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) method and investigation of the effect of milling on morphology and magnetic properties. *Ceram. Int*. 2024;50(20):38542–38549. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.222>

12. Green M.L. Powder metallurgy processing of CrCoFe permanent magnet alloys containing 5–25 wt. % Co. *J. Appl. Phys.* 1982;53(3):2398–2400. <https://doi.org/10.1063/1.330824>
13. Shatsov A.A. Powder materials of the Fe – Cr – Co system. *Met. Sci. Heat Treat.* 2004;46(3–4):152–155. <https://doi.org/10.1023/B:MSAT.0000036668.48856.02>
14. Kaneko H., Sherwood R.C., Wong C.C. New Ductile Permanent Magnet of Fe-Cr-Co System. *AIP Conf. Proc.* 1972;5(1):1088–1092. <https://doi.org/10.1063/1.2953814>
15. 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>
16. Shumkin S.S., Sitnov V.V., Kamynin A.V., Chernyshov B.D., Semenov M.Y., Nikolaichik V.I. Composition and Operating Properties of Hard Magnetic Materials Based on Alloys of the Sm – Co – Cu – Fe – Zr System Obtained with the Use of Recoverable Resources. *Met. Sci. Heat Treat.* 2022;63: 479–485. <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00715-y>
17. Пархоменко А.В., Амосов А.П., Самборук А.Р. Научная технология инжекционного порошкового формования металлических изделий (МИМ-технология). *Научные технологии в машиностроении.* 2012;12(18):8–13.
18. Байдаров С.Ю., Камынин А.В., Крапошин В.С., Чернышев Д.Л. Проблемы развития МИМ-технологии в России в области производства постоянных магнитов. *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2019;9(771):34–37.
19. Malas A., Isakov D., Couling K., Gibbons G.J. Fabrication of High Permittivity Resin Composite for Vat Photopolymerization 3D Printing: Morphology, Thermal, Dynamic Mechanical and Dielectric Properties. *Materials.* 2019;12(23):3818–3833. <https://doi.org/10.3390/ma12233818>
20. Костин Д.В., Амосов А.П., Самборук А.Р., Чернышев Б.Д. Влияние способа получения металлических порошков на микроструктуру и текучесть гранулята магнитотвердого сплава. *Научные технологии в машиностроении.* 2021;9(123): 3–7. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-9-3-7>
21. Костишин В.Г., Андреев В.Г., Читанов Д.Н., Тимофеев А.В., Адамцов А.Ю., Алексеев А.А. Исследование влияния длительности измельчения порошков гексаферрита стронция на микроструктуру и свойства магнитов на их основе. *Журн. технической физики.* 2015;8:91–93.
22. Ермакова Л.В., Кузнецова Д.Е., Поплевин Д.С., Смыслова В.Г., Карпюк П.В., Соколов П.С., Досовицкий Г.А., Чижевская С.В. Влияние акрилатного мономера на характеристики фотополимеризуемых суспензий для получения керамики из стабилизированного ZrO₂. *Стекло и керамика.* 2022;95(10):03–10. <https://doi.org/10.14489/glc.2022.10.pp.003-010>
23. Hostaša J., Schwentenwein M., Toci G., Esposito L., Brouczek D., Piancastelli A., Pirri A., Patrizi B., Vannini M., Biasini V. Transparent laser ceramics by stereolithography. *Scr. Mater.* 2020;187: 194–196. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.06.006>
24. Rolere S., Soupremanien U., Bohnke M., Dalmaso M., Delafosse C., Laucourt R. New insights on the porous network created during solvent debinding of powder injection-molded (PIM) parts, and its influence on the thermal debinding efficiency. *J. Mater. Process. Technol.* 2021;295:117163–117173. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117163>
25. Basir A., Sulong A.B., Jamadon N.H., Muhamad N. Feedstock properties and debinding mechanism of yttria-stabilized zirconia/stainless steel 17-4PH micro-components fabricated via two-component micro-powder injection molding process. *Ceram. Int.* 2021;47(14):20476–20485. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.057>
11. Yu Z., Zhou N., Sun Y., Chen Z., Gong H., Shen B. Preparation of high-performance M-type strontium hexaferrites by ceramic method by optimizing the particle size of raw materials. *Solid State Sci.* 2023;144:107309. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2023.107309>
12. Green M.L. Powder metallurgy processing of CrCoFe permanent magnet alloys containing 5–25 wt. % Co. *J. Appl. Phys.* 1982;53(3):2398–2400. <https://doi.org/10.1063/1.330824>
13. Shatsov A.A. Powder materials of the Fe – Cr – Co system. *Met. Sci. Heat Treat.* 2004;46(3–4):152–155. <https://doi.org/10.1023/B:MSAT.0000036668.48856.02>
14. Kaneko H., Sherwood R.C., Wong C.C. New Ductile Permanent Magnet of Fe-Cr-Co System. *AIP Conf. Proc.* 1972;5(1):1088–1092. <https://doi.org/10.1063/1.2953814>
15. 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>
16. Shumkin S.S., Sitnov V.V., Kamynin A.V., Chernyshov B.D., Semenov M.Y., Nikolaichik V.I. Composition and Operating Properties of Hard Magnetic Materials Based on Alloys of the Sm – Co – Cu – Fe – Zr System Obtained with the Use of Recoverable Resources. *Met. Sci. Heat Treat.* 2022;63: 479–485. <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00715-y>
17. Parkhomenko A.V., Amosov A.P., Samboruk A.R. Science intensive technology of metallic parts powder injection molding (MIM technology). *Nauchnye tekhnologii v mashinostroenii = High-Tech Technologies in Mechanical Engineering.* 2012;12(18):8–13 (in Russ.).
18. Baidarov S.Yu., Kamynin A.V., Kraposhin V.S., Chernyshev D.L. Problems of development of MIM technology in Russia as applied to production of permanent magnets. *Met. Sci. Heat Treat.* 2020;61(9–10):559–562. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00461-z> [Original Russian Text: Baidarov S.Yu., Kamynin A.V., Kraposhin V.S., Chernyshev D.L. Problems of development of MIM technology in Russia as applied to production of permanent magnets. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* 2019;9(771):34–37 (in Russ.).]
19. Malas A., Isakov D., Couling K., Gibbons G.J. Fabrication of High Permittivity Resin Composite for Vat Photopolymerization 3D Printing: Morphology, Thermal, Dynamic Mechanical and Dielectric Properties. *Materials.* 2019;12(23):3818–3833. <https://doi.org/10.3390/ma12233818>
20. Kostin D.V., Amosov A.P., Samboruk A.R., Chernyshev B.D. Influence of metal powder production method on microstructure and fluidity of magnetically alloy granulate. *Nauchnye tekhnologii v mashinostroenii = High-Tech Technologies in Mechanical Engineering.* 2021;9(123):3–7 (in Russ.).
21. Kostishin V.G., Andreev V.G., Chitanov D.N., et al. Analysis of the effect of crushing of strontium hexaferrite powders in a vibratory mill on the properties of magnets on their basis. *Tech. Phys.* 2015;60(8): 1194–1197. <https://doi.org/10.1134/S1063784215080149> [Original Russian Text: Kostishin V.G., Andreev V.G., Chitanov D.N., Timofeev A.V., Adamtsov A.Yu., Alekseev A.A. Study of the influence of grinding modes of strontium hexaferrite powders in a vibration mill on the properties of magnets based on them. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki.* 2015;8:91–93 (in Russ.).]
22. Ermakova L.V., Kuznetsova D.E., Poplevin D.S., et al. Effect of Acrylate Monomer on the Characteristics of Photopolymerizable Suspensions for Obtaining Ceramic from Stabilized ZrO₂. *Glass Ceram.* 2023;79:395–400. <https://doi.org/10.1007/s10717-023-00520-w>

26. Maryisheva M.A., Aleksanyan I.Yu., Nugmanov A.H.-H., Titova L.M., Maksimenko Y.A. Kinetics of technical paraffin dissolution in hexane and the specific heat of vaporization of a hexane-paraffin composition in the production of food paraffin. *Scientific journal NRU ITMO Series "Processes and Food Production Equipment."* 2022;1:12–21 (in Russ.). <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2022-15-1-12-21>
27. García-Martín E., Granados-Miralles C., Ruiz-Gómez S., Pérez L., Campo A., Guzmán-Mínguez J.C., Fernández C.J., Quesada A., Fernández J.F., Serrano A. Dense strontium hexaferrite-based permanent magnet composites assisted by cold sintering process. *J. Alloys Compound.* 2022;917:165531. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.16038>
28. Benzing J., Hrabec N., Quinn T., White R., Rentz R., Ahlfors M. Hot isostatic pressing (HIP) to achieve isotropic microstructure and retain as-built strength in an additive manufacturing titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Mater. Lett.* 2019;257:126690–126695. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126690>
- [Original Russian Text: Ermakova L.V., Kuznetsova D.E., Poplevin D.S., Smyslova V.G., Karpyuk P.V., Sokolov P.S., Dosovitskii G.A., Chizhevskaya S.V. Effect of Acrylate Monomer on the Characteristics of Photopolymerizable Suspensions for Obtaining Ceramic from Stabilized ZrO₂. *Steklo i keramika.* 2022;95(10):03–10 (in Russ.). <https://doi.org/10.14489/glc.2022.10.pp.003-010>]
23. Hostaša J., Schwentenwein M., Toci G., Esposito L., Brouczek D., Piancastelli A., Pirri A., Patrizi B., Vannini M., Biasini V. Transparent laser ceramics by stereolithography. *Scr. Mater.* 2020;187:194–196. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.06.006>
24. Rolere S., Soupremanien U., Bohnke M., Dalmasso M., Delafosse C., Laucournet R. New insights on the porous network created during solvent debinding of powder injection-molded (PIM) parts, and its influence on the thermal debinding efficiency. *J. Mater. Process. Technol.* 2021;295:117163–117173. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117163>
25. Basir A., Sulong A.B., Jamadon N.H., Muhamad N. Feedstock properties and debinding mechanism of yttria-stabilized zirconia/ stainless steel 17-4PH micro-components fabricated via two-component micro-powder injection molding process. *Ceram. Int.* 2021;47(14):20476–20485. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.057>
26. Maryisheva M.A., Aleksanyan I.Yu., Nugmanov A.H.-H., Titova L.M., Maksimenko Y.A. Kinetics of technical paraffin dissolution in hexane and the specific heat of vaporization of a hexane-paraffin composition in the production of food paraffin. *Scientific journal NRU ITMO Series "Processes and Food Production Equipment."* 2022;1:12–21. <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2022-15-1-12-21>
27. García-Martín E., Granados-Miralles C., Ruiz-Gómez S., Pérez L., Campo A., Guzmán-Mínguez J.C., Fernández C.J., Quesada A., Fernández J.F., Serrano A. Dense strontium hexaferrite-based permanent magnet composites assisted by cold sintering process. *J. Alloys Compound.* 2022;917:165531. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.16038>
28. Benzing J., Hrabec N., Quinn T., White R., Rentz R., Ahlfors M. Hot isostatic pressing (HIP) to achieve isotropic microstructure and retain as-built strength in an additive manufacturing titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Mater. Lett.* 2019;257:126690–126695. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126690>

Об авторах

Чернышев Богдан Дмитриевич, аспирант кафедры физического материаловедения, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС) (119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1); научный сотрудник лаборатории металлургических процессов, АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» им. Н.П. Сажина» (АО «Гиредмет») (111524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1). E-mail: BDmChernyshev@rosatom.ru. Scopus Author ID 57219974902, SPIN-код РИНЦ 5059-3811, <https://orcid.org/000-0003-4129-3420>

Щетинин Игорь Викторович, к.т.н., доцент кафедры физического материаловедения, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС) (119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1). E-mail: ingvvar@gmail.com. Scopus Author ID 36053563600, ResearcherID A-2270-2012, SPIN-код РИНЦ 8382-7666, <https://orcid.org/0000-0002-0281-2497>

About the Authors

Bogdan D. Chernyshev, Postgraduate Student, Department of Physical Materials Science, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS) (4-1, Leninskii pr., Moscow, 119049, Russia); Research Scientist, Laboratory of Metallurgical Processes, Giredmet (2-1, Elektrodnaia ul., Moscow, 111524, Russia). E-mail: BDmChernyshev@rosatom.ru. Scopus Author ID 57219974902, RSCI SPIN-code 5059-3811, <https://orcid.org/000-0003-4129-3420>

Igor V. Schetinin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Physical Materials Science, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS) (4-1, Leninskii pr., Moscow, 119049, Russia). E-mail: ingvvar@gmail.com. Scopus Author ID 36053563600, ResearcherID A-2270-2012, RSCI SPIN-code 8382-7666, <https://orcid.org/0000-0002-0281-2497>